

**Европейская экономическая комиссия**

Комитет по устойчивой энергетике

**Группа экспертов по экологически более
чистым электроэнергетическим системам****Шестнадцатая сессия**

Женева, 23–24 ноября 2020 года

Пункт 4 предварительной повестки дня

Достижение углеродной нейтральности**Взаимодействие технологий, в том числе технологий
гибкого и экологически чистого производства энергии
на основе угля, природного газа и возобновляемых
источников****Записка Эндрю Минченера, кавалера ордена Британской империи,
генерального директора Центра чистого угля МЭА***Резюме*

Настоящий документ был подготовлен по просьбе Группы экспертов по экологически более чистым электроэнергетическим системам, высказанной на ее пятнадцатой сессии 5–6 ноября 2020 года, в качестве основы для обсуждения вопроса о взаимодействии отдельных вариантов технологий в рамках концепции углеродной нейтральности и внесения вклада в реализацию Проекта по обеспечению углеродной нейтральности (см. ECE/ENERGY/2019/7).

Цель документа — подчеркнуть необходимость диверсификации способов производства электроэнергии с использованием многих источников топлива и дать представление о взаимодействии технологий с целью формирования углеродно-нейтральных обществ. В этом контексте в нем объясняется взаимосвязь между технологиями гибкого и экологически чистого производства энергии на основе угля, природного газа и возобновляемых источников для повышения стабильности энергосистем, а также отмечается настоятельная необходимость улавливания и хранения углерода и улавливания, использования и хранения углерода (УХУ/УИХУ) в рамках этих усилий. В качестве примера можно привести масштабную разработку проектов работающих на угле электростанций, способных работать в условиях беспрецедентно низкой нагрузки и при резких скачках нагрузки, сохраняя при этом общие благоприятные экологические показатели. Благодаря этим усилиям, взаимодействие технологий, основывающихся на использовании угля и технологий, основывающихся на использовании переменных источников возобновляемой энергии (ПВИЭ), может способствовать достижению приемлемых эксплуатационных



характеристик, отвечающих стандартам сетей, при одновременном использовании технологии УХУ/УИХУ в качестве низкоуглеродного решения для взаимодействия с источниками ПВИЭ в сети. В документе также представлен анализ кривых затрат и рыночных факторов для обеспечения более полного понимания вопроса.

I. Справочная информация

1. Настоящий документ был подготовлен по просьбе Группы экспертов по экологически более чистым электроэнергетическим системам, высказанной на ее пятнадцатой сессии 5–6 ноября 2020 года, для обсуждения и внесения вклада в реализацию Проекта по обеспечению углеродной нейтральности (см. ECE/ENERGY/2019/7).
2. Он был сокращен для целей перевода. Полная версия под названием «Взаимодействие технологий для эффективной и гибкой работы энергосистем» доступна на веб-сайте и содержит полный перечень ссылок, таблиц и графиков.

II. Введение

3. Глобальная энергообеспеченность весьма дифференцирована и характеризуется различиями в масштабах использования энергии в развитых и развивающихся странах. В то время как многие более богатые страны нацелены на достижение к 2050 году чистой углеродной нейтральности, большинство населения мира в ближайшей перспективе пытается обеспечить доступ к стабильным, надежным, надежным и доступным по цене источникам электроэнергии в целях повышения качества жизни.
4. Рассматривая стратегические аспекты энергоснабжения, следует обратить внимание на следующие три вопроса: безопасность энергоснабжения, экономическую конкурентоспособность и экологические вопросы, в том числе связанные с изменением климата. Эта трилемма обусловлена необходимостью компромисса при выборе источников энергоснабжения, так как невозможно добиться максимальной эффективности по всем трем показателям одновременно. Многие страны Западной Европы, например, выступают на политическом уровне против использования угля и стремятся к закрытию угольных электростанций и их замене, в основном переменными возобновляемыми источниками энергии (ПВИЭ) периодического действия, а именно энергией солнца и ветра. На глобальном уровне такой подход сегодня является уникальным в своем роде, поскольку в других регионах, особенно в развивающихся странах, наблюдается тенденция к построению более разнообразного энергетического баланса, сочетающего электростанции, работающие на ПВИЭ и ископаемом топливе, причем последние, как правило, работают на угле, что обусловлено более низкими затратами на топливо и инфраструктуру, чем при использовании газа или биомассы. Уголь используется большинством развивающихся стран, так как он имеется в избытке, характеризуется низкой волатильностью цен, при этом существуют технические решения, обеспечивающие высокую эффективность его сжигание при низких уровнях обычных выбросов.
5. В настоящей записке рассматриваются технологические разработки и их взаимосвязь в контексте включения в энергосистему источников ПВИЭ периодического действия, а именно установок, работающих на энергии солнца и ветра, а также на таком традиционном ископаемом топливе, как уголь и природный газ. Несмотря на нулевое содержание углерода, солнечные и ветровые установки не являются наиболее подходящими решениями из-за периодичности их действия. Поэтому сегодня, чтобы стабилизировать сеть, используются электростанции, работающие на ископаемом топливе. По мере увеличения доли ПВИЭ в сети возникают весьма реальные риски того, что потребительский спрос не всегда может быть удовлетворен и что общие затраты на обеспечение функционирования системы будут намного выше, чем предполагалось ранее. К примеру, в качестве средства получения резервной мощности, столь необходимой для стабилизации сети было предложено накапливать энергию в аккумуляторных батареях, однако на практике такой способ в лучшем случае поможет сгладить скачки потребления и в настоящее время не способен компенсировать нехватку мощности, связанную с периодическим характером действия солнечных батарей и ветряков. Таким образом, не говоря уже о крайне высоких общих затратах, система не может обеспечить безопасную и стабильную работу без надежных резервных источников энергии.

6. Использование технологии улавливания и хранения/использования углерода (УХУ/УИХУ) в настоящее время сопряжено с высокими затратами в сравнении с ПВИЭ, для которых характерны низкие удельные затраты на основе полной приведенной стоимости электроэнергии (LCOE). Однако по мере увеличения доли источников ПВИЭ общие затраты в системе быстро возрастают до такой степени, что применение УХУ/УИХУ рассматривается как более привлекательная опция. Все больше исследований указывают на то, что сочетание угля с УХУ и ПВИЭ позволяет не только снизить общесистемные затраты, но и ПВИЭ не только приводит к снижению общих системных затрат, но и может соответствовать всем требованиям к системе, в отличие от использования исключительно ПВИЭ.

7. Настоящий документ разделен на следующие главы: продолжающееся развитие угольных электростанций с высоким КПД и низким уровнем выбросов (HELE) представляет собой надежный и стабильный подход к производству электроэнергии, раздел III. Однако, несмотря на то, что такой подход является в настоящее время одним из ключевых для улучшения показателей интенсивности выбросов CO₂ на угольных электростанциях, в долгосрочной перспективе его следует рассматривать как вариант с высоким уровнем выбросов углекислого газа. В настоящее время угольные станции (как HELE, так и менее эффективные альтернативы) используются для успешной стабилизации сетей и обеспечения контролируемой мощности, которая позволяет сглаживать периодичность ПВИЭ, как указано в разделе IV. При сочетании угольных установок с УХУ/УИХУ можно добиться практически нулевых выбросов углерода и стабильности сети при использовании ПВИЭ, раздел V. Помимо такой взаимосвязи технологий, существуют и другие возможные варианты сочетания угля с другими ископаемыми видами топлива с более низким и почти нулевым содержанием углерода, такими как газ, и некоторые возобновляемые источники энергии, включая комплексирование этих источников с угольными электростанциями, о чем говорится в разделах VI, VII и VIII. Вопрос о будущем таких разработок и взаимодействия технологий рассматривается в разделе IX.

III. Современные высокоэффективные технологии производства электроэнергии на основе угля с низким уровнем выбросов и перспективы в этой области

8. Запасы угля в мире обширны, он дешев, цена на него не колеблется, как на нефть и газ, и он может использоваться для производства электроэнергии, в промышленных применениях, например для производства цемента и стали, а также может перерабатываться в такие высокотехнологичные продукты, как топливо будущего и химические вещества высокой товарной ценности (WEC 2018). Уголь является вторым источником первичной энергии в мире — на его долю приходится около 30 процентов и он уступает здесь только нефти, но опережает газ — и основным топливом для производства электроэнергии (около 40 процентов). Однако уголь содержит много углерода, что вызывает обеспокоенность в связи с возможным вкладом в глобальное потепление.

9. Подавляющее большинство развивающихся стран сообщают, что они намерены и далее использовать уголь. С учетом этого целесообразно стимулировать их к внедрению высокоэффективных технологий производства энергии на основе угля, так как такие технологии требуют меньше угля на единицу произведенной энергии, что позволяет сократить выбросы CO₂. Эту задачу можно решить путем развертывания угольных электростанций HELE и со временем, когда рыночные условия станут благоприятными, применения технологии УХУ/УИХУ. Такой подход позволил бы сокращать выбросы двуокси углерода в будущем со значительно более низкими затратами в сравнении с альтернативными решениями, сохранив при этом преимущества использования угля.

10. Также можно пойти по пути введения еще более жестких требований к выбросам обычных загрязнителей, таких как твердые частицы (PM), SO_x и NO_x, поскольку они легко удаляются с помощью новейших технологий (Zhu 2016).

A. Обзор технологии

11. Угольная энергоустановка HELE включает в свой состав основные компоненты, которые используются во всех угольных системах, однако работает при более высоких сверхкритических (USC) температурах пара и более высоком давлении по сравнению с обычными установками. Образующийся в котле пар направляется в паровую турбину, состоящую из турбины высокого давления (ВД), турбины среднего давления (СД) и одной или нескольких турбин низкого давления (НП). Пар проходит последовательно из одной турбины в другую. Дальнейшее повышение кпд может быть достигнуто за счет промежуточного разогрева пара между турбинами НР и ИР. Этот промежуточный разогрев может производиться однократно и двукратно. Такая технология называется одиночным или двойным промежуточным перегревом пара, соответственно. Двукратный перегрев более эффективен, но требует больших капитальных затрат.

