

УДК 622.831.3:622.411.332.004.14

К. Бакхаус¹, В.В. Касьянов²

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШАХТНОГО МЕТАНА

¹UMSICHT (Государственный институт техники безопасности, экологии, энергетики), Германия

²«Эко-альянс», Украина

Проанализированы технологии использования метана угольных месторождений. Представлен опыт утилизации метана на шахтах им. С.М. Кирова (Россия) и Krupinski (Польша).

В 2005 г. выбросы парникового газа метана в мире только за счет угольной промышленности составили около 18,483 млрд. тонн, что в эквиваленте углекислого газа соответствует 388 млн. т CO₂. При этом тенденция увеличения добычи угля позволяет прогнозировать увеличение этой цифры до 440 млн. т CO₂ к 2020 году (рис. 1) [1].

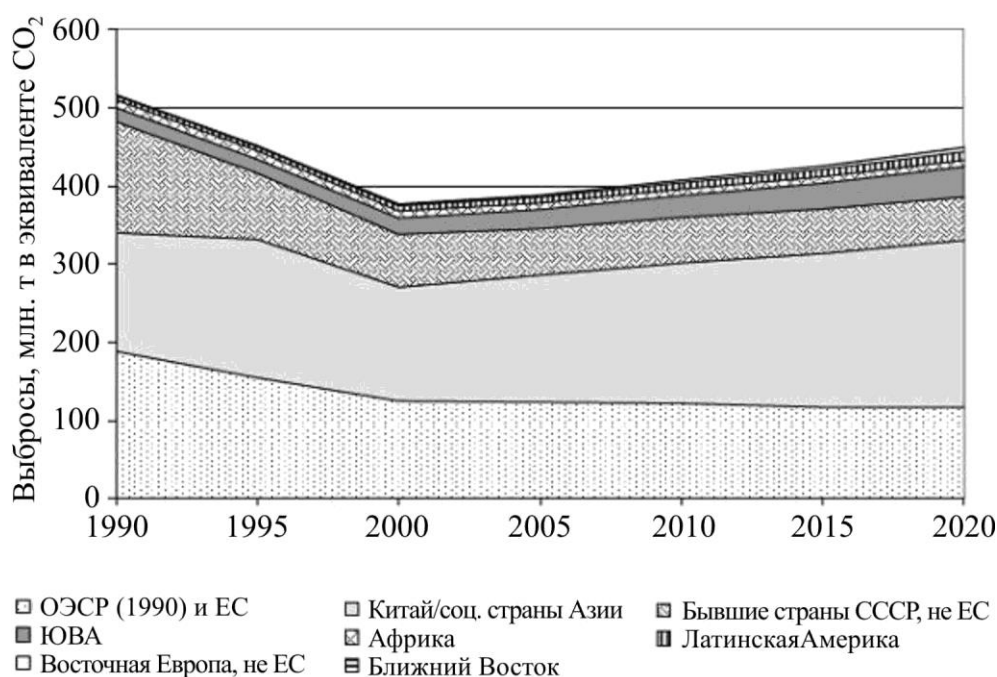


Рис. 1. Мировые выбросы метана в результате добычи угля в 1990-2020 гг. (млн. т CO₂)

Метан образуется в процессе углефикации и содержится в угольных пластах, а также во вмещающей породе. В научно-технической литературе такой метан называют метаном угольных пластов (МУП). Высвобождение метана угольных пластов происходит при снижении давления над пластом или рядом с ним вследствие естественных процессов (например, эрозии) или очистных работ.

Очистные работы содержат четыре источника значительных выбросов метана:

- открытые горные работы;
- подземные горные работы (вентиляция и активная дегазация);
- обогащение угля;
- закрытые шахты.

Как правило, объем выбросов метана в процессе открытых горных работ ниже, чем в процессе подземных, из-за более низкой степени углефикации. Кроме того, происходит выброс прямо в атмосферу, поэтому утилизация метана для получения энергии невозможна.

Таким образом, изложенные далее разработки относятся к шахтному метану (ШМ), т. е. той части метана угольных пластов, которая высвобождается в результате очистных работ. Можно грубо выделить три источника ШМ:

- вентиляция;
- дегазация;
- закрытые шахты.

Основными компонентами образующихся здесь газовых смесей являются метан, азот и углекислый газ, а в действующих шахтах – еще и кислород. Концентрация метана составляет при естественной дегазации 0,2-0,7 %, а в закрытых шахтах, а также при активной дегазации действующих шахт через специально пробуренные с поверхности скважины может достигать 90 % (рис. 2).

