



<https://kazvedomosti.kz/wp-content/uploads/2022/04/elektroenergetika-kazahstana.jpg>

МОДЕРНИЗАЦИЯ УГОЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

КОЖАБАЕВ С.И.

Председатель наблюдательного совета ГК «Alageum Electric», заслуженный энергетик Республики Казахстан, заслуженный энергетик СНГ

ПISКУНОВ И.В.

Главный технолог, ООО «ХЕТЕНГ Инжиниринг-РУС», К.Т.Н.

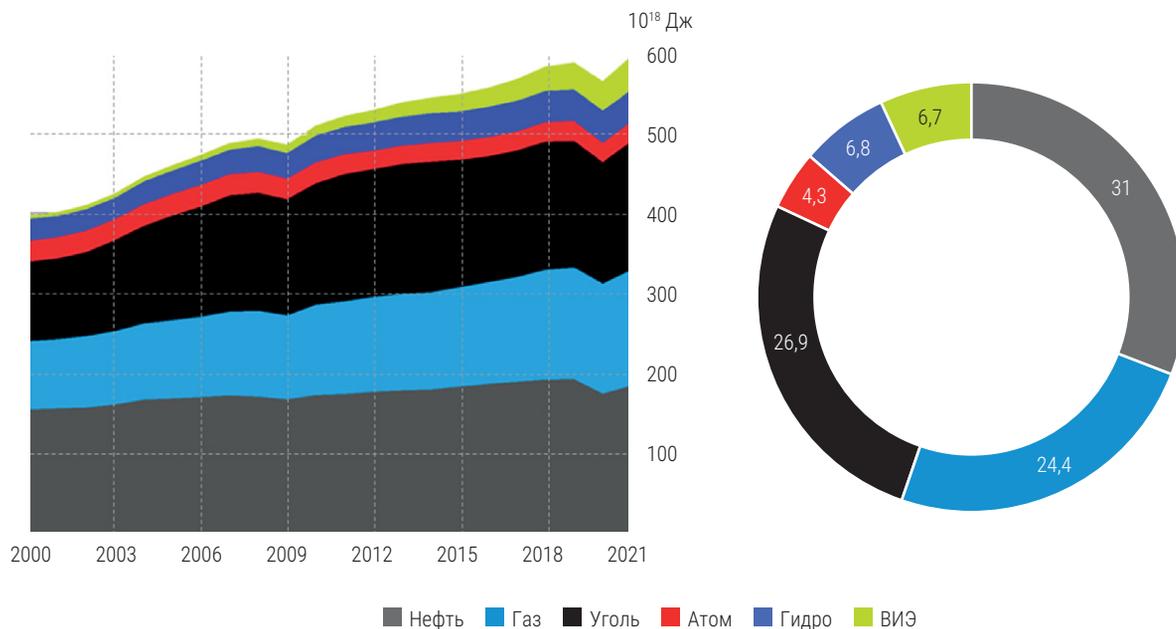
Тенденции потребления энергии в мире

Потребление энергии в мире растет высокими темпами (рис. 1), и по прогнозам это продолжится и в долгосрочной перспективе. По данным Международного энергетического агентства, к 2040 году спрос на энергию в мире повысится на 30%. Главные факторы – это увеличение численности населения в мире (до 9-10 млрд человек к 2040-50 годам)

и рост потребления на душу населения в развивающихся и слаборазвитых странах, т.е. сокращение отрыва от развитых стран по доступу населения к энергии [1].

Частично этот рост будет покрываться за счет активного распространения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – гидро, ветро- и солнечной энергетики. В этой связи нужно упомянуть Парижское соглашение по климату, направленное на реализацию мероприятий по со-

Рис. 1. Потребление первичной энергии в мире по видам топлива [1,2]



кращению выбросов парниковых газов и сдерживанию прироста средней температуры на Земле ниже 1,5-2°C. Многие страны объявили о планах по достижению углеродной нейтральности на горизонте 2050-2060 годов, то есть в ближайшие 30-40 лет.

Вместе с тем анализ текущего спроса на энергоносители показывает, что углеродсодержащие ископаемые топлива (нефть, газ, уголь) по-прежнему играют ключевую роль в глобальном энергобалансе, покрывая более 80% мировой потребности.