B. Коммерциализация угольных энергосистем HELE

12. Эта технология изначально появилась в Азии — сначала в Японии, а затем широко внедрялась в Китае, который в последующий период обеспечил ее внедрение в других частях региона. В Европе она также получила широкое распространение.

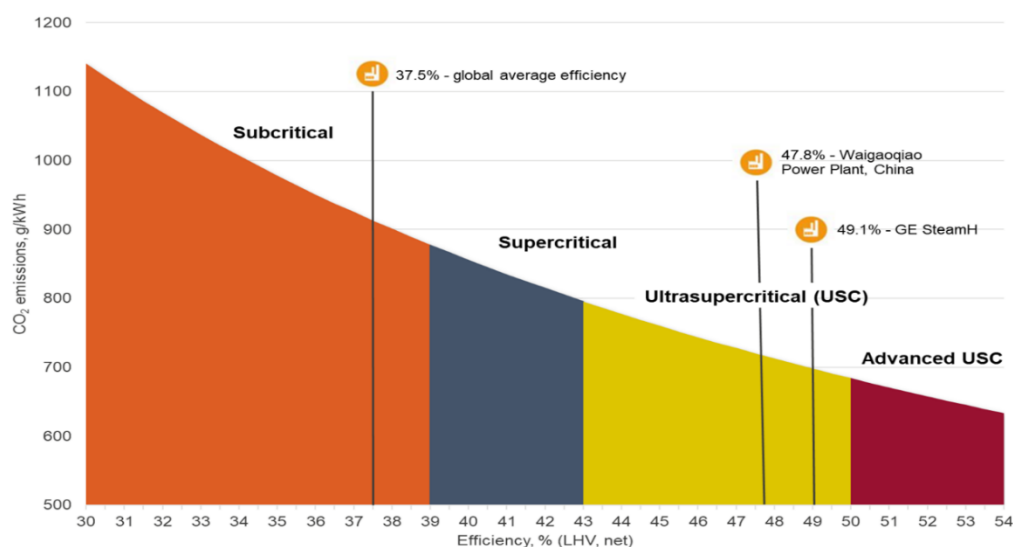
C. Снижение выбросов CO₂ за счет повышения кпд

13. Чем выше кпд угольной станции, тем меньше угля необходимо для выработки единицы электроэнергии, как показано на рисунке I. На рынке уже имеются технологии с кпд выше 49 процентов (чистый кпд, на основе НТС), однако разработки продолжают и в ближайшем будущем кпд должен приблизиться к 55 процентам.

Рис. I

Взаимосвязь между кпд угольных электростанций и выбросами CO₂

(Lockwood 2020)



D. Средства достижения благоприятных экологических показателей угольных электростанций

14. Улучшать экологические показатели заставляют законодательные требования о соблюдении норм выбросов. Наиболее строгие нормы введены в Китае, как показано в таблице 1. Угольные электростанции на востоке Китая должны были выполнить стандарты сверхнизких выбросов к 2017 году, а в центральной части страны —

к 2018 году, а угольным операторам на западе Китая рекомендовано обеспечить выполнение этих норм или хотя бы приблизиться к ним. Был предусмотрен ряд исключений в отношении установок для сжигания в циркулирующем кипящем слое, в которых используется низкосортное топливо и отходы, а также в отношении котлов нижнего горения, работающих на низколетучем угле. Эти установки могут не соответствовать стандартам сверхнизких выбросов, но должны соблюдать нормы выбросов, которые вступили в силу с 2012 года.

Таблица 1

Нормы выбросов угольных электростанций в Китае (Zhu 2016)

<i>Загрязнитель (мг/м³)</i>	<i>Стандарт с 2012 года</i>	<i>Стандарт сверхнизких выбросов</i>	<i>Стандарт для газовых электростанций</i>
ВЧ	20–30	10	—
SO ₂	50–200	35	30
NO _x	100–200	50	50

15. Для обычных загрязнителей (IEA 2014) применение соответствующих апробированных технологий для очистки дымовых газов может надежно и экономично удовлетворить все существующие требования. К таким технологиям относятся электростатические (ESP) или рукавные фильтры для удаления тонкодисперсных частиц, десульфурации дымовых газов (FGD) в целях снижения выбросов SO₂, а также модернизация процессов сжигания и/или систем каталитического восстановления для снижения уровня выбросов NO_x.

Е. Перспективные технологические разработки и демонстрационные проекты

16. С прицелом на будущее разрабатываются новые более высокотемпературные сплавы — исследования и разработки в этой области ведутся в Китае, Японии, Индии, Европе и США. Цель заключается в достижении температуры пара 700–760 °С, что означало бы, что угольные электростанции смогут выйти на чистый тепловой КПД на уровне 50–55 процентов, однако работы в этом направлении находятся на начальном этапе и первые демонстрационные проекты должны появиться между 2021 и 2025 годом.

17. Наряду с реализацией этих демонстрационных программ, имеющих целью подтверждение характеристик компонентов из никелевых сплавов для применения при температуре пара 700 °С, применяются альтернативные подходы, в частности компанией «Дженерал электрик» (GE). Предложенный GE подход опирается на серьезные успехи в разработке мартенситных сталей, которые позволяют современным USC-установкам выйти на температуры пара, близкие к 650 °С. Мартенситная сталь дешевле, чем никелевая, при этом сниженный КПД, обусловленный более низкой температурой пара, можно будет увеличить за счет выверенных конструктивных решений и интеграции компонентов. На основе этой технологии GE выводит на рынок перспективную USC-установку с параметрами пара 33 МПа/650 °С /670 °С, которые достигаются благодаря цифровой системе оптимизации управления. Расчетный КПД составляет 49,1 процента (чистый КПД, на основе НТС). В установке используются следующие конструкционные материалы: мартенситная сталь для большинства компонентов и сплавы с высоким содержанием никеля для таких критических элементов, как паровые трубы и впуск паровой турбины. Эта технология была запущена в октябре 2017 года, и в настоящее время на ее основе реализуются проекты по строительству современных угольных электростанций в Турции и Китае (GE 2018).

18. Третьим направлением этой глобальной программы НИОКР является определение и реализация общих конструктивных изменений электростанций путем внедрения отдельных оптимизированных компонентов и их более тесной интеграции. Продолжается работа по разработке и демонстрации передовой USC-технологии,

включающей все улучшения, внедренные на блоках ТЭЦ Вайгаоцяо № 3, каждый из которых имеет мощность 1000 МВтэ, вместе с дополнительными инновационными компонентами (Feng 2015; Minchener 2020). Более подробная информация приведена в полном тексте настоящей статьи.

19. Расчетный КПД, который должен быть достигнут при использовании этой технологии после ее освоения в эксплуатации в конце 2020 года, превышает 50 процентов (Minchener 2020). Если адаптация последующих проектов позволит достичь суперсверхкритических температур пара в 700 °С, то возможно достижение кпд более 54 процентов (чистый кпд, на основе НТС).

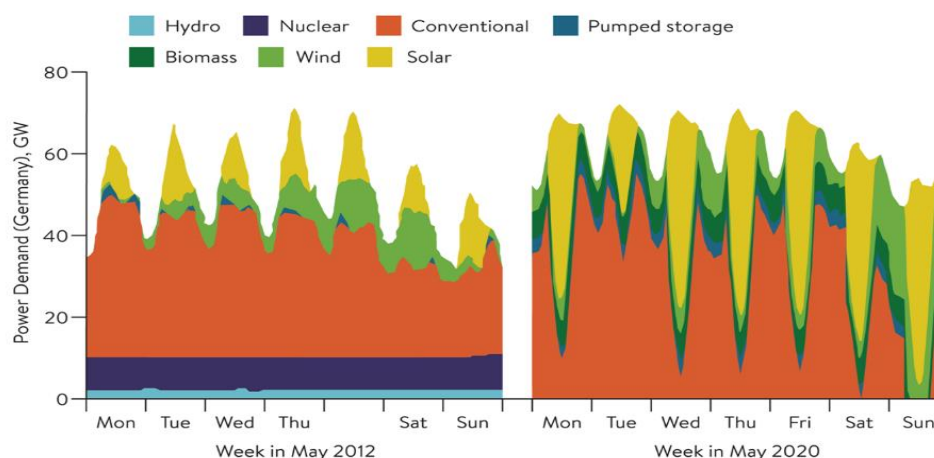
IV. Гибкое функционирование высокоэффективных угольных электростанций для обеспечения достаточной стабильности электросети в условиях, когда энергосистема включает возобновляемые энергоисточники

20. По мере роста доли в электроэнергетических сетях переменных возобновляемых источников энергии (ПВИЭ) периодического действия, таких как солнечные панели и ветряки, стабильность системы снижается, рисунок II. Для преодоления этой проблемы необходимо, чтобы установки на ископаемом топливе чаще работали в циклических режимах по сравнению с режимами базовой нагрузки, для которых большинство из них было спроектировано.

