



Концепция крупномасштабного развития инновационных систем производства и распределения метано-водородного топлива как эффективного альтернативного энергоносителя

Олег Е.Аксютин, Александр Г.Ишков, **ОАО «Газпром»**

Валерий Г.Хлопцов, Вараздат А.Казарян, **ООО «Подземгазпром»**,

Анатолий Я.Столяревский, Центр КОРТЭС

Ключевые слова: Метано-водородное топливо, системы транспортировки газа, экологические требования, технология адиабатической конверсии, газовые турбины

Введение

Важным обстоятельством, определяющим неизбежность перехода к массовому использованию новых энергетических технологий, является качественное изменение экологических требований в энергетической сфере и на транспорте, предъявляемых законодательствами развитых государств. По мере перехода к новым стандартам в сфере экологии экономика и рынки развитых государств могут быть постепенно закрыты для стран или отдельных компаний, не придерживающихся установленных требований. По существу речь идет о формировании группой развитых государств, в период до 2025 – 2030 г.г., технологических и финансово – экономических основ нового экономического уклада, позволяющего обеспечить потребности мирового сообщества в качественных видах топливно – энергетических ресурсов, при максимально возможном ограничении экологического ущерба.

В число основных принципов нового экономического уклада входят:

- диверсификация внешних источников энергоснабжения развитых государств, обеспечение их стабильности и высокой устойчивости, в т.ч. с использованием процедур национальной и коллективной безопасности, ресурсов военно – политических союзов,
- перенос экологически неблагоприятных и энергоемких предприятий в контролируемые страны «третьего мира»,
- применение высокоэффективных и экологически чистых энергетических технологий, создание качественно новой технологической базы в энергетике,
- расширенное использование возобновляемых источников энергии.

Возрастание роли природного газа в региональной и мировой энергетике требует создания технологий повышения эффективности и расширения сфер применения природного газа.

Среди технологий, основанных на инновационных решениях, одну из ключевых ролей занимает применение в газовой промышленности инновационных водородосодержащих энергоносителей, производимых из природного газа и создающих эффективные направления экономии природного газа на базе отработанных промышленных технологий, процессов и катализаторов. Такой технологией становится создание эффективного производства метано-водородных смесей (МВС) с содержанием водорода от 20 до 44-48%.

Концепция технологии применения метано-водородного топлива

Анализ Международного энергетического агентства, выполненный в 2011 г., показал, что объем добычи газа в млрд. т нефтяного эквивалента (т н.э.) к 2035 г. превысит 4 млрд. т н.э. и практически сравняется с вкладом нефти в мировом энергобалансе. Ежегодный спрос на газ возрастает на 2% при росте суммарного потребления энергии на 1,2%.

В дальнейшей перспективе на смену природному газу должно придти водородное топливо. Водород - самое эффективное и экологически чистое топливо (табл. 1). Мировое производство водорода превышает 550 млрд. м³. По низшей теплоте сгорания единицы массы он в 2.75 раза превосходит бензин, имеет более высокий нижний предел и значительно более широкий интервал воспламенения в смеси с воздухом (от 4 до 75 объемных %), на порядок более высокую скорость распространения ламинарного пламени (примерно 3 м/с), более низкие значения энергии инициирования воспламенения стехиометрической смеси (0.018 мДж) и расстояния гашения (0.6 мм) и более высокие температуры сгорания (для ламинарного пламени в воздухе - 2300 К) и самовоспламенения в воздухе (850 К). Эти уникальные свойства водорода обеспечивают возможность повышения КПД тепловых двигателей в 1.5-1.7 раза, причем реальный цикл двигателя при работе на водороде существенно ближе к теоретическому, чем на любом углеводородном топливе. Перевод на альтернативное топливо становится важным этапом применения чистого водорода в качестве топлива для автотранспорта - создание водородного электромобиля с топливным элементом и электроприводом. При этом резко (в 2-4 раза) снижается токсичность выбросов, эксплуатационный расход углеводородного топлива уменьшается на 35-40%, а эксплуатационная экономичность повышается на 20-25%.