Нефтяная, газовая и угольная отрасли характеризуются колоссальными запасами ископаемых, добыча которых позволит обеспечить человечество энергией на многие десятилетия, имеется развитая инфраструктура и отлаженная цепочка: добыча – переработка – потребление. Кроме того, не нужно забывать, что углеводороды – это не только источник энергии, но и ценное сырье для получения других продуктов нетопливного назначения (нефтехимической продукции, пластиков, битумов, масел и т.д.), доля производства которых растет [3]. Пик потребления нефти по прогнозам ожидается не ранее 2030-40 гг., а по природному газу – еще позже, поскольку альтернативные источники не смогут покрыть растущий спрос на энергию в ближайшие десятилетия. Ожидалось, что потребление угля в ближайшее время уже будет снижаться, однако наступление энергетического кризиса внесло свои коррективы.

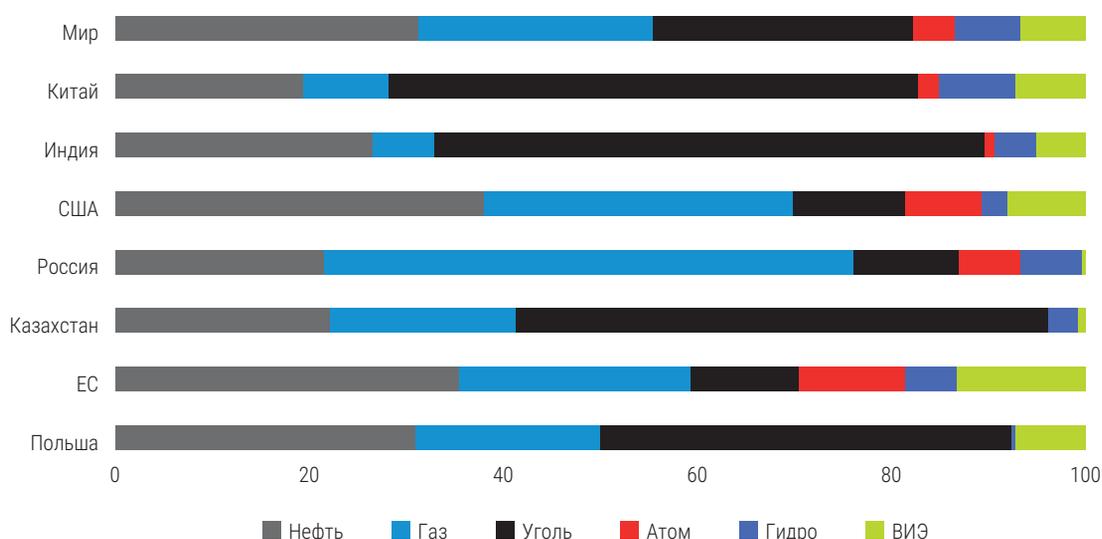
Таким образом, указанные факторы ведут к тому, что в настоящее время в ТЭК действуют следующие разнонаправленные тенденции:

- рост абсолютного потребления энергии в мире;
- ужесточение экологических нормативов и сокращение выбросов парниковых газов (декарбонизация энергетики);
- потребность в дешевой энергии в период энергетического кризиса;
- потребность в энергетической безопасности и стабильности энергообеспечения;
- получение отдачи от инвестиций в разведку и разработку месторождений;
- необходимость повышения энергоэффективности и энергосбережения;
- развитие ВИЭ и диверсификация энергоносителей.

Нефть, уголь и газ – это основные виды первичных энергоносителей для многих стран, хотя их соотношение существенно различается. К примеру, в Китае, Казахстане и Польше преобладает использование угля (55%, 55% и 42% соответственно)

В зависимости от обеспеченности собственными природными ресурсами, состояния промышленных отраслей и особенностей экономики каждая страна выбирает свою стратегию развития ТЭК. На рис. 2 показано потребление энергоносителей с разбивкой по типам для некоторых стран мира. Как можно видеть, нефть, уголь и газ – это основные виды первичных энергоносителей для многих

Рис. 2. Потребление энергии по видам топлива в разных странах (2021 г.) [1,2], %



стран, хотя их соотношение существенно различается. К примеру, в Китае, Казахстане и Польше преобладает использование угля (55, 55 и 42% соответственно). В странах ЕС доля низкоуглеродной энергетики – почти треть, а в РФ преимущественно потребляется природный газ, при этом около 75% нефти и нефтепродуктов идет на экспорт.