21. Гибкий режим функционирования угольных электростанций, наряду с управлением сетью и потреблением, приобретает все большее значение для подключения к сети источников периодического действия для обеспечения требуемой стабильности системы (Henderson, 2014; Sloss, 2016). В отсутствие альтернативных решений, которые еще требуют доводки, таких как накопление энергии в батареях в промышленных масштабах, такое использование угля (или другого ископаемого топлива) в качестве источника энергии имеет важное значение. Угольные установки используются в настоящее время для обеспечения быстрого запуска, работы в режиме очень низкой нагрузки, высокой скорости линейного изменения нагрузки и циклов включения/выключения. Такая эксплуатация в нерасчетных режимах увеличивает износ компонентов, что приводит к возникновению новых проблем. Таким образом, в контексте перспектив введения новых ПВИЭ периодического действия, по-прежнему необходимы новые стратегии и эффективные системы управления для снижения и/или устранения высокой вероятности выхода из строя оборудования и, как следствие, сокращения срока службы установок, критического риска технологической безопасности и увеличения затрат (Hilleman 2018).

Рис. II
**Расчетный спрос на электроэнергию в Германии в мае 2012 года
и в мае 2020 года**

(Morris and others 2012)



22. К числу проблем относится термическая и механическая усталость материалов, а также коррозия и относительное расширение, часто возникающие в сочетании, что может сократить срок службы некоторых компонентов (Daury 2018; Henderson 2014). Также наблюдается негативный эффект для производительности угольных электростанций. Например, снижение нагрузки приводит к соответствующему снижению тепловой мощности, что в сочетании с более высоким расходом энергии на собственные нужды приводит к увеличению удельных выбросов CO₂.

23. Для существующих станций существует несколько способов повышения степени гибкости производственных режимов (Henderson 2016). К ним относятся: модернизация новых технических решений за счет модификации существующих или принятия новых операционных процедур, организации обучения для повышения осведомленности как эксплуатационного персонала, так и руководящих кадров. Таким образом, определяются различные циклические режимы установок, работающих на ископаемом топливе, и стратегии управления негативными воздействиями. Возможные решения включают разработку новых методов работы, использование передовых материалов и внедрение усовершенствованных систем управления. Такие меры могут улучшить показатели тепловой мощности и сократить количество вынужденных отключений на существующих станциях, работающих на ископаемом топливе (Henderson C 2014, Wiatros-Motyka M 2019). В данном разделе рассматриваются различные энергоустановки, требующие определенной модернизации, и уделяется особое внимание стратегическому подходу к оптимизации работы угольных электростанций для обеспечения требуемой стабильности сети с соответствующими энергетическими показателями на основе использования угля. Его дополняет следующий раздел, в котором рассматривается вопрос о том, каким образом интеграция значительных объемов контролируемой мощности на основе угля (или газа) в сочетании с УХУ/УИХУ для достижения очень низких показателей выбросов углекислого газа может выступать в качестве экономически эффективного и рационального с точки зрения эксплуатации подхода для поддержания гибкости при дальнейшем снижении выбросов CO₂.

A. Контрольно-измерительное оборудование и системы управления

24. Оптимизация контрольно-измерительного оборудования и систем управления открывает наиболее экономичный путь к повышению гибкости в работе установки и служит основой для принятия других мер. Такие современные системы управления жизненно важны для обеспечения гибкости функционирования электростанций

(Lockwood 2015), поскольку они позволяют работать в условиях переменной нагрузки и обеспечивают стабильную работу путем регулирования всех соответствующих переменных. Это повышает точность, надежность и скорость изменений. На многих установках модернизация контрольного оборудования и системы управления сочетается с инженерной доводкой установок, например с модернизацией котлоагрегата, горелок, турбины или других компонентов (Agora Energiewende 2017).

В. Решения для обеспечения гибкости

25. Эксплуатация с низкой минимальной нагрузкой ограничивает количество требуемых выключений, что уменьшает отрицательные последствия в плане сокращения срока службы различных компонентов установки. Обеспечить низкую минимальную нагрузку можно несколькими способами, при этом ключевым фактором моментом является стабильность процесса горения, которая достигается за счет эффективного управления котлоагрегатом, системой подачи топлива и системой сжигания (Hamel и Nachtigall, 2013 год).

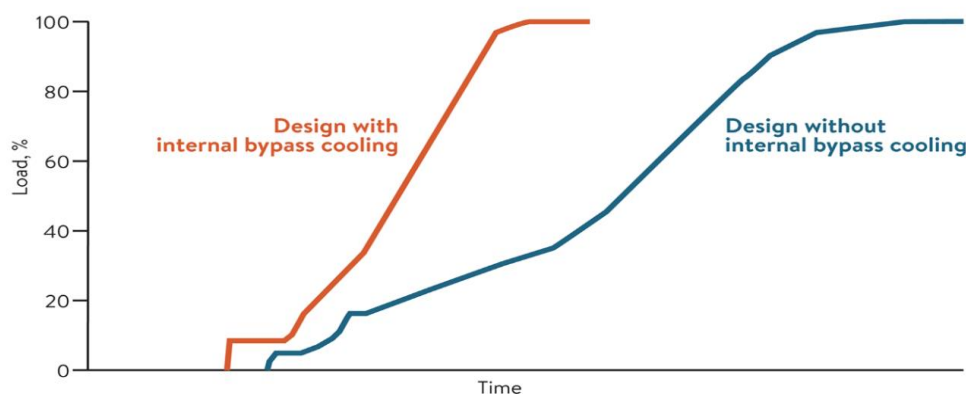
26. Такие меры включают в себя обеспечение стабильного качества угля и тонкой дисперсности частиц, работу в режиме ограничения подачи воздуха, использование оборудования для мониторинга пламени, систем управления расходом топлива/воздуха, поворотных горелок, дополнительного топлива, снижение количества мельниц и только верхних горелок, установку малогабаритных мельниц, накопление тепловой энергии для нагрева подаваемой воды, использование трубчатых вертикальных испарителей, а также работу в режиме скользящего давления и модификации экономайзера (IEA 2018).

27. Процедуры запуска сложны и дорогостоящи, так как они обычно требуют дополнительного топлива на стадии зажигания горелок. Следовательно, их следует по возможности избегать, а если это невозможно, то следует сокращать время пуска одновременно с быстрым повышением мощности. Такие изменения могут быть достигнуты за счет надежной системы зажигания, интеграции газовой турбины, уменьшения толщины толстостенных элементов котла, таких как коллекторы паропроводов, использования большего количества коллекторов, внешнего нагрева толстостенных элементов котла, а также за счет очистки отложений в котле (Martino 2013). Для паровой турбины могут быть использованы усовершенствованные уплотнения, трубопроводы сброса пара из турбины (НР или LP) и внутреннее охлаждение корпуса турбины.

Рис. III

Скорость набора мощности при наличии системы внутреннего байпасного охлаждения и при ее отсутствии

(Chittora 2018)



28. Разработчики новых установок могут уже на ранней стадии включить в проект требования в отношении гибкости. Например, было доказано, что использование новых материалов с улучшенными свойствами для толстостенных элементов высокого давления, таких как коллекторы, либо выбор конструкции на основе более короткого срока службы при базовой нагрузке снижает интенсивность сокращения срока службы при быстрой цикличности. Проектирование установки для работы в режиме скользящего давления также является эффективной мерой. Кроме того, установки с системой дросселирования конденсата могут значительно улучшить свои характеристики первичного регулирования частоты. Другие конструктивные решения включают в себя паровое охлаждение внутреннего корпуса турбины, а также трубопроводы сброса пара из турбин НР и нагревателей подаваемой воды и накопление тепловой энергии для нагрева подаваемой воды.

С. Системы снижения загрязнения

29. Эффективность ряда систем сокращения уровня выбросов может падать в нерасчетных условиях, возникающих в режиме гибкого функционирования электростанций, так как температура дымовых газов может меняться с изменением режима цикличности. Так, применение электрофильтров или тканевых фильтров для удаления взвешенных частиц позволяет подстроиться к быстрому изменению нагрузки при условии, что температура не опускается ниже точки росы (~90 °С). В последнем случае любая влага может привести к накоплению пыли, которая с трудом поддается удалению (EPRI 2013). Эту проблему можно решить, установив систему предварительного подогрева фильтров во время подготовки установки к переходу в режим нагрузки. Здесь важно поддерживать температуру на требуемом уровне, что является необходимым условием для обеспечения эффективного сокращения выбросов NO_x (Zmuda R 2019; Boyle, Stamatakis and de Navilland 2015). В системах, использующих технологию селективного каталитического восстановления (SCR), на входе SCR устанавливаются дополнительные нагреватели дымовых газов.

30. При удалении SO₂ с десульфурацией дымовых газов необходимо минимизировать количество остановок и пусков, чтобы избежать затвердевания шлама и накопления остатков пускового топлива на футеровке. Во время непродолжительных остановок FGD-устройство находится, как правило, в резервном режиме. Это позволяет избежать образования твердых отложений и обеспечивает готовность FGD-установки к быстрому запуску. Для работы в циклическом режиме система управления должна быть совершенной, с тем чтобы учитывать вышеперечисленные условия, чем для сокращения выбросов NO_x и ТМ.

Д. Гибкое управление воздействием

31. Очень часто сбои при работе под нагрузкой происходят из-за предотвратимых повреждений, возникающими в периоды отсутствия нагрузки (Caravaagio 2014). Риски для установок циклического типа выше, так как частые запуски/остановки и периоды ожидания нарушают физические и химические условия в водяном/паровом контуре, приводя к коррозии и другим повреждениям в режиме ожидания. В результате ущерб может быть катастрофическим; поэтому необходима надлежащая консервация всех пароводяных контуров (McCann 2018).

32. Выбор наиболее подходящей технологии зависит от условий на конкретном объекте, при оценке которых следует учитывать характеристики всей установки (EPRI 2014). «Мокрое» хранение систем водоснабжения и часто котла считается наиболее практичным подходом для установок циклического типа, для которых важны корректировка рН и удаление кислорода. Этот процесс включает в себя полную деаэрацию конденсата и подаваемой воды и предотвращение попадания воздуха в котел и пароперегреватель.