Состав газа зависит не только от добываемого угля и степени его углефикации, но и от типа и технологии дегазации. В России, Украине и Казахстане, где газообильность шахт высокая, для дегазации пластов применяется технология бурения дегазационных скважин с поверхности. Предварительная дегазация, дегазация действующих и закрытых шахт позволяет здесь добывать газовую смесь с различной концентрацией метана. Таким образом, в отличие от Германии и других стран добыча газа в этих странах происходит не только централизованно – через шахтные стволы, но и децентрализованно – по всей поверхности над угольным месторождением. При этом состав и количество газа может со временем очень сильно изменяться. При ведении очистных работ в районе дегазационной скважины количество газа резко возрастает, однако концентрация метана, ранее составлявшая до 95%, снижается до 50%.

Вследствие высвобождения метана добыча угля связана с риском (взрывоопасность) и загрязнением (парниковый газ), которых избежать невозможно. Поэтому крайне необходима разработка специальных технических и

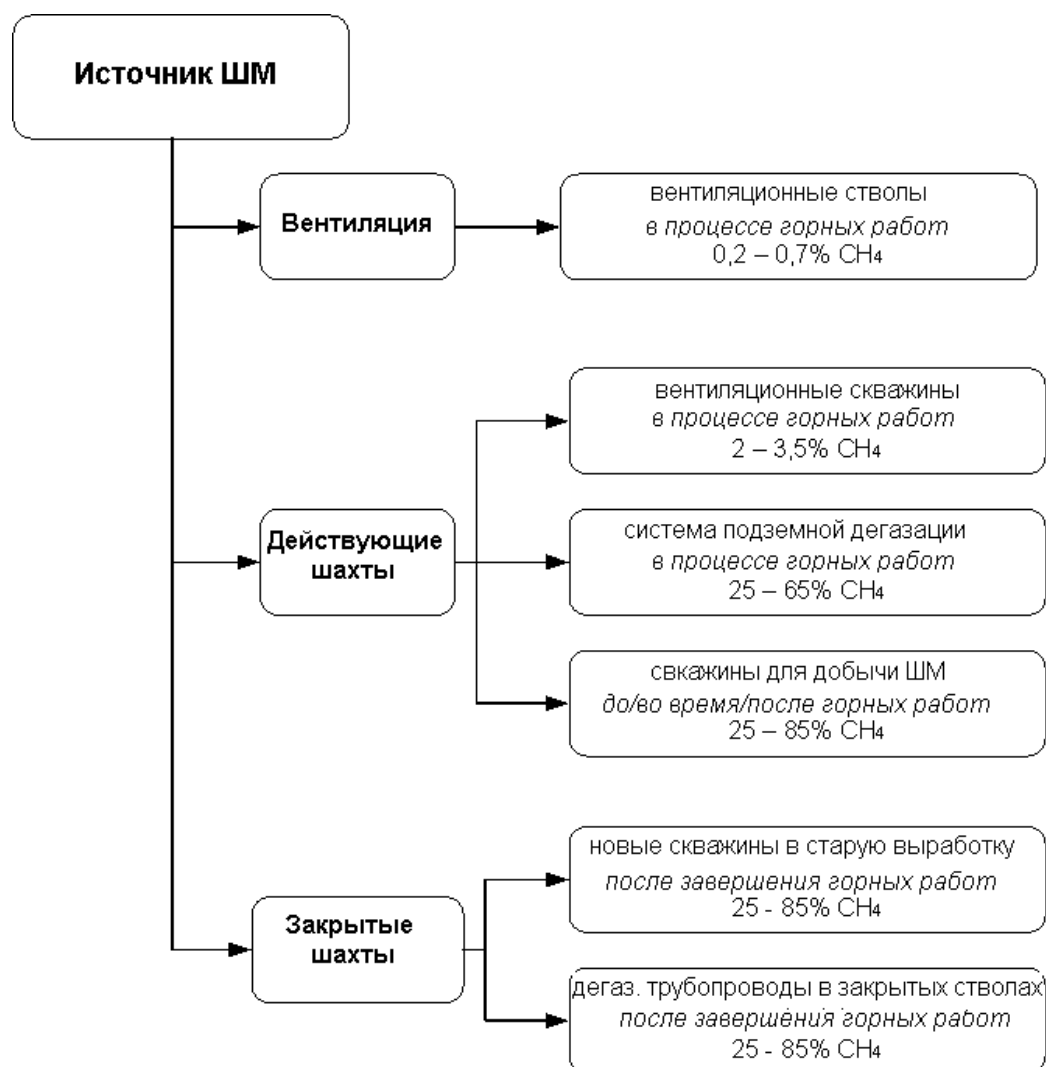


Рис. 2. Источники шахтного метана

экономических решений для обеспечения техники безопасности очистных работ, безопасности населения в районах расположения действующих и закрытых шахт и для сокращения выбросов метана, оказывающих вредное воздействие на окружающую среду. Решающую роль в данном вопросе играет утилизация шахтного метана в качестве топлива.