Перспективы угольной отрасли

Исторически угольная отрасль активно развивалась за счет низкой стоимости топлива и большим запасам, удобству его хранения и перевозки. Благодаря наличию дешевого ресурса угля в XX веке произошло стремительное развитие промышленности. За последние 40 лет абсолютное потребление угля удвоилось. Хотя его доля в балансе энергопотребления начала снижаться, но, как было показано выше, потребление угля и сейчас достаточно высоко в АТР (Китай, Индия), и даже в некоторых странах ЕС (Польша, Чехии, Германии). По прогнозу Wood Mackenzie до 2025 г. спрос будет стабильным на уровне 8,5 млрд т в год, прежде всего за счет растущего спроса на рынках АТР [4].

Таблица 1. Типичные годовые выбросы угольной ТЭС мощностью 1000 МВт [6]

Выбросы	Количество
Оксиды углерода	7-10 млн т
Оксиды серы	50-100 тыс. т
Оксиды азота	25-35 тыс. т
Частицы золы и сажи	7-20 тыс. т
Тяжелые металлы (V, Cu, Co, Pb и др.)	400 т

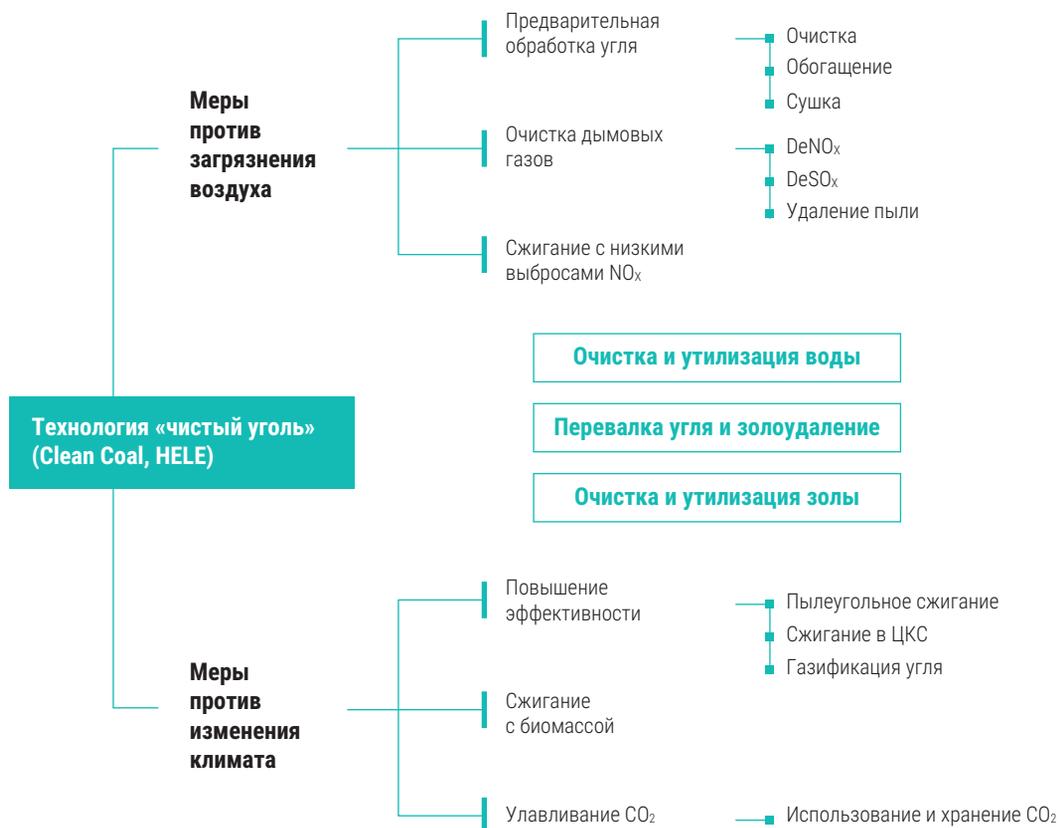
С другой стороны – с точки зрения экологии угольная отрасль является одной из самых «грязных». Добыча угля сопряжена с разрушением грунта, загрязнениями воды и атмосферы, а при его сжигании выделяется наибольшее количество парниковых газов и других вредных веществ по сравнению с другими энергоносителями. По оценке Global carbon project, выбросы углекислого газа от сжигания угля в мире составляют около 14 млрд тонн в год, что существенно выше, чем для нефти (11 млрд т) и газа (7 млрд т) [5]. Большие проблемы приносят также утечки шахтного метана, объемы которого сопоставимы с потерями при добыче природного газа и нефти. Кроме потери ценного ресурса, это также значительно усиливает парниковый эффект.