33. Оптимальным способом сохранения подогревателя и паровой турбины является сухое хранение. Остаточное тепло турбины обычно может поддерживать «сухие» условия в течение 24–36 часов, но как только относительная влажность либо превысит 40 процентов, либо будет равна температуре «точки росы», из-за конденсации и присутствия кислорода начнется процесс коррозии. Вторичные пароперегреватели с принудительным охлаждением требуют немедленной продувки с целью удаления водяных паров, так как иначе удалить насыщенный кислородом воздух невозможно. «Сухие» пароподогреватели, как и турбина, при охлаждении подвержены конденсации и аэрации.

Е. Замечания относительно будущей работы

34. Включение ПВИЭ периодического действия в электроэнергетические сети способствует производству электроэнергии при нулевых выбросах диоксида углерода, однако для обеспечения надлежащей устойчивости сети эта мера должна быть подкреплена использованием других источников. В большинстве случаев это обеспечивается за счет угольных электростанций, которые в настоящее время могут работать в циклическом режиме, быстрее выходить на повышенные нагрузки, работать под очень низкой нагрузкой и в режиме пуска-остановки (Reischke 2012). По мере увеличения доли ПВИЭ в сети такая потребность в контролируемой мощности, получаемой на угольных (и газовых) установках, будет становиться все более острой (Kumar and Hillemann 2018), и, по всей видимости, возникнет необходимость в новых стратегиях и эффективных системах управления для реализации такого операционного подхода (VGB, 2018). В то же время угольные (и газовые) электростанции производят значительные объемы выбросов CO₂. В процессе перехода к углеродно нейтральным системам эта проблема может быть решена за счет внедрения УХУ/УИХУ на электростанциях, работающих на ископаемом топливе. Эффект от внедрения этих технологий рассматривается в следующем разделе.

V. Роль УХУ/УИХУ в обеспечении конкурентоспособных выбросов CO₂ при сохранении гибкости эксплуатационных режимов и требуемой стабильности энергосистемы при наличии в энергобалансе переменных источники возобновляемой энергии периодического действия

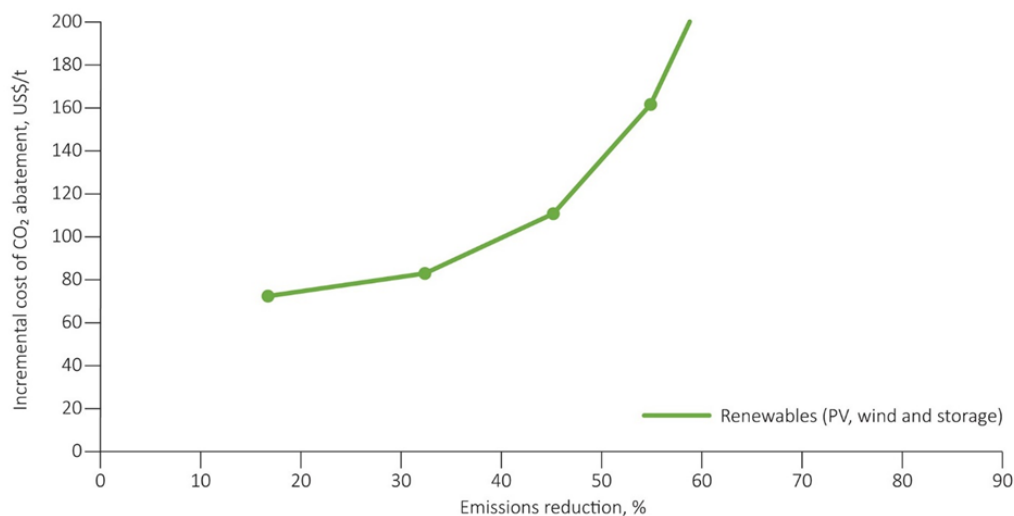
A. Ограничения электроэнергетических сетей, включающих только переменные возобновляемые источники энергии

35. Выбор оптимальной схемы энергосистемы для обеспечения ее работоспособности и надежности, а также достижения цели чистой углеродной нейтральности является непростой задачей. Бесперебойная поставка электроэнергии потребителям в течение всего года требует от оператора системы мгновенного согласования потребления и производства энергии при сохранении частоты сети, напряжения и достаточной резервной мощности. В современных энергосистемах эти задачи в основном решаются с помощью угольных (или газовых) теплоэлектростанций, которые позволяют оперативно реагировать на неожиданные изменения как потребления, так и производства энергии, а также в силу своей природы выдерживают отклонения частоты сети благодаря инерционной составляющей. Системы на основе ПВИЭ, напротив, хоть и позволяют получать электроэнергию с нулевым вводом диоксида углерода в сеть, имеют периодический характер, что без использования контролируемой мощности станций, работающих на ископаемом топливе, создает нестабильность в энергосистеме. Эта проблема нарастает по мере увеличения доли ПВИЭ, рис. IV.

Рис. IV

Анализ для Национального рынка электроэнергии Австралии

(Boston and others 2018)



36. Таким образом, хотя, по мнению многих авторов, декарбонизация национальных и региональных энергосистем может быть достигнута практически полностью за счет производства электроэнергии на базе периодически действующих ПВИЭ, такая стратегия не только не обеспечит необходимую стабильность, но потребует больших затрат.

37. Вместе с тем угольные электростанции действительно имеют высокий уровень выбросов CO₂, и эта проблема также должна решаться. Технически проверенным вариантом ее решения является применение технологии УХУ/УИХУ, ключевые компоненты которой уже были апробированы в коммерческих применениях. Удельные затраты в таких системах выше, чем в системах на основе энергии ветра и солнца, которые позволяют обеспечить первоначальное снижение выбросов CO₂ в системах производства электроэнергии при наименьших затратах. Однако для разработки реалистичных стратегий продвижения к заданной цели стратегии достижения чистой углеродной нейтральности в электроэнергетических сетях должны учитывать общую стоимость системы. Как отмечается ниже, для более высокой степени декарбонизации сети потребуются гибкое производство электроэнергии на базе низкоуглеродного топлива, например, при помощи электростанций, работающих на ископаемом топливе, оборудованных УХУ.

В. Важность анализа общесистемных затрат

38. Хотя в большинстве регионов теплоэлектростанции, оснащенные УХУ, имеют более высокую нормированную стоимость электроэнергии, в сравнении с ветровыми и солнечными системами, с ростом доли возобновляемых источников в сети важность гибкого низкоуглеродного производства электроэнергии возрастает. При определенном уровне декарбонизации становится выгоднее предотвратить выброс следующей тонны CO₂ на установке, оборудованной УХУ/УИХУ, чем вводить дополнительные ветровые или солнечные мощности.

Рис. V
Периоды неудовлетворенного спроса при использовании только ВИЭ и накопителей энергии

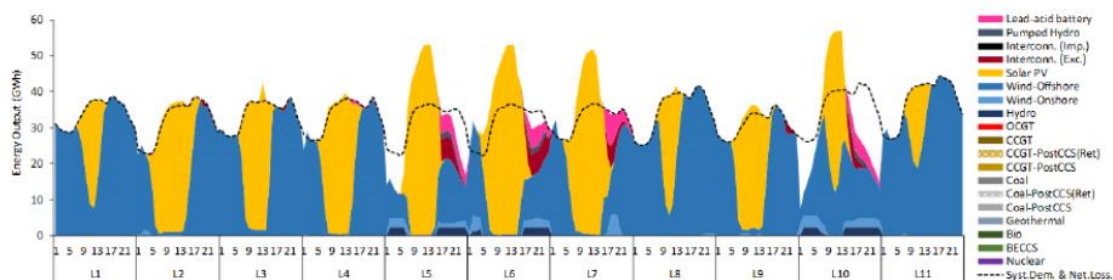
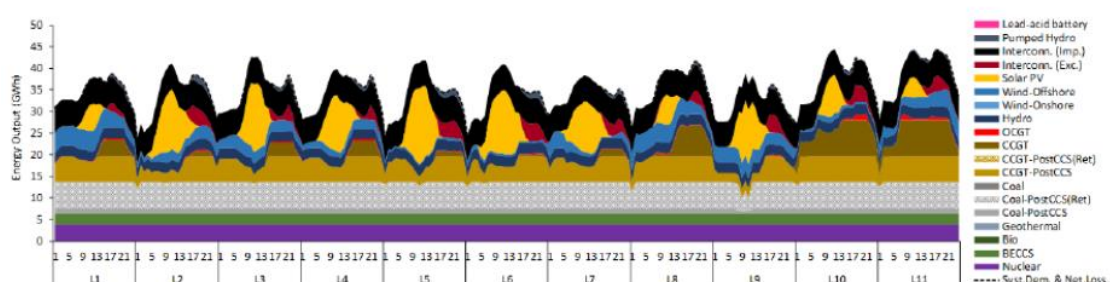


Рис. VI
Наиболее выгодный с финансовой точки зрения энергобаланс на базе всех доступных технологий



С. Наименее затратная структура энергобаланса на базе всех доступных технологий

39. Прогнозируемый энергобаланс с чистыми нулевыми выбросами для Польши в 2050 году, демонстрирующий 11 репрезентативных дней в течение года (Pratama and Mac Dowell 2019) (рис. V и VI).

40. Этот эффект можно увидеть в двух сценариях для Польши, как показано на рис. 10. Верхняя кривая подачи энергии показывает декарбонизированную сеть, в которой используются только возобновляемые источники энергии и аккумуляторные батареи в течение 11 дней, и представляет различные типовые колебания погоды и спроса в течение года. Это показывает, что роль аккумуляторов ограничена необходимостью периодического генерирования избыточной мощности (во время которого аккумуляторы могут заряжаться). Отмечается несколько периодов неудовлетворенного спроса (отключения электричества) и значительного сокращения поставок (неиспользованные генерирующие мощности).