Простое сжигание метана позволяет достичь значительного сокращения выбросов, поскольку потенциал глобального потепления метана в 21 раз превышает потенциал глобального потепления углекислого газа. Одновременно снижается риск взрывов метана в шахте. Если помимо этого производится тепловая и электрическая энергия, достигается эффект замещения традиционных источников энергии и дальнейшее сокращение выбросов. Рассмотрим более подробно технические возможности утилизации шахтного метана для производства энергии.

Выбор технологии утилизации метана зависит от его качества (преимущественно концентрации CH_4) и от технического уровня оборудования. В

табл. 1 приведены основные современные технологии утилизации метана. Кроме того, в США также практикуется поставка метана угольных пластов с высоким содержанием CH_4 в трубопроводы природного газа.

Таблица 1

Современные технологии утилизации метана

| | Технология | CH_4 , % | Продукция | Примечание |
|----|--|-------------------|--|--|
| 1 | Двигатель | 30–100 | Электричество Тепло* Сокращение выбросов | Более 100 ед. в эксплуатации с 1996 г. |
| 2a | Котел/горелка. Основное топливо | 25–100 | Тепло Сокращение выбросов | Применение с 1980 г. |
| 2b | Котел/Горелка. Дополнительное топливо | 25–100 | Тепло Сокращение выбросов | С начала XX в. |
| 3 | Факел | 20–100 | Сокращение выбросов | Применение на полигонах ТБО |

* Утилизация тепла выхлопных газов в зависимости от условий шахты

По оценке Глобальной инициативы по метану (ГИМ)¹ в 2010 г. во всем мире существовало 300 проектов утилизации метана в эксплуатации и на стадии планирования. В половине проектов применялась технология утилизации в КТЭС (рис. 3).

По расчетам ГИМ объем сокращения выбросов парниковых газов, благодаря реализации проектов утилизации метана, в 2010 г. составил 45 млн. т в эквиваленте CO_2 [2, стр. 153]. Несмотря на успешное внедрение таких проектов с точки зрения техники и экономики, большая часть метана все еще выбрасывается в атмосферу. На это существует множество причин.

Помимо административных препятствий, в т. ч. нечетких процедур утверждения и отношений собственности, существуют также финансовые и технические барьеры. В некоторых странах, которые подписали Киотский протокол, однако ратифицировали его со значительной задержкой, не существует четких инструкций по реализации сокращений выбросов парниковых газов на основании этого соглашения. Кроме того, остается неясным, будет ли продлена торговля квотами после истечения срока действия Киотского протокола в 2012 г. При этом доступ к альтернативным механизмам торговли квотами, например, Схеме торговли выбросами Европейского Союза (EU ETS), имеет лишь ограниченное число государств.

Из-за отсутствия выручки от торговли квотами на выбросы проекты по утилизации метана для производства энергии экономически напрямую конкурируют с проектами других источников производства энергии. В таких

¹ Международное партнерство, задачей которого является усиленная утилизация метана (основывается на инициативе «Метан – на рынки»).