По статистике угольная ТЭС мощностью 1 ГВт потребляет почти в 1,5 раза больше топлива, чем при работе на природном газе или мазуте и дает следующий объем выбросов (см. «Типичные годовые выбросы угольной ТЭС мощностью 1000 МВт [6]»).

Страны, которые являются активными сторонниками декарбонизации энергетики, выступали за отказ от использования угля – планировалось поэтапное закрытие угольных электростанции к 2040. Однако реалии оказались таковы, что в 2022 г. мировой спрос на уголь стал вновь повышаться – по прогнозу МЭА, по итогам года ожидается рост на 1% с приближением к историческому максимуму около 8 млрд тонн. Возможности быстрого перехода на альтернативные источники энергии оказались переоценены, что привело к нарушению баланса производства и потребления энергии в мире.

В этой связи наиболее целесообразным видится подход, основанный не на отказе от углеродсодержащих ископаемых топлив, а на эволюционном развитии топлив-

Рис. 3. Технологии «Чистый уголь» [8]



но-энергетического комплекса. Здесь стоит акцентировать внимание на Казахстане – потребление угля в республике составляет около 55%, а в структуре электрогенерации – до 70% [7]. Для Казахстана, как и для России, уголь – это ценный экспортный продукт, доказанные запасы которого составляют соответственно около 3% и 15% от общемировых объемов, обе страны входят в десятку крупнейших мировых производителей угля, а отрасли обеспечивают тысячи рабочих мест и стабильное развитие экономики. Этими природными богатствами нужно продолжать пользоваться, адаптируя при этом всю цепочку производства-потребления к современным экологическим нормативам, то есть максимально снижая нагрузку угольной отрасли на окружающую среду. Во многих странах все более ужесточают требования по выбросам электростанций. Так, например в передовых странах стандарты для новых/действующих ТЭС ограничивают выбросы оксидов серы на уровне 35-200 мг/м³, оксидов азота – до 50-200 мг/м³, золы – до 10-30 мг/м³ [8].

Для наибольшей эффективности развитие должно быть комплексным и направлено как на снижение всех вредных факторов, так и на более рациональное использование ресурсов.

Примером такого комплексного подхода к развитию угольной отрасли является применение технологий «Clean Coal» и «High Efficiency Low Emissions» (HELE) (рис. 3).

С учетом представленного выше, можно выделить следующие направления развития угольной отрасли для снижения вредных выбросов [8-21]:

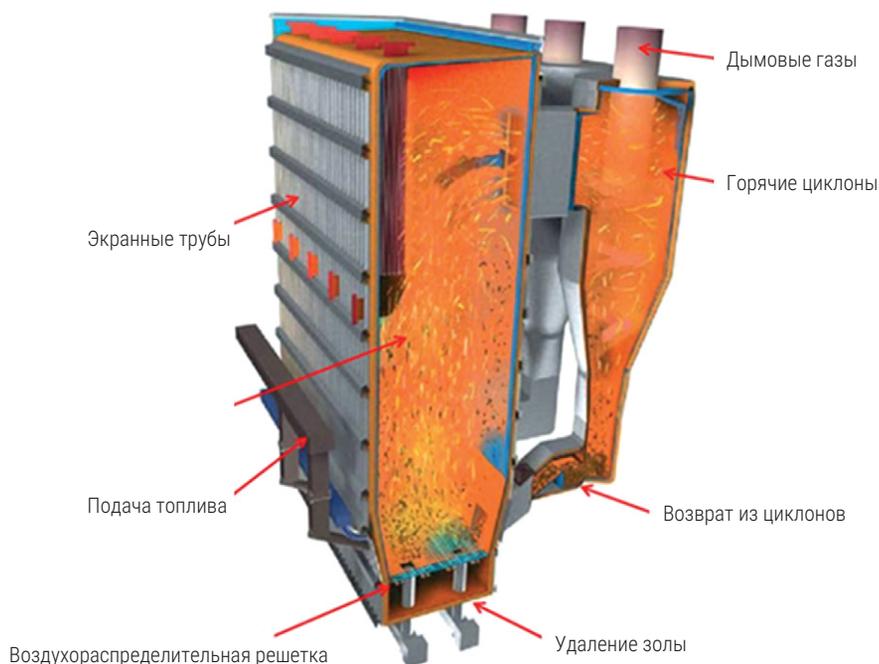
Утилизация шахтного метана:

- установка факельных систем, генерация для внутреннего потребления, создание малотоннажных производств на основе метана, например, метанола или аммиака.

Повышение эффективности генерации:

- модернизация или замена устаревших угольных ТЭС на более крупные и современные;
- повышение параметров пара: от докритических к сверхкритическим (USK, A-USK). Рост КПД с 35% до 50%, снижение расхода топлива и выбросов CO₂ на 30%;
- перевод на режим когенерации (совместное производство ЭЭ и отопления). Увеличение КПД >50%, однако зависит от сезона и климатических условий – наиболее эффективно в странах с длительным отопительным сезоном;
- предварительное обогащение угля (снижение зольности).

Рис. 4. Котел сжигания твердого топлива в ЦКС [11]



Применение современных технологий:

- сжигание угля в циркулирующем кипящем слое (ЦКС). Увеличение КПД (+10%), снижение выбросов, гибкость по топливу;
- переход на водоугольные топлива (ВУТ), топливные суспензии;
- ступенчатое сжигание, подача воздуха в несколько этапов (OFA);
- переход к процессу газификации угля (ПГУ-ВЦГ, IGCC). Увеличение КПД, еще большее снижение выбросов, гибкость по топливу, получение сырья для нефтехимии. Характеризуется очень высокими капитальными затратами.

Очистка дымовых газов:

- улавливание золы (рукавные и электрофильтры);
- очистка от кислых газов – оксидов серы (FGD) и азота (DENOX, SCR и др.). Удаление SO₂ на 95%, NOx на 90%. Отличается высокими затратами – до \$200-600 на 1 кВт мощности.

Утилизация золы и золошлаковых отходов:

- выделение металлов из золы (ванадия, мышьяка и др.);
- применение золы и золошлаков в строительстве (отсыпка дорог, искусственные грунты).

Улавливание углекислого газа (CO₂):

- технологии CCUS. Наиболее актуально в условиях углеродного регулирования;
- улавливание углекислого газа для использования в химической, пищевой отраслях и т.д.;

- компенсационные мероприятия – восстановление лесных угодий и посадка зеленых насаждений. 1 Га леса улавливает до 3-27 т CO₂ в год;
 - развитие процессов углехимии и получения продуктов высоких переделов;
 - получение продуктов на основе процесса коксования (кокс, каменноугольная смола, ароматические углеводороды, нафталин, антрацен, фенол, углеродные волокна и т.д.);
 - получение продуктов на основе процесса газификации – из синтез-газа (метанол, жидкие углеводородные топлива и др.);
 - получение прочих продуктов – гуминовых веществ (удобрения для растений), монтан-воска (добавки для битумных материалов) и др.;
- Далее рассмотрим некоторые направления более детально.

Сжигание угля в циркулирующем кипящем слое (ЦКС)

Данная технология находит широкое применение в мире и основана на сжигании топлива в псевдоожиженном слое, в которой также входит получаемая зола и добавка известняка (рис. 4.) Первый опыт ее практического использования датируется 1960-70 гг., и на текущий момент известно несколько поколений котлов данного типа [10]. На рынке наибольшее применение нашли техноло-