41. Другая кривая показывает наименее затратное достижение чистых нулевых выбросов с использованием всех доступных технологий, включая угольные и газовые электростанции, оснащенные УХУ/УИХУ, и атомные станции. В связи с относительной негибкостью АЭС, тепловые станции, оборудованные УХУ, широко используются для балансировки сети. Такая структура электроснабжения не только обеспечивает необходимую стабильность и гибкость, но при этом ее общая стоимость составляет лишь около 30 процентов от стоимости сети на базе только ВИЭ и накопителей энергии.

42. Таким образом, для обеспечения эффективности и безопасности эксплуатации энергосистем, включающих ПВИЭ, необходимы тепловые электростанции, работающие на ископаемом топливе, причем в большинстве географических зон, угольные станции будут дешевле газовых. Оснащение угольных электростанций системами УХУ/УИХУ способствует резкому сокращению уровня выбросов углерода (Budinas and others 2018). При отсутствии таких тепловых электростанций, создающих

запас мощности, по мере увеличения мощности источников ПВИЭ общие системные затраты значительно вырастут, и во многих случаях будет поставлена под угрозу способность удовлетворить спрос при полной нагрузке.

VI. Интеграция возобновляемых источников энергии и угля на отдельных электростанциях

43. В предыдущих разделах уже говорилось о том, что ПВИЭ оказывает значительное и сложное воздействие на установленную мощность сети. Периодический характер солнечной и ветровой энергии приводит к значительной нестабильности в сети, которая будет возрастать по мере добавления в сеть мощностей на этих двух технологиях. Как уже отмечалось, крайне важно, чтобы в системе имелась контролируемая мощность для обеспечения ее необходимой стабильности, которая в настоящее время обеспечивается за счет энергосистемами, работающими на круглосуточной основе на ископаемом топливе, в основном на угле, что определяется его традиционной доступностью в сравнении, скажем, с газом.

44. Тем не менее, учитывая, что на территории энергообъекта могут быть установлены системы различных типов, возможно целесообразно физически интегрировать солнечные технологии в работу угольной электростанции. Жизнеспособность любых таких гибридных вариантов (солнечной энергии и угля) будет зависеть от сочетания экономических, экологических и политических соображений, которые необходимо оценивать индивидуально, так как инженерные схемы будут выбираться исходя из условий конкретной площадки (Mills 2017). Основными областями применения солнечной технологии являются предварительный нагрев подаваемой в котел воды, дополнительный нагрев воды после верхнего подогревателя, а также производство либо пара промежуточного перегрева (ПД), либо острого пара (Sirois 2014; Roos 2015).

A. Угольно-солнечные гибридные электростанции

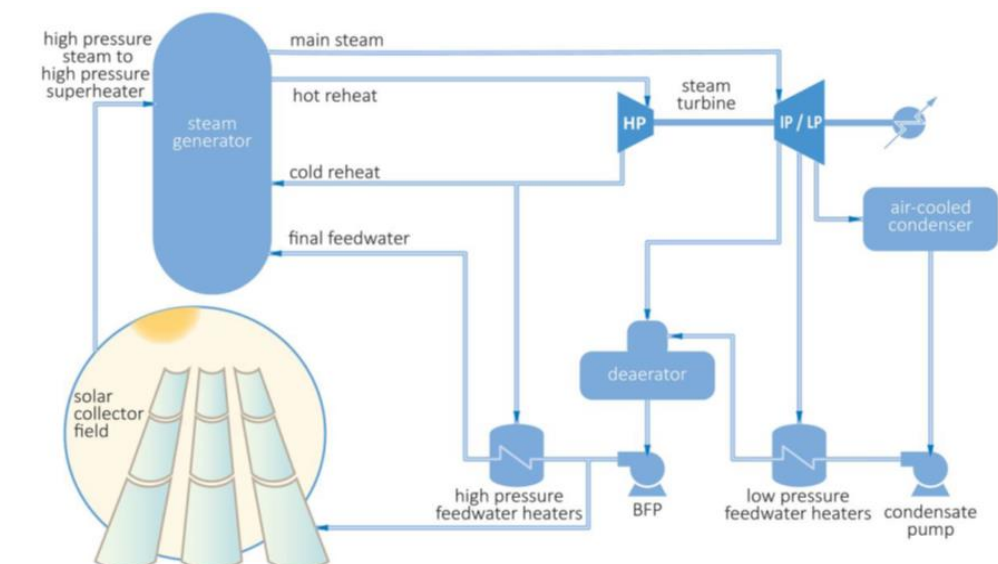
45. Из двух имеющихся в настоящее время гелиотехнологий концентрация солнечной энергии (CSP) является в принципе жизнеспособным решением, тогда как создание гибридных схем с использованием фотоэлектрических систем невозможно. В системах CSP электричество вырабатывается непосредственно из солнечного света с помощью зеркал и линз для сбора и фокусировки солнечного излучения в концентрированный луч, который может быть использован в качестве источника тепла на обычной ТЭЦ. Применительно к нашей задаче этот гибридный метод основан на физической увязке угольной электростанции с солнечной энергосистемой, в которой эти источники энергии используются для создания отдельных, но параллельных паровых контуров. На более позднем этапе эти контуры объединяются и пар из них подается в паровую турбину и выработки электроэнергии из двух источников энергии. Это позволяет снизить количество пара, выходящего из турбины, что может повысить эффективность цикла и снизить потребности в угле и/или увеличить выработку электроэнергии. С повышением эффективности цикла это способствует снижению удельных выбросов CO₂.

46. Основным преимуществом систем CSP является то, что в них может использоваться технология накопления тепловой энергии, и таким образом избыточное тепло, накапливаемое днем, может быть рекуперировано позже (ночью) и использовано для разведения пара. Хотя такая система и не является в полном смысле контролируемой, поскольку рекуперация накопленного тепла еще не гарантирует 24-часовую работу, в ней создается более значительный резерв, что позволяет сглаживать колебания выходной мощности сети. Чтобы быть экономически жизнеспособными, установки CSP должны применяться в промышленном масштабе, а в настоящее время в глобальном масштабе на них приходится лишь малая часть от энергии, производимой фотоэлектрическими системами. Их обособленное использование требует сопутствующей инфраструктуры, такой как паровые турбины

и подключение к сетям, что может быть слишком затратно, учитывая объемы производимой в результате энергии. Однако при внедрении на уже существующих угольных станциях большая часть этой инфраструктуры уже имеется, что значительно снижает инвестиционные затраты. Таким образом, интеграция солнечной технологии будет менее затратна, чем эквивалентная автономная установка CSP. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) угольно-солнечного гибрида будет ниже, чем у отдельной установки CSP, причем по некоторым оценкам она может конкурировать с аналогичными показателями фотоэлектрических систем (Siros 2014). Однако недавнее снижение стоимости таких систем вполне может означать, что они теперь получили конкурентное финансовое преимущество, хотя и не обладают преимуществами контроля. Во время работы в дневное время CSP может использоваться для снижения потребления угля (режим экономии угля). По мере падения интенсивности солнечной радиации во второй половине дня количество угля может быть увеличено, что позволит котлу станции всегда работать при полной нагрузке. В качестве альтернативы энергия, получаемая от поля солнечных панелей, может использоваться для производства дополнительного пара, который затем подается в паровую турбину, увеличивая выход электроэнергии (режим солнечного «прироста»). Так как обе опции зависят от наличия солнечного света, то мощность гибридной системы, работающей в режиме солнечного прироста, может быть такой же переменной, как и у фотоэлектрических систем. Однако в режиме экономии угля выработка мощности может быть контролируемой. Таким образом, регулятор системы может рассчитывать на то, что необходимая мощность будет в наличии. Независимо от рабочего режима, для эффективного функционирования гибридной станции решающее значение имеет проектное решение и интеграция поля солнечных панелей в обычную систему. В принципе, такая гибридная технология может быть реализована на любой обычной тепловой электростанции (на угле, газе, мазуте или биомассе), как уже действующей, так и новой, рис. VII.

Рис. VII

Генерация пара высокого давления с использованием солнечной энергии



В. Перспективы угольно-солнечных гибридов

47. К основным преимуществам использования угольно-солнечных гибридов (EPRI 2010b; Rajpaul 2014; Roos 2015; Appleyard 2015; IT Power 2012) относятся:

- дополнительные тепло, получаемое за счет солнечной энергии, позволяет снизить потребление угля, сократить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу и расходы на топливо в расчете на один МВт.ч произведенной энергии;

- гибридизация сокращает количество операций с углем и золой, снижая нагрузку на такие компоненты, как тканевые фильтры, измельчающие мельницы и дробилки золы;
- срок эксплуатации существующих тепловых электростанций может быть продлен, например в тех случаях, когда изменения в законодательстве требуют сокращения выбросов на угольных электростанциях или их закрытия;
- более высокие первоначальные инвестиции компенсируются либо сокращением потребления ископаемого топлива, либо увеличением выработки электроэнергии;
- возможность поставки в электрическую сеть как базовой, так и практически пиковой контролируемой мощности;
- комбинированная технология может помочь в достижении портфельных стандартов по возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) и целей по сокращению выбросов CO₂ при более низких капитальных затратах, чем при развертывании автономных солнечных электростанций. Капиталовложения снижаются при той же производительности;
- сроки разработки проектов, расходы на передачу и соединение могут быть со временем снижены благодаря процессу практического обучения;
- аналогичным образом, продолжающаяся доводка технологий будет способствовать дальнейшему сокращению расходов на элементы CSP.