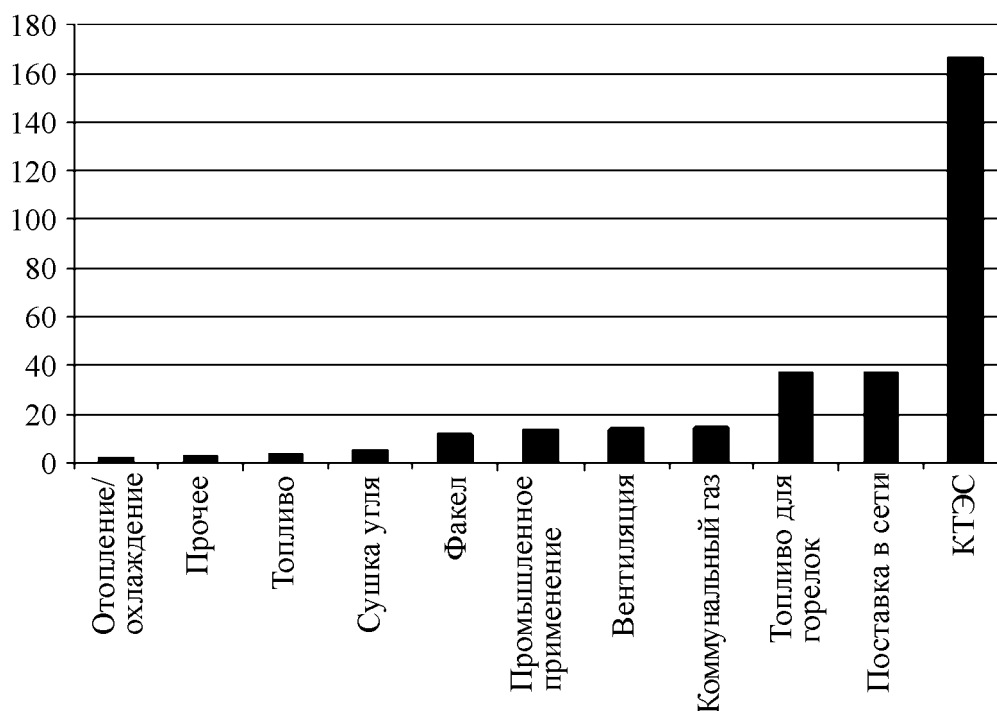


Рис. 3. Проекты утилизации метана в мире [2]

странах, как Россия с собственным природным газом по низкой цене, резко понижается интерес к идее производства энергии с использованием метана. Кроме того, на рентабельность утилизации метана негативно влияет колебание тарифов на электроэнергию. В табл. 2 представлены препятствия для реализации проектов утилизации шахтного метана, существующие в шести государствах, производящих наибольшие объемы выбросов ШМ в мире.

Помимо изложенных препятствий серьезными причинами низкой степени утилизации шахтного газа являются низкое содержание метана и недостаточно развитая инфраструктура (доступ к газовой и/или электросети). Кроме того, во многих регионах наблюдается недостаток информации об успешной реализации проектов утилизации метана для производства энергии.

В России, Казахстане и Украине недостаточно технологических возможностей утилизации вентиляционного метана, а также развития технологий для сокращения инфраструктурной зависимости.

В табл. 3 представлены различные технологии утилизации вентиляционного метана. Наиболее развита технология утилизации вентиляционного метана в качестве дополнительного топлива (например, дутьевого воздуха) для газовых двигателей. Так, например, шахта Arrpin в Новом Южном Уэльсе, Австралия, реализовала проект по утилизации смеси вентиляционного метана с газом, содержащим более высокую концентрацию метана, в 54 двигателях электрической мощностью 55,6 МВт [3].

Таблица 2

Препятствия для утилизации метана в государствах, производящих наибольшее количество выбросов [2]

| Страна | Основные ограничения |
|-----------|---|
| Китай | Большинство шахт находится на большом расстоянии от газопроводов Неразвитые технологии дегазации, низкий дебит Нечеткие руководства для иностранных разработчиков проектов Газ в основном низкого качества, т. е. концентрация метана менее 30 % |
| США | В большинстве штатов (в особенности на Западе США) -ограниченная пропускная способность газопроводов Сравнительно низкие тарифы на электричество снизили интерес ко многим проектам производства электроэнергии (как для собственных нужд, так и для реализации коммунальным службам) Разрешение на добычу углеродсодержащих полезных ископаемых зачастую выдается комбинированное: на нефть/ природный газ и уголь |
| Россия | ШМ и МУП конкурируют с огромными запасами природного газа с низкой стоимостью производства В регионе нет технологических средств для рентабельной добычи МУП из насыщенных газом угольных пластов низкой проницаемости Недостаточная государственная поддержка нетрадиционных источников энергии (Семинар «Метан – на рынки» в России, 2005 г.) |
| Австралия | Расходы на производство электроэнергии относительно высоки, и возникают сложности с покрытием всех расходов получения квот на выбросы при рыночных тарифах на электричество |
| Украина | Шахтный метан принадлежит государству, а право на его добычу предоставляется предприятиям, шахтам и физическим лицам, но процесс предоставления разрешений достаточно сложен Большинство угольных предприятий убыточны, и лишь некоторые из них получили значительные частные инвестиции Газ в основном низкого качества, т. е. концентрация метана менее 30 % |
| Индия | Отсутствие технологий и технических знаний Не произведена оценка запасов, выбор технологии, не разработаны ТЭО Отсутствие экспериментальных проектов, исследующих экономичность добычи и утилизации Отсутствие инфраструктуры для утилизации газа Отсутствие финансирования и потенциала его привлечения |

При внедрении австралийской технологии в условиях России необходимо учитывать значительно более высокую концентрацию метана в вентиляционном воздухе, а также тот факт, что метан добывается по всей протяженности угольного месторождения.