Таблица 2. Сравнение технологий сжигания угля

Параметр	Традиционный блок сжигания угля	Котел сжигания угля с ЦКС
Капитальные затраты	Стандартные	Ниже на 15-20%
КПД (на сопоставимом топливе)	До 35%	до 45%
Топливо	Пылеугольное топливо. Использование низкокачественного угля ограничено	Гибкость по топливу, в т.ч. сжигание низкокачественного угля (зольного, бурого), ТБО и т.д. Не требуется тонкий помол угля
Выбросы кислых газов	Необходимость дорогостоящего оборудования для очистки (200-600 \$ на 1 кВт)	Снижение выбросов: SO _x – на 50-90%, NO _x – на 50% и более
Оборудование	Устаревшее оборудование, требующее ремонта и замены. Большие расходы на собственные нужды	Компактная модульная комплектация, простота конструкции, возможность модернизации с ростом производительности
Температура процесса	Более 1650°C, неравномерное распределение	Сниженная до 780-870°C, равномерное распределение
Безопасность	Стандартная	Более безопасно за счет отсутствия пылевидного топлива и высокой надежности процесса

гические решения компаний «Фостер-Уиллер», «Альстом Пауэр»; «Бабкок Борзиг», «Лурги Лентьес» и др.

Распространение котлов с ЦКС обусловлено следующими преимуществами по сравнению с традиционными процессами сжигания (см. «Сравнение технологий сжигания угля»).

Утилизация золы и золошлаковых отходов

Побочные продукты, получаемые при сжигании угля и нейтрализации получаемых вредных выбросов, при квалифицированной переработке обладают большим потенциалом для последующего использования. В среднем зольность угля составляет около 20%, при его сжигании ежегодно получают около 600 млн т. золы [17]. Для улавливания золы на угольных ТЭЦ применяются циклонные сепараторы, рукавные фильтры, электрофильтры.

Как известно, в состав золы может входить большое число химических элементов. Основные компоненты (99%) – это, как правило, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, S, P. Кроме того, обнаружено большое количество микроэлементов,

содержание которых в разных видах угля может существенно различаться. Пример содержания элементов показан в таблице (см. «Содержание тяжелых металлов в разных типах углей, мг/кг у.т. [12]»).

С учетом огромных объемов добычи угля, в некоторых случаях на базе переработки золоотвалов можно обеспечить промышленное производство востребованных продуктов, таких как мышьяк, ванадий, кобальт, и даже уран [20]. Во-первых, это снижает отравляющее действие тяжелых металлов на окружающую среду. Во-вторых, следует особенно отметить, что некоторые виды углей характеризуются повышенным содержанием радионуклидов (радия, тория, калия), что еще больше повышает актуальность проведения комплексной утилизации отходов, получаемых при их сжигании.

В больших объемах угольная зола может применяться в качестве добавки к цементу и заполнителя к строительным материалам, для проведения дорожно-строительных работ (отсыпка дорог, искусственные грунты). Известны также примеры использования золы в качестве дешевого адсорбента для очистки дымовых газов, щелочного нейтрализатора для сточных вод и т.д. [17].

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов в разных типах углей, мг/кг у.т. [12]

Химический состав	Донецкий	Экибастуз	Канско-Ачинский
Свинец	51-63	16-32	2-5
Мышьяк	23-24	12-24	3-9
Ванадий	36-51	32-96	2-6
Хром	33-45	16-80	3-9
Цинк	21-120	48-200	5-11

При использовании технологий сжигания в ЦКС или водоугольного топлива (ВУТ) отделение золы облегчается. Повышение КПД угольных ТЭС и проведение предварительного обеззоливания угля позволяет также снизить образование золоотвалов.

Снижение выбросов углекислого газа

Как было показано в начале, угольная генерация – это один из главных антропогенных источников углекислого газа в атмосфере, поэтому декарбонизацию энергетики для выполнения целей Парижского соглашения целесообразно начинать именно с угольных ТЭС. Здесь можно выделить несколько направлений: во-первых, путем повышения КПД процессов сжигания и экономии топлива можно снизить в абсолютном значении выбросы парниковых газов и других вредных веществ. Также помогает применение более прогрессивных технологий – например, сжигания в ЦКС или газификации угля. И, конечно, за счет перехода от непосредственного сжигания угля к процессам углехимии негативные эффекты могут быть минимизированы.

Во-вторых, проблема решается через улавливание углекислого газа из дымовых газов и его последующей утилизации. Поскольку затраты на улавливание CO₂ находятся в непосредственной зависимости от его исходной концентрации в дымовых газах, угольные ТЭС в этом случае более предпочтительны. Пример установки для получения товарного углекислого газа, основанной на процессах сорбции-десорбции газа этаноламинной композицией, представлен в [23], а в [24] – его компримирования и сжижения. За счет применения селективной каталитической очистки в этом случае также обеспечивается удаление до 95% оксидов азота.