48. Однако эти потенциальные преимущества не были реализованы на практике. Было подготовлено множество технико-экономических исследований и определены различные варианты разработки компонентов для усовершенствования гибридных угольно-солнечных энергосистем. Среди проявивших интерес к этим разработкам стран следует отметить США, Австралию, Чили, Македонию, Южную Африку, Китай, Индию и Зимбабве (Mills 2017). Вместе с тем за прошедший период было построено лишь несколько установок. За последнее десятилетие в США было разработано несколько угольно-солнечных гибридов, первым из которых стал демонстрационный проект «Камео», в нем солнечная энергия успешно используется для подогрева подаваемой в котел воды, что позволяет снизить потребление угля и выбросы, однако к более масштабному внедрению технологии это не привело.

49. Первая в мире демонстрационная угольно-солнечная гибридная электростанция «Камео» в рамках Проекта комплексного использования солнечной энергии в Колорадо, США, была создана в рамках государственной программы содействия освоению инновационных чистых технологий. Проект имел целью тестирование перспективных новых технологий, позволяющих сократить выбросы парниковых газов и получить другие выгоды в области охраны окружающей среды. Угольная электростанция «Камео» состояла из двух угольных энергоблоков мощностью 49 МВт_э. Ее солнечный компонент представлял собой группу параболических концентраторов с системой слежения за Солнцем, мощностью 2 МВт_э, дополнявшую с помощью применения соответствующих технологий угольный компонент, рис. 12. На территории площадью 2,6 га в восемь рядов были установлены 150-метровые параболические концентраторы. Выработанное тепло поступало в теплообменник, где оно использовалось для предварительного подогрева воды, подаваемой на второй энергоблок установки «Камео» (Mills 2011).

50. В 2010 году была реализована семи месячная экспериментальная/демонстрационная программа, после чего станция и CSP-установка были выведены из эксплуатации. Тестирование гибридной системы подтвердило, что использование дополнительных технологий такого типа на существующем котлоагрегате, работающем на ископаемом топливе, является технически осуществимо и не оказывает негативного влияния на обычный процесс производства электроэнергии. Добавление компонента солнечной энергии повысило общую эффективность установки примерно на 1 процент, при этом за время проведения испытаний было достигнуто сокращение потребления угля и выбросов в атмосферу (~600 т CO₂, >900 кг NO_x, и 2450 кг SO₂). Коэффициент использования установки

составил 98,4 процента. Единственным недостатком стала мощность, необходимая для работы системы CSP, которая составляла ~0,4 процента от эквивалентной мощности в кВт.ч.

51. Интеграция и эксплуатация CSP-системы на действующей угольной станции была признана успешной; однако ситуация с затратами и эффективностью была менее ясной. При затратах в 4,5 млн долл США гибридная установка произвела эквивалент 1 МВт солнечной энергии от общей мощности 49 МВт. Как следствие, оператор станции не смог дать окончательных рекомендаций относительно дальнейшего применения этой технологии ни на одной из других его электростанций (Public Service Company of Colorado, 2011). О каких-либо планах по созданию новых гибридных угольно-солнечных установок в ближайшем будущем объявлено не было.

С. Будущие возможности

52. Несмотря на многочисленные проведенные исследования, данных о полностью успешном применении гибридной угольно-солнечной схемы на практике, по сути, не имеется. Таким образом, хотя эта схема технически реализуема, ее экономическая рентабельность не очевидна. Отчасти это связано с ограничениями, обусловленными потребностью в определенном уровне солнечной радиации, что делает данную технологию применимой лишь в некоторых регионах. Кроме того, в местах строительства таких установок должны иметься доступ к поставкам угля и угольная электростанция, подходящая для переоборудования. С учетом этих факторов эта технология может иметь лишь нишевое применение при наличии соответствующих условий и потребности в электроэнергии на местном уровне. Таким образом, ее широкое распространение представляется маловероятным.

VII. Совместное сжигание угля и газа на отдельных электростанциях

53. В данном контексте под совместным сжиганием подразумевается обычное использование газа в качестве вторичного топлива, а не просто использование небольших количеств газа для пуска и разогрева котла. Рыночные стимулы для перехода к этой альтернативной технологии весьма разнообразны, хотя отчасти обусловлены экологическими соображениями. Совместное сжигание газа и угля на угольных электростанциях позволяет сократить выбросы, повысить эксплуатационную гибкость и обеспечить более быстрый и чистый запуск, таблица 2.

Таблица 2

Возможные аргументы в пользу совместного сжигания угля и природного газа на электростанциях (Mills 2017)

Предотвращение выбросов CO₂ в результате сжигания угля

Сокращение выбросов SO₂, NO_x и твердых частиц

Создание механизма производства и продажи рентабельной электроэнергии с контролируемым производством

Позитивное отношение со стороны общественности

Экономическая поддержка сектора поставок угля и обеспечение занятости

Возможно, наименее затратный способ повышения топливной гибкости для угольных электростанций

Потенциальное финансовое преимущество на конкурентных рынках благодаря разнообразию видов топлива

Предотвращение выбросов CO₂ в результате сжигания угля

Содействует получению компаниями квот за ранние добровольные меры по снижению выбросов парниковых газов

А. Рыночные стимулы

54. Экологические преимущества достигаются за счет одновременной замены части угольного сырья газом, что равносильно снижению выбросов и является важным аспектом в соблюдении природоохранного законодательства. В то же время это позволяет снизить нагрузку на системы управления; например, снижается объем потребления ДДГ-реагентов, увеличивается срок службы катализатора SCR, а системы улавливания твердых частиц требуют менее частой очистки. Замена 35 процентов подаваемого угля газом с использованием специальной системы совместного сжигания может сократить выбросы SO₂/SO₃ до 35 процентов, NO_x — на 45 процентов, твердых частиц — на 35 процентов, ртути — на 35 процентов и CO₂ — на 20 процентов (Green Energy Solutions 2014). Это позволяет снизить затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание этих систем борьбы с загрязнением окружающей среды. Может также поддерживаться стабильная работа при низкой нагрузке, которая легко достигается на электростанциях, работающих только на угле (раздел 2). Хотя в настоящее время станции работают с фиксированным соотношением угля и газа, системы могут быть запроектированы таким образом, чтобы это соотношение было изменено и была обеспечена определенная гибкость в поставках топлива.

55. Совместное сжигание может также способствовать сокращению других затрат за счет перехода на источники более дешевого угля. Например, в США электростанция может перейти с битуминозного угля более высокого сорта на суббитуминозный, при этом сжигая газ для поддержания мощности электростанции. В то же время даже незначительное изменение соотношения цен на уголь и газ может привести к значительным колебаниям затрат на производство, а это может открыть рыночные возможности для станций, работающих как на газе, так и на угле. Не менее важно и то, что внедрение газа на угольных электростанциях дает им возможность оперативно реагировать на изменение нагрузки и работать в условиях многочисленных циклов (Cassell 2016). Электростанция, способная оперативно работать в циклическом режиме в соответствии с подъемами и спадами потребления, с большей вероятностью будет рентабельна, даже несмотря на то, что для модернизации угольной электростанции могут потребоваться значительные модификации оборудования (см. ниже).

56. С точки зрения затрат на совместное сжигание топлива в сравнении с выгодой, ключевым требованием является наличие у угольной электростанции источника поставок достаточных объемов природного газа по приемлемой цене. Если на станции уже используется газ для разогрева, то существующая инфраструктура может быть достаточной. В противном случае могут потребоваться дополнительные поставки топлива и системы управления. Одним из главных преимуществ совместного сжигания, о котором часто пишут, является низкая цена природного газа. Хотя в настоящий момент в США это действительно так, в других странах газ стоит дороже и менее доступен. Даже в США высказываются опасения относительно того, что цены на газ в будущем могут значительно вырасти, поскольку политические и экологические проблемы, связанные с технологией гидравлического разрыва пласта, и инвестиции в экспорт газа могут привести к росту цен на природный газ (R-V Industries, 2016).

В. Проблемы, связанные с развитием технологии

57. Для строительства модернизированной установки для совместного сжигания необходимо решить ряд технических проблем, в том числе внести изменения в системы управления и оборудование угольных электростанций. Соответствующие

затраты должны быть сбалансированы по отношению к преимуществам гибкости, как было отмечено выше. Таким образом:

- характеристики сжигания и теплопередачи пламени угля и газа отличаются, что может привести к дисбалансу теплопередачи в парогенераторе, который в свою очередь может потребовать модернизации конструкции для учета всего спектра сценариев распределения нагрузки и цикличности (Gossard 2015);
- высокое содержание водорода в природном газе (~25 процентов массы) означает, что скрытые потери тепла в результате образования воды в процессе сжигания могут быть значительно выше, чем при использовании любых видов угля, за исключением тех, которые обладают наибольшей влажностью;
- производительность может зависеть от местоположения газовой горелки, что может потребовать тщательной настройки во избежание перегрева или неполного сжигания в отдельных зонах (Reinhart and others 2012).

58. Возможные способы перенастройки действующего угольного энергоблока для сжигания газа зависят от требуемой степени гибкости. Самым простым вариантом является замена имеющихся мазутных нефтяных игнайтеров эквивалентами, работающими на природном газе, что, как правило, позволяет достичь максимальных показателей сжигания газа в 10–20 процентов. Если установка оснащена мазутными разогревающими форсунками, то их тоже можно заменить на газовые, что увеличивает потенциал сжигания газа до 30–50 процентов. Если же потребуются более высокие показатели, то сжигание газа должно быть включено в систему основной горелки (Reinhart and others, 2012). Это влечет за собой такие изменения, как установка газовых колец вокруг угольных горелок, установка газовых сопел кольцом или в центре горелки. Наиболее дорогостоящим вариантом совместного сжигания является добавление полноразмерных горелок на природном газе или замена существующих угольных горелок на газовые или двухтопливные. Скорее всего, потребуются изменения в системе управления процессом горения.