В рамках научно-исследовательского проекта «КоМет»², осуществленного при финансировании ЕС, была спроектирована, построена и успешно введена в производство на шахте им. С.М. Кирова ОАО «СУЭК-Кузбасс» мобильная испытательная установка утилизации вентиляционного метана в

² «КоМет (CoMeth): Шахтный метан – Новые решения по утилизации ШМ – Сокращение выбросов ПГ»

Таблица 3

Стадия разработки различных методов утилизации вентиляционного метана [4]

| Производитель / оборудование | Описание | Страна | Стадия разработки |
|---------------------------------|--|-------------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| MEGTEC / Vocsidizer | Термический поточный реверсивный реактор (окисляющая установка). Тепловая энергия используется для нагрева пара для паровых турбин. | Велико-британия Австралия США | Установка мощностью 8 тыс. м ³ /ч установлена корпорацией British Coal (1994 г.). Установка мощностью 6 тыс. м ³ /ч установлена на шахте Arpin Colliery (2002 г.). Установка мощностью 250 тыс. м ³ /ч установлена на шахте West Cliff Colliery (2007 г.), производит энергию для паровой турбины мощностью 6 МВт. Установка мощностью 50 тыс. м ³ /ч установлена на шахте Windsor Mine корпорации CONSOL (2007 г.). |
| BIOTHERMICA / Vamox | Термический поточный реверсивный реактор (окисляющая установка) | США Канада | Установка мощностью 50 тыс. м ³ /ч установлена на шахте № 4 компании Jim Walter Resources (месторождение Blue Creek) (2009 г.). Установка мощностью 8,5 тыс. м ³ /ч установлена на шахте Quinsam Mine в Британской Колумбии (2009 г.). |
| CANMET / CH4MIN | Каталитический поточный реверсивный реактор (окисляющая установка) | Канада | Экспериментальная установка 500 мм. Поиски покупателя для реализации демонстрационного проекта на шахте. |
| EESTECH / HOGT | Комбинированное применение угольных отбросов и ВМ в качестве топлива для вращающейся печи. Сжатый воздух нагревается в теплообменнике и приводит в действие газовую турбину. | Австралия | CSIRO спроектировало демонстрационную установку мощностью 1,0 МВт, испытания которой прошли успешно. Поиск возможности демонстрационного проекта на шахте. |
| CSIRO / VAMCAT | Газовая турбина с каталитической камерой сгорания для обедненной газовой смеси (1-процентный ВМ) | Австралия | Демонстрационная турбина (25 кВт) установлена на шахте «Пань», г. Хуайнань, Китай. |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|--|-----------|--|
| FlexEnergy / | Каталитическая микротурбина для обедненной газовой смеси (1,3-процентный ВМ) | США | Несколько установок мощностью 30 кВт эксплуатируются на закрытой шахте «Акабира», Япония. |
| Ingersoll-Rand / Рекуперативная микротурбина для обедненной газовой смеси | Рекуперативная микротурбина для обедненной газовой смеси (1-процентный ВМ) | США | Установка мощностью 70 кВт установлена на шахте Bailey Mine корпорации CONSOL и утилизирует вентиляционный метан (2007 г.). Две установки мощностью 250 кВт установлены в устье скважины на месторождении Чангин компании PetroChina (2008 г.). |
| EDL / Газовая турбина с карбюратором | Газовая турбина Solar для обедненной газовой смеси, запатентованная камера сгорания (1,6-процентный ВМ) | Австралия | Газовая турбина Solar Centaur мощностью 2,7 МВт проходит тестирование на электростанции Appin компании EDL. |
| EDL / Вспомогательная утилизация метана | ВМ применяется в качестве вспомогательного топлива в смеси с дутьевым воздухом для двигателей Caterpillar мощностью 1,0 МВт. | Австралия | ВМ успешно применяется в качестве вспомогательного топлива в смеси с дутьевым воздухом для двигателей Caterpillar мощностью 1,0 МВт на электростанции Appin. |

качестве дутьевого воздуха для газовых двигателей. Сердцем установки является двигатель MAN электрической мощностью 370 кВт. Двигатель подходит для сжигания нетрадиционных газов и может быть дополнительно оборудован газовым смесителем. Это очень важный фактор – стандартные смесители благодаря своему строению могут производить необходимую для эксплуатации горелок газовую смесь с концентрацией метана 7,2 % из высококачественной метановоздушной смеси и атмосферного воздуха.