За последние 40 лет абсолютное потребление угля удвоилось. Хотя его доля в балансе энергопотребления начала снижаться, но, как было показано выше, потребление угля и сейчас достаточно высоко в АТР (Китай, Индия) и даже в некоторых странах ЕС (Польше, Чехии, Германии)

Из зарубежных технологий извлечения углекислого газа из дымовых газов известны решения компании Dow chemical (Econamine FG – до 85-95% извлечения CO₂, производительностью до 4600 т/с), Kerr McGee Chemical, Mitsubishi Heavy Industries, Kansai Electric Power, Vattenfall, HTS Purenergy и др. [24]. Одним из способов утилизации CO₂, актуальным для крупнотоннажного производства,

является CCUS (carbon capture, utilization and storage), основанный на его закачке в пласт нефтяных и газовых месторождений, например, для интенсификации добычи за счет вытеснения флюида и снижения его вязкости, заполнения образовавшихся пустот. Кроме этого, товарный углекислый газ находит применение в пищевой промышленности (газированные напитки, сухой лед), сельском хозяйстве (тепличные хозяйства, выращивание водорослей), а также в получении химических продуктов – карбамида, метанола (через восстановление до CO), уксусной кислоты, диметилового эфира и др. [24]. Еще одно направление – это получение синтетического низкоуглеродного «е-топлива» [25].

В 2022 г. мировой спрос на уголь стал вновь повышаться – по прогнозу МЭА, по итогам года ожидается рост на 1% с приближением к историческому максимуму около 8 млрд тонн

И, наконец, углекислый газ из атмосферы можно связывать в составе биомассы. Природные ресурсы – леса, растения, болота – обладают высоким потенциалом биологического связывания CO₂. Известно, что 1 Га леса потребляет до 3-27 т углекислого газа в год в зависимости от типа деревьев и особенностей климата [25]. Посадка зеленых насаждений, которые по своей поглощающей способности эквивалентны объему выбрасываемых парниковых газов, позволяет обеспечить полную углеродную нейтральность даже такой отрасли, как угольная энергетика.

Заключение

Таким образом, наиболее рациональным видится не категоричный отказ от использования угля в качестве топлива, а эволюционное развитие угольной отрасли для обеспечения энергетической и экологической безопасности стран, где он по-прежнему широко применяется. Например, для Китая, Казахстана, России и др.

Для адаптации к современным условиям необходимо проводить модернизацию угольных электростанций, которая может включать в себя замену старого оборудования и внедрение эффективных технологий, таких как сжигание в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) и др. Их преимущества – высокая эффективность на низкокачественном топливе, снижение выбросов и более низкие капитальные затраты. Еще одним перспективным направлением отрасли является переработка угля с получением широкого ассортимента продуктов углехимии.

Квалифицированная утилизация и переработка побочных продуктов сжигания (золы, кислых газов) позволяет не только снизить вредное воздействие на окружающую среду, но и обеспечить получение ценных продуктов (редкие и редкоземельные металлы, гипс, серы и серной кислоты и т.д.).

Для снижения выбросов парниковых газов применяются технологии улавливания CO₂ и шахтного метана, с их последующей утилизацией – например, посадка зеленых насаждений – практически, чем и занимается ГК «Alageum Electric», высаживая различные деревья и кустарники на собственных предприятиях на протяжении более двадцати лет.

Подводя итоги, можно сказать, что модернизация угольной отрасли позволяет не только обеспечить устойчивое развитие энергетики и повысить эффективность использования этого топлива, но и при грамотном подходе получить из побочных отходов целый спектр востребованной химической продукции и синергетический эффект с развитием других отраслей промышленности, сельского и лесного хозяйства. ❗