59. В плане сокращения выбросов NO_x природный газ является обычным топливом, используемым для трехступенчатого сжигания, так как он легко впрыскивается и контролируется и не содержит горючего азота. Это позволяет сократить выбросы NO_x почти на 70 процентов. Это трехступенчатый процесс горения, который происходит в первичной зоне горения, зоне восстановления и зоне дожигания. В первичной зоне горения pulverизированный уголь сжигается с помощью обычных или горелок с низким выбросом NO_x , работающих с малой подачей воздуха. Второй впрыск топлива производится в зоне котла после сжигания угля, образуя зону реакции с высоким содержанием топлива (зону восстановления). Здесь из природного газа продуцируются активные радикалы, которые вступают в химическую реакцию с NO_x , образуящимся в первичной зоне, восстанавливая его до молекулярного азота. Частичное сжигание природного газа в этой зоне восстановления приводит к высокому содержанию CO . После этого осуществляется последняя подача третичного воздуха в верхнюю часть топки, создающего зону дожигания, что завершает весь процесс сжигания. Таким образом, системы трехступенчатого сжигания могут дать возможность использования значительных объемов природного газа на действующем угольном энергоблоке.

60. Хотя природный газ является распространенным топливом для совместного сжигания с углем, существуют и другие возможности. Если в пределах приемлемого расстояния имеются достаточные запасы, позволяющие избежать непомерных расходов на транспортировку, то для совместного сжигания может быть использован любой из следующих вариантов:

- обычный трубопроводный газ;
- сланцевый газ;
- сжиженный природный газ;
- свалочный газ;

- метан угольных пластов и шахтный метан;
- продукты, образующиеся в процессе подземной газификации угля.

С. Текущая ситуация и рыночные перспективы внедрения технологии совместного сжигания

61. Ряд стран по всему миру эксплуатируют угольные электростанции с добавлением газа, который они регулярно используют в рамках своего операционного подхода. Страны, наиболее широко применяющие технологию совместного сжигания угля и газа, перечислены в таблице 3. Угольные электростанции, пригодные для переоборудования под технологию совместного сжигания угля имеются во многих других странах, хотя и в меньшем количестве. К ним относятся отдельные станции в Австралии, Кыргызстане, Польше, Словакии, Болгарии и Таиланде.

Таблица 3

Страны с наибольшим количеством угольных электростанций, на которых также используется природный газ

(Platts, 2017)

<i>Страна</i>	<i>Мощность (МВт)</i>	<i>Основной вид топлива</i>	<i>Типы энергетических установок</i>
США	27 071	битуминозный, суббитуминозный, бурый уголь	докритическая, сверхкритическая
Украина	20 740	битуминозный, суббитуминозный уголь	докритическая, сверхкритическая
Россия	12 396	битуминозный, суббитуминозный, бурый уголь	докритическая, сверхкритическая
Румыния	3 525	битуминозный, бурый уголь	докритическая
Германия	3 508	битуминозный, бурый уголь	докритическая, сверхкритическая
Индонезия	3 400	суббитуминозный уголь	докритическая
Китай	3 175	битуминозный, суббитуминозный, бурый уголь	докритическая, сверхкритическая
Нидерланды	2 360	битуминозный уголь	докритическая, сверхкритическая
Узбекистан	2 100	бурый уголь	докритическая, сверхкритическая
Турция	1 600	битуминозный уголь	докритическая, сверхкритическая
Малайзия	1 600	битуминозный уголь	докритическая
Молдова	1 600	битуминозный уголь	докритическая
Италия	1 465	битуминозный уголь	докритическая
Индия	1 400	битуминозный уголь	докритическая
Израиль	1 150	битуминозный уголь	докритическая
Чешская Республика	1 115	битуминозный, бурый уголь	докритическая

62. Основным фактором является цена и доступность газа, поскольку в некоторых регионах, несмотря на его ценовую приемлемость для ограниченного применения, он слишком дорог для потребления в больших объемах. Кроме того, в ряде стран природный газ выгоднее экспортировать, чем сжигать на своих электростанциях, и поэтому экспорт имеет приоритет над внутренним использованием. К примеру, на протяжении ряда лет цены на газ в США находились на исторически низких уровнях, обычно ниже 5,0 долл. США/1000 МДж и ниже 2,4 долл. США/1000 МДж в 2015 году. С другой стороны, в то же 2015 году цены, например на Украине, составляли 9,0 долл. США за 1000 МДж, а в Китае — около 9,2 долл. за 1000 МДж, причем еще более высокие цены были зафиксированы в Южной Корее, Японии и Тайване — странах, сильно зависящих от импортных поставок СПГ.

63. Полный текст документа содержит примеры работы, проделанной на национальном и региональном уровнях в целях внедрения системы совместного сжигания.

D. Дальнейшие действия

64. На сегодняшний день совместное сжигание угля и газа, помимо ограниченного использования последнего в процессах запуска и нагрева установок, по-видимому, имеет нишевый характер в глобальном масштабе. В США было построено несколько станций и еще несколько находятся в процессе переоборудования — это стало возможным благодаря наличию надежных доступных поставок природного газа, который может помочь операторам угольных электростанций обеспечить соответствие все более жестким экологическим нормам. Совместное сжигание предлагает возможные преимущества, по крайней мере, для некоторых угольных электростанций, где экономия затрат может быть достигнута за счет возможности переключения с одного вида топлива на другой, который в данный момент является наиболее экономически выгодным. Для США большая часть возможностей связана с переоборудованием и модернизацией существующих электростанций, что потребует модификации горелок и внесения некоторых конструктивных доработок в теплопередающие элементы для оптимальной адаптации к различным характеристикам сжигания угля и газа. С учетом широкого разнообразия конструктивных схем существующих электростанций такие проекты совместного сжигания должны оцениваться в каждом конкретном случае для обеспечения полного учета различных экономических, технических и экологических факторов. Что касается новых установок для совместного сжигания, то эти вопросы могут быть рассмотрены на стадии проектирования.

65. В других регионах такие возможности, по все видимости, отсутствуют в первую очередь из-за ограниченного доступа к поставкам газа по приемлемой цене, хотя USC-электростанция, строящаяся в Дубае компанией «DEWA», является прекрасным примером того, какие меры могут быть приняты для обеспечения гибкого и надежного электроснабжения с дополнительной «подстраховкой» за счет использования как угля, так и газа.

66. Вместе с тем следует отметить, что, хотя продолжающийся процесс совершенствования нынешнего поколения установок совместного сжигания может укреплять уверенность в дальнейшем внедрении этой технологии, наличие других решений может помешать ей получить значительную дополнительную долю рынка.

VIII. Сжигание угля с биомассой и различными органическими отходами

67. Биомасса, получаемая из устойчивых источников, считается углеродно-нейтральной в том смысле, что CO₂, высвобождаемый в процессе ее сжигания, впоследствии поглощается другими источниками биомассы, и таким образом чистые выбросы CO₂ близки к нулю (IEA-ETSAP 2013; IHI 2017). В то же время типовые электростанции, работающие только на биомассе, имеют небольшую мощность и

низкий КПД, часто с относительно высоким уровнем выбросов обычных загрязняющих веществ (SO₂, NO_x, твердых частиц). Совместное сжигание биомассы (и различных органических отходов) с углем на современных крупных угольных электростанциях может, напротив, обеспечить более высокую эффективность и более высокие экологические показатели в сравнении с небольшими электростанциями, работающими исключительно на биомассе, при этом дополнительные инвестиции в совместное сжигание будут значительно ниже, чем затраты на установку для выработки энергии из биомассы. Недостатком здесь является то, что большая часть биомассы, кроме топлива, полученного из отходов, имеет более высокую закупочную цену за тонну, чем уголь (Dooley and Mason 2018). Другими возможными недостатками сжигания биомассы являются ее транспортировка и обработка, конверсия топлива, снижение эффективности котла, необходимость борьбы со шлакообразованием, образованием нагара, коррозией, а также ограничения по утилизации золы. Эти недостатки и связанные с ними дополнительные затраты означают, что сжигание биомассы в угольном электроэнергетическом секторе рассматривается заинтересованными сторонами только в случае, если государство предоставляет определенную поддержку, например, в виде стимулирующей политики или прямого финансирования для поощрения сокращения выбросов CO₂ (Minchener 2017; Canadian Clean Power Coalition 2017).

А. Проблемы, связанные с внедрением технологий

68. Европейский союз (ЕС) является мировым лидером с более чем 20-летним опытом работы в области совместного сжигания биомассы и угля (Европейская ассоциация производителей биомассы). В большинстве случаев биомасса состоит из древесных гранул, производимых из отходов лесозаготовительной промышленности в Северной Америке, которые поставляются в Европу (Zhang 2019). В некоторых странах, таких как Дания, Нидерланды, Польша и Великобритания, активно развивающих деятельность по совместному сжиганию, разработан широкий спектр вспомогательных механизмов (Carbo and others 2017). К ним относятся тарифы (FIT), которые в целом основаны на административном установлении цен на покупаемую энергию для компенсации расходов производителей возобновляемой энергии. К числу других механизмов относятся портфельные стандарты по ВИЭ (RPS), которые основаны на количественных показателях и поощряют совместное сжигание топлива экономически эффективным образом. Другие стимулы, такие как налоги на выбросы углерода, наоборот, не были достаточно эффективны, для того чтобы стимулировать переход на совместное сжигание биомассы.

69. В других странах ЕС, таких как Финляндия, Франция, Германия и Италия, механизмов поддержки совместного сжигания не имеется, но определенная деятельность в этой области осуществляется.