Однако для утилизации ВМ требуется смеситель с тремя входными потоками:

- метановоздушная смесь с концентрацией метана свыше 25 %;
- вентиляционный воздух с концентрацией метана менее 4 %;
- атмосферный воздух, не содержащий метана.

Технологическая схема такого газового смесителя приведена на рис. 4.

В зависимости от концентрации метана в газовом потоке, вычисленной аналитически, происходит настройка газовых потоков таким образом, чтобы

на выходе получить концентрацию метана, необходимую для эксплуатации горелки. Концентрация метана в смесительной камере контролируется газоанализатором. При обнаружении слишком высокой концентрации по третьему трубопроводу подается атмосферный воздух для ее снижения. Полученная таким образом газовая смесь подается в двигатель, объем потока регулируется дроссельным клапаном, через который выбрасывается избыток газа.

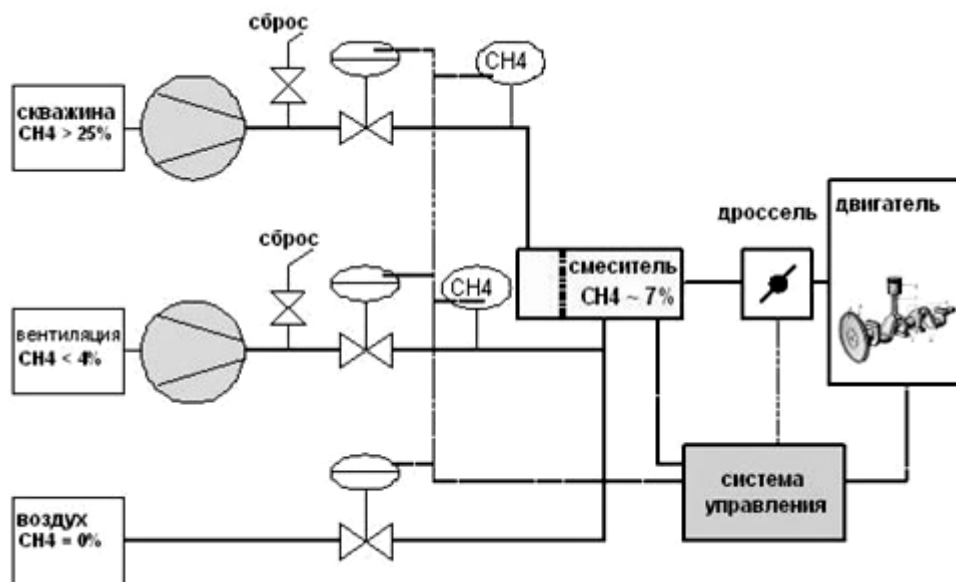


Рис. 4. Технологическая схема испытательной установки на шахте им. С.М. Кирова, Россия

Важным требованием к конструкции испытательной установки была возможность перемещать ее при продвижении очистных работ и соответственном изменении качества газа в отдельных скважинах. Это требование было выполнено благодаря контейнерному исполнению.

На рис. 5 показана испытательная установка на шахте им. С.М.Кирова. На рис. 5,а изображена установка полностью. Цифрой 1 обозначен контейнер. Под номером 2 – компрессорная установка для дутьевого воздуха с концентрацией метана менее 3%, 3 – компрессорная установка для метановоздушной смеси с концентрацией CH₄ более 25%. Слева на фото – скважина В1, из которой добывается газ с низкой концентрацией CH₄. Трубопровод справа ведет к скважине В2, из которой добывается газ с концентрацией метана свыше 25%. Как правило, концентрация CH₄ превышает 70%.

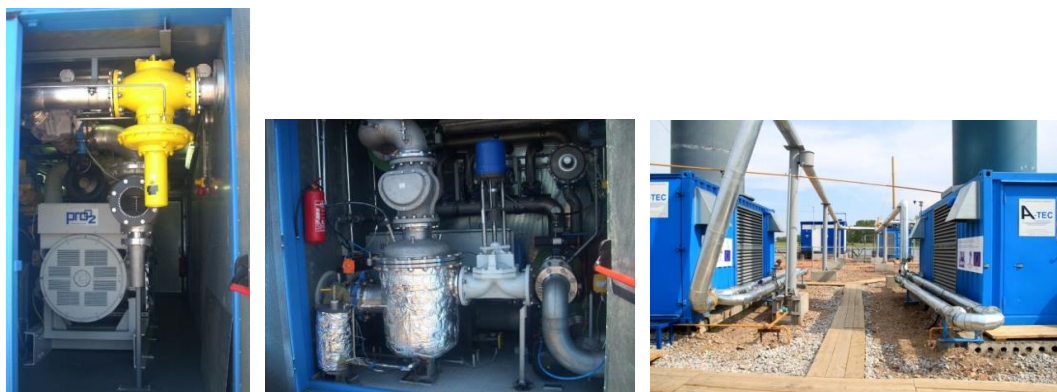
На рис. 5,б показан узел подачи дутьевого воздуха в отсек двигателя. Желтый вентиль, регулирующий давление, обеспечивает немного пониженное давление на всасывании воздуха, чтобы газозвушная смесь не попадала в контейнер. Вентиль под ним регулирует дополнительную подачу воздуха, когда количество метановоздушной смеси недостаточное, или для запуска установки.