Список литературы

1. Танкаев Р., Фролов А. Мировая энергетика. Инфотэк. 03.11.2022. <https://itek.ru/reviews/mirovaya-energetika/>
2. BP Statistical Review of World Energy 2022, 71st ed. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
3. Пискунов И.В., Глаголева О.Ф. Основные перспективы переработки нефти, производства топлив и нетопливных нефтепродуктов в условиях перехода к низкоуглеродной энергетике // Нефтепереработка и нефтехимия. 2021. №7. С.5-20.
4. Новак А. Угольная промышленность XXI века: закат или ренессанс. 10.10.2022 <https://energypolicy.ru/ugolnaya-promyshlennost-xxi-veka-zakat-ili-renessans/business/2022/14/10/>
5. Global Change Data Lab. <https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel>.
6. Антонова А.М. Экологические аспекты эксплуатации АЭС. <https://ppt4web.ru/ehkologija/ehnergetika.html>
7. Угольная промышленность: в поисках точек роста. 28.08.2021 <https://strategy2050.kz/ru/news/ugolnaya-promyshlennost-v-poiskakh-tochek-rosta/>
8. Хохлов А., Мельников Ю. Угольная генерация: новые вызовы и возможности. Сколково. Январь 2019. 88 с.
9. Глаголева О.Ф., Пискунов И.В. Энергосбережение – приоритетная задача современной нефтегазопереработки // Neftegaz.ru. 2021. №1. С. 34-37.
10. Технологии сжигания в циркулирующем кипящем слое <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/tehnologiya-szhiganiya-v-cirkuliruyuschem-kipyaschem-sloe.html>
11. Сжигание топлива в псевдооживленном слое <https://de-reksiz.org/metodicheskie-rekomendacii-po-primeneniyu-peredovoj-praktiki-c.html?page=4>
12. Крылов Д.А., Сидорова Г.П. Пути снижения экологического воздействия на окружающую среду угольных ТЭС России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. №11. С.277-285.
13. Справочник по наилучшим доступным техническим методам в теплоэлектроэнергетике. Центр Юнеско по химической науке в образовании. Москва, 2008. 123 стр.
14. Козлов В.А., Гарбер В. Полукоксование низкокислотного коксующегося угля и специальные минеральные добавки, применяемые непосредственно на углеобогащательной фабрике для повышения качества кокса // Уголь. 2018. №12. С.92-97.
15. Найден способ, который уменьшит вредные выбросы тепловых электростанций в два раза <https://indicator.ru/engineering-science/vybrosy-teplovyh-elektrostantsij-13-12-2017.htm>
16. Хилько С.Л., Титов Е.В. Физико-химические аспекты приготовления топливных суспензий // Химия и технология топлив и масел. 2007. №3. С. 52-56.
17. Дмитриенко М.А., Няшина Г.С., Шлегель Н.Е., Шевырев С.А. Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий // Известия вузов. Проблемы энергетике. 2017. №3-4. С. 41-52.
18. Гадецкий А. Уголь делает свободным <https://makston-engineering.ru/blog-zametki/post/ugol-delaet-svobodnym?fbclid=IwAR26mNKFR5gDge19nTOvJ0dJB4-82QPdF0QxQITvCNreGC%E2%80%A6>
19. Чурашев В.Н., Марков В.М. Остаться нельзя уйти: к вопросу о развитии угольной генерации в России // Всероссийский экономический журнал ЭКО. 2019. №11 (545). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-11-63-93
20. Минчер Э. Взаимодействие технологий, в том числе технологий гибкого и экологически чистого производства энергии на основе угля, природного газа и возобновляемых источников ECE/ENERGY/GE.5/2020/4
21. Многогранный уголь. 09.11.2021 <https://globalenergyp-rize.org/ru/2021/11/09/mnogogrannyj-ugol/>
22. Сидорова Г.П., Крылов Д.А., Якимов А.А. Экологическое воздействие угольных ТЭС на окружающую среду // Вестник ЗабГУ. 2015. №09 (124). С.28-38.
23. Афанасьев С.В. Установка переработки дымовых газов с получением диоксида углерода как способ снижения «углеродного следа» // Химреактивы. 2022. №3 (59). С. 32-34.
24. Афанасьев С.В. Углекислый газ как сырье для крупнотоннажной химии // Neftegaz.ru. 2019. №9. С.94-106.
25. Пискунов И.В., Ершов М.А., Глаголева О.Ф. Альтернативные виды топлив для устойчивого развития транспортного сектора. Ч.3. Биотопливо // Транспорт на альтернативном топливе. 2021. №6 (84). С. 39-46.