70. На региональном уровне в течение следующего десятилетия многие западноевропейские страны планируют постепенно отказаться от сжигания угля, и таким образом совместное сжигание также будет сокращаться в результате закрытия угольных электростанций или полного перехода на биомассу, возможно на тех же установках, на которых сжигался уголь. Тем не менее совместное сжигание угля играет важную переходную роль в декарбонизации и продлении срока службы некоторых угольных электростанций. Драйверы для внедрения совместного сжигания переместились из ЕС в другие страны ОЭСР и в развивающиеся страны Азии. Многие такие страны, как Китай, Индия, Япония, Малайзия, Южная Корея и Вьетнам, активно реализуют проекты по совместному сжиганию. К примеру, в Японии и Южной Корее благодаря активной политической поддержке число проектов в области совместного сжигания быстро растет (Aikawa 2017; Kwon 2016). Вместе с тем существуют некоторые управленческие и технические проблемы, причем основной проблемой для этих двух стран является устойчивость проектов на основе биомассы. В Японии схема тарифов на подключение (FIT) не дает дополнительных стимулов для использования тепла теплоэлектростанциями (ТЭЦ) и не поддерживает существующие станции. Тем не менее в Японии некоторые старые электростанции, работающие на угле, все равно

используют технологию совместного сжигания, так как она позволяет выйти на 44,3 процента электрической эффективности — требование, которое должно быть выполнено до марта 2031 года. При этом в Японии действует около 20 проектов совместного сжигания угля с использованием древесных гранул как в энергетическом секторе, так и в крупных промышленных секторах (MHPS 2018; Chubu Electric Power Co 2017). В Южной Корее совместное сжигание поддерживается портфельными стандартами по ВИЭ 2012 года, и более 90 процентов потребляемых древесных гранул импортируется, так как внутреннее производство не может удовлетворить спрос. По результатам исследования (Yun и Jung 2017), правительство Южной Кореи в мае 2018 года снизило весовой коэффициент платежеспособности ВИЭ для совместного сжигания биомассы. В конечном счете это может иметь негативные последствия, так как без определенного объема субсидий затраты на совместное сжигание биомассы могут стать слишком высокими для энергопредприятий и они будут вынуждены закрыть эту деятельность.

71. В некоторых развивающихся странах наблюдаются тенденции, отличные от ОЭСР. Так, Китай приступил к реализации проектов по совместному сжиганию местных сельскохозяйственных и лесных отходов и шламов. Частично способствуя декарбонизации угольных электростанций, этот подход предотвращает беспорядочное сжигание таких отходов, тем самым значительно улучшая качество воздуха. Предусматривается осуществление 89 экспериментальных демонстрационных проектов (China NEA 2017), один из которых был начат в сентябре 2018 года, см. рис. 14. Однако в Китае до сих пор не создан адекватный механизм для содействия эффективному внедрению технологий совместного сжигания (Li 2018).

72. Напротив, в США и Канаде, однако, эта технология никогда не развивалась в полной мере из-за отсутствия политической поддержки, несмотря на обширные лесные ресурсы, большие мощности по производству древесных гранул, которые в настоящее время полностью экспортируются, и уже имеющиеся станции, работающие на угле. Аналогичным образом, несмотря на то, что Англия и ЮАР традиционно потребляют уголь, ни одна из этих стран не реализует проекты в области совместного сжигания биомассы и угля из-за отсутствия механизмов поддержки. Австралия обладает огромным потенциалом для выращивания биомассы и обладает огромными ресурсами сельскохозяйственных и лесных отходов. Внутренние ресурсы биомассы в Южной Африке, напротив, ограничены, поскольку нехватка воды и продовольствия делают страну менее пригодной для развития биоэнергетики.

В. Будущие перспективы

73. Совместное сжигание углеродно-нейтральной биомассы и других органических отходов с углем для сокращения выбросов CO₂ может способствовать становлению сектора электроэнергетики с чистыми нулевыми выбросами углерода. Эта технология также открывает возможность для использования таких сельскохозяйственных отходов, как рисовая шелуха и солома, которые в противном случае, как правило, просто сжигаются на полях, что приводит к значительному загрязнению воздуха. Однако, несмотря на то, что совместное сжигание представляет собой относительно недорогую в техническом плане технологию частичной декарбонизации угольных электростанций с сопутствующим повышением качества воздуха, для того, чтобы эта технология стала массовой, необходима государственная политика и финансовые субсидии. Происходящая в настоящее время «миграция» технологии в Азию открывает значительные возможности в ближайшем будущем при условии введения соответствующих субсидий.

IX. Дальнейшее продвижение за счет успешного взаимодействия технологий

74. Спрос на энергию продолжает расти и ключевым компонентом баланса остается электричество. Электроэнергию можно вырабатывать на основе многих источников

топлива, таких как уголь, газ и биомасса, и если в этом случае процесс производства является контролируемым, то энергия ветра и солнца представляют собой переменные источники периодического действия. Несмотря на то, что многие правительства и организации взяли на себя обязательство создать к 2050 году системы с чистыми нулевыми выбросами углерода, основанные на источниках ПВИЭ, в реальности эта цель едва ли будет достигнута.

75. Надежная и эффективная электроэнергетическая сеть должна включать в себя компоненты контролируемого производства энергии. Речь идет об источниках электроэнергии, которые могут быть поставлены под нагрузку в случае необходимости и поставлять мощность по требованию операторов электросетей в соответствии с конъюнктурой рынка. Контролируемое производство электроэнергии может быть запущено и остановлено, а выходная мощность может регулироваться в соответствии с установленными требованиями. Энергоносители для обеспечения контролируемого производства включают уголь, газ и биомассу. Источники ПВИЭ, напротив, носят переменный и периодический характер. В настоящее время без использования контролируемых источников сети на основе ПВИЭ не могут обеспечить стабильную и эффективную работу, в них может происходить внезапное увеличение или потеря мощности, что во многих случаях может привести к остановке подачи электричества.

76. Были разработаны ряд проектов работающих на угле электростанций, способных обеспечить функционирование в условиях крайне низкой нагрузки при быстром повышении и понижении мощности, сохраняя при этом общие благоприятные экологические показатели. Благодаря таким усилиям, взаимодействие технологий, основанных на использовании угля и ПВИЭ, может способствовать достижению приемлемых эксплуатационных характеристик, которые отвечают стандартам сети.

77. Для дальнейшего продвижения в этом направлении необходимо сокращение выбросов CO₂ от угольных (и газовых) электростанций в качестве ключевого шага на пути к углеродной нейтральности. Эту задачу можно решить за счет внедрения технологии УХУ/УИХУ, которая позволит снизить выбросы CO₂ до уровня значительно ниже 10 процентов. Эта технология в настоящее время стоит значительно дороже в сравнении с ПВИЭ, которые характеризуются низкими удельными затратами при нормированной стоимости электроэнергии. Однако по мере увеличения доли источников ПВИЭ общие затраты на поддержание системы быстро возрастают до такой степени, что применение УХУ/УИХУ рассматривается как более привлекательное решение. Появляется все больше данных, указывающих на то, что сочетание угля с УХУ/УИХУ и ПВИЭ не только приводит к снижению общих системных затрат, но и может соответствовать всем требованиям к системе, в отличие от использования исключительно ПВИЭ.

78. Все сказанное выше указывает на насущную необходимость продвигать технологии использования угля (или газа) с УХУ/УИХУ в качестве низкоуглеродного решения для взаимодействия с ПВИЭ в сети. Любые крупные проекты такого рода должны получить позитивный отклик со стороны крупных игроков в этой области как для обеспечения государственной поддержки, так и для поддержания динамики и интереса со стороны широкой общественности. Им необходимо представить убедительное видение ключевой роли, которую УХУ/УИХУ должны сыграть в успешном достижении углеродной нейтральности. Эта концепция должна предусматривать работу по пропаганде УХУ/УИХУ на глобальном уровне для ее включения в национальные повестки и принятия соответствующих мер.

79. Это взаимодействие между контролируемыми источниками энергии и ПВИЭ является основным вопросом, требующим рассмотрения. Существуют и другие возможности, в данном случае для интеграции источников ПВИЭ на отдельных угольных электростанциях. Такие подходы технически обоснованы и позволяют обеспечить работу электростанции во всем диапазоне мощностей. С помощью концентрированной солнечной энергии можно производить дополнительный пар, который может либо увеличить производство энергии (солнечный «прирост»), либо может быть использован для уменьшения потребления угля (режим сниженного

потребления). Однако в нынешних рыночных условиях вышеупомянутые подходы зачастую не дают возможностей для их масштабного и широкого в географическом плане внедрения, и на сегодняшний день освоение этой технологии носит ограниченный характер.

80. Аналогичным образом, газ может сжигаться на угольных электростанциях, и это даст положительные результаты, включая снижение уровня обычных выбросов. Однако, как и в предыдущем случае, преимущества не всегда оправдывают инвестиционные затраты, и эта применение этой технологии также ограничено.

81. Наконец, технологии сжигания угля с использованием устойчивой биомассы открывают альтернативный путь развития энергетики. Они могут способствовать относительно незначительному сокращению выбросов CO₂, так как стандартная схема предполагает ограниченное использование возобновляемых источников энергии, что позволяет избежать крупных модификаций на электростанциях. Однако в развивающихся странах в качестве возобновляемых ресурсов могут использоваться сельскохозяйственные отходы, которые в противном случае, скорее всего, просто сожгут на поле. Таким образом, эта технология могла бы способствовать устранению проблем качества воздуха, связанных с использованием возобновляемых источников энергии, что дает ей серьезные преимущества. Тем не менее ее внедрение потребует определенного уровня субсидирования, поскольку устойчивая биомасса, как правило, дороже угля. Технологии сжигания угля с использованием устойчивой биомассы могут иметь перспективу в тех странах, где предпочтение отдается использованию угля и имеются запасы биомассы.