На рис. 5,а представлен компрессор для бедного газа. Изолированная ёмкость – это водоотделитель, в который может дополнительно подаваться атмосферный воздух, для чего справа установлен специальный регулирующий вентиль. С его помощью можно снизить концентрацию метана в смеси, а также устанавливать концентрацию метана в дутьевом воздухе в испытательных целях.

На рис. 5,б представлены участки измерения количества утилизируемого газа. На заднем плане виден контейнер с двигателем, в который подается газ и дутьевой воздух от двух компрессорных установок, представленных на переднем плане.



а



б

в

г

Рис. 5. Испытательные установки на шахте им. С.М. Кирова, Россия

Сборка и установка испытательного оборудования состоялись в основном летом-осенью 2011 г. Установка была введена в эксплуатацию по окончании заморозков в апреле 2012 г. С мая 2012 г. установка работает без перебоев и поставляет электричество мощностью 0,3 МВт в местную электросеть.

Сжиженный природный газ (СПГ) пригоден для многих целей, в т.ч. как топливо для транспортных средств, для транспортировки в отдаленные районы, для поставки в трубопроводы природного газа. Производство сжиженного метана является целесообразным на объектах, где невозможна поставка электрической и тепловой энергии в коммунальную

сеть. Обязательным условием для такого производства является концентрация метана выше 50 %. Концепция предусматривает производство СПГ на месте добычи метана и транспортировку грузовым транспортом к конечному потребителю (рис. 6), где производится подача в трубопровод или заправка транспортных средств.

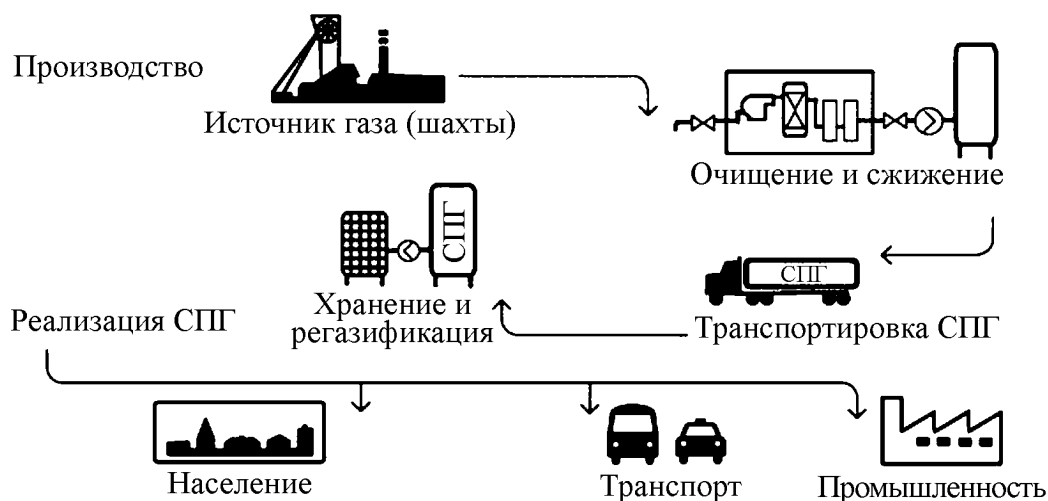


Рис. 6. Схема утилизации ШМ путем сжижения

Перед сжижением шахтный метан должен пройти многоступенчатую очистку и подготовку. На рис. 7 представлена блок-схема демонстрационной установки сжижения метана на шахте Krupinski в Польше. Оборудование было введено в производство в 2011–2012 гг. за счет финансирования ЕС в рамках научно-исследовательского проекта «КоМет». Производитель и оператор установки – фирма LNG-Silesia Sp. z o.o.

Установка состоит из нескольких модулей, включает различные КИПиА, контролирующие процесс производства на всех стадиях. Из дегазационной станции газ поступает в модуль очистки, где происходит отделение воды, соединений серы и хлора, летучих органических компонентов и ртути. Затем очищенный газ подается в следующий модуль, где происходит разрушение кислорода в результате сжигания его с метаном, а затем отделение загрязнений и конденсата. Дополнительно часть шахтного метана может использоваться для производства электроэнергии для компрессоров в КТЭС, расположенной в отдельном модуле далее. До сих пор применяется электричество из местной электросети.

После отделения кислорода газ охлаждается и направляется к модулю, где происходит отделение воды и углекислого газа. Очищенный таким образом газ подается в модуль сжижения, где температура газа доводится до 160°C и ниже. Компрессоры охлаждающей установки расположены в отдельных модулях. Азот отделяется от сжиженного метана в три этапа. Полученный поток, содержащий 95 % метана и 5 % азота, подается в два бака с вакуумной изоляцией. Все выхлопные газы сжигаются в факеле.



Рис. 7. Концепция утилизации ШМ путем сжижения на шахте Krupinski, Польша (Источник: LNG-Silesia Sp. z o.o.)

На рис. 8 представлена демонстрационная установка в Польше. На переднем плане расположен агрегат сжижения. Затем – модуль отделения CO_2 (небольшая голубая и четыре большие серые колонны). За ними расположен модуль 3 – отделение кислорода – и модуль 2 – газоочистка. На заднем плане находится азотный генератор (синий контейнер), а справа – баки для хранения СПГ.



Рис. 8. Демонстрационная установка на шахте Krupinski, Польша

Установка работает с апреля 2012 г. Различные механические проблемы до сих пор не позволили достичь полной производительности. Однако производство СПГ протекает успешно, хотя необходимы дальнейшие ремонтно-оптимизационные работы для достижения желаемого КПД.

В рамках проекта «КоМет» при поддержке ЕС удалось успешно применить технологию утилизации метановоздушной смеси с низким содержани-

ем метана в качестве дутьевого воздуха для газовых двигателей в условиях России. Первая испытательная установка на шахте им. С.М. Кирова запущена в апреле 2012 г. и производит электричество для поставки в местную электросеть. Контейнерное исполнение установки позволяет сравнительно легкую перевозку и установку на других объектах, т.е. пространственное смещение утилизации метана вместе с движением очистных работ. Таким образом, стала возможной рациональная утилизация вентиляционного воздуха с низкой концентрацией метана из российских шахт.

В то же время на шахте Krupinski в Польше удалось успешно продемонстрировать производство СПГ из шахтного метана. По сравнению с установкой в России, перемещение данного оборудования вдоль выемочного штрека затруднено из-за сложности состава установки. Однако установка сжижения метана представляет собой ценное дополнительное оборудование для утилизации шахтного метана высокой концентрации с получением энергии для объектов с плохо налаженной инфраструктурой (отсутствием связи с газовой и электрической сетью). При этом особенно интересной, хотя на данный момент не широко распространенной технологической альтернативой является применение СПГ в качестве топлива для грузовых автомобилей.

В заключение следует отметить, что обе технологии утилизации прошли успешное испытание в условиях России и Польши. Однако в каждом конкретном случае необходимо отдельно исследовать возможность применения (в особенности с учетом экономических условий).

Глоссарий

МУП (метан угольных пластов) – метан, который образуется в процессе углефикации и содержится в угольных пластах и вмещающей породе.

ШМ (шахтный метан) – метан, который высвобождается в процессе подземных очистных работ.

ГИМ (глобальная инициатива по метану) – международное партнерство с целью усиленной утилизации метана (основывается на инициативе «Метан – на рынки»).

СПГ (сжиженный природный газ).

Выражаем благодарность Европейскому Союзу за финансовую поддержку проекта (Договор № TREN/FP7/EN/218935).

1. Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020, Агентство по охране окружающей среды США EPA, исп. ред. июнь 2006 г.
2. Karaca S.O., et al; Coal mine methane: A review of capture and utilization practice with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction, International Journal of Coal Geology 86 (2011) 121–156.

3. Ventilation Air Methane (VAM) Utilization Technologies, Агентство по охране окружающей среды США EPA, Технологическая серия программы Coalbed Methane Outreach Program, сентябрь 2009, www.epa.gov/cmop.
4. Black, D., Aziz, N. Reducing Coal Mine GHG Emissions Through Effective Gas Drainage and Utilisation, Конференция предприятий угольной промышленности, 2009 г., Воллонгонгский университет и Австралийский институт горной промышленности и металлургии, 2009 г., 217–224.