Таблица 1. Свойства водорода (при 273,16 К или 0° С)

Наименование параметров	Величина параметров
Плотность, г/л при нормальном давлении при $2.5 \cdot 10^5$ атм при $2.7 \cdot 10^{18}$ атм	0.08987 0.66 $1,12 \cdot 10^7$
Высшая теплотворная способность, кДж/кг	141 800
Температура плавления, ° С	-259.14
Температура кипения, ° С	-252.5
Критическая температура, ° С	-239.92 (33.24 К)
Критическое давление, атм	12.8 (12.80 К)
Теплоемкость, Дж/(моль.К)	28.8 (H ₂)
Температура сгорания, К Скорость сгорания, см/с (ламинарное пламя на воздухе, при стандартных условиях)	2300 300
Расстояние гашения, мм	0.6
Температура самовоспламенения, К	850
Энергия инициирования воспламенения, мДж	0.018
Интервал воспламенения в смеси с воздухом, %%об.	4-75
Относительная теплота сгорания по отношению к бензину, на 1 кг	2.75

Отсутствие технологий производства альтернативного топлива с высоким содержанием водорода сдерживает изменение структуры топливно – энергетического комплекса (ТЭК) в направлении перехода к более устойчивому диверсифицированному энергообеспечению экономики и снижению воздействия промышленности, транспорта и энергетики на окружающую среду.

Разработана и прошла экспериментальную апробацию технология получения метано-водородных смесей (МВС), производимых в процессах адиабатической конверсии метана (АКМ). Разработанная применительно к нагреву от высокотемпературного газоохлаждаемого ядерного реактора (ВТГР) технология АКМ становится инновационным базисом для энерготехнологий переработки природного газа в высокоэффективные энергоносители.

Технология АКМ существенно упрощает промышленный процесс, поскольку не требует производства кислорода и происходит при более низких температурах (до 700 °С), не требует энерго- и капиталозатратного электролиза воды и построена на отработанных в крупнотоннажной химии технологических решениях, режимах и катализаторах.

В предлагаемой технологии конечный продукт - метано-водородная смесь - производится не за счёт смешения природного газа с производимым в отдельной установке чистым водородом, а в одну стадию путём АКМ, что существенно упрощает и удешевляет производство.

Эффективность технологической установки в значительной степени зависит и от весогабаритных характеристик основного и вспомогательного оборудования, а также общей схемы процесса. При этом важна не только собственно технологическая схема установки, но и её энергетическая составляющая, позволяющая органически наиболее оптимальном путем использовать преимущества высоких параметров ведения технологического процесса.

При разработке технологической концепции учитывался опыт, накопленный в процессе промышленного внедрения двухступенчатого процесса парокислородной конверсии по схеме «ТАНДЕМ», а также опыт разработки процесса АКМ с высокотемпературным гелиевым реактором МГР-Т.

При производстве метано-водородной смеси, в качестве критерия целесообразности выбрана энергоёмкость производства.

Для производства метано-водородной смеси как топлива из природного газа, позволяющего снизить энергоматериальные затраты на производство МВС в сравнении с традиционными методами, используется процесс АКМ.

Сырьём для производства этого продукта является природный газ; энергоносителем – дымовые газы продуктов сжигания газа. Готовая продукция: метановодородная смесь с содержанием водорода 48%, сжатая до давления от 2 до 7 МПа.

При работе на природном газе с производством МВС без сторонних энергоносителей в процессе АКМ выход МВС с содержанием водорода 48% составляет 1500 м³ на 1000 м³ природного газа.

Технология производства метано-водородной смеси

В энерготехнологической схеме производства метано-водородной смеси приняты технические решения, направленные на достижение минимального расхода энергии и максимальной производительности.

Технологическая схема производства МВС показана на рис. 1.

Природный газ, очищенный от сернистых соединений поступает в узел смешения с водяным паром. Водяной пар поступает из котла-утилизатора. Природный газ с водяными парами при температуре примерно 450°С поступают в огневой подогреватель. На выходной линии огневого подогревателя температура смеси составляет примерно 680 °С. С такой температурой смесь поступает в адиабатический реактор. В реакторе, благодаря адиабатической конверсии метана, получаем метано-водородную смесь и водяные пары с температурой примерно 590 °С. Так как в адиабатическом реакторе часть воды тратится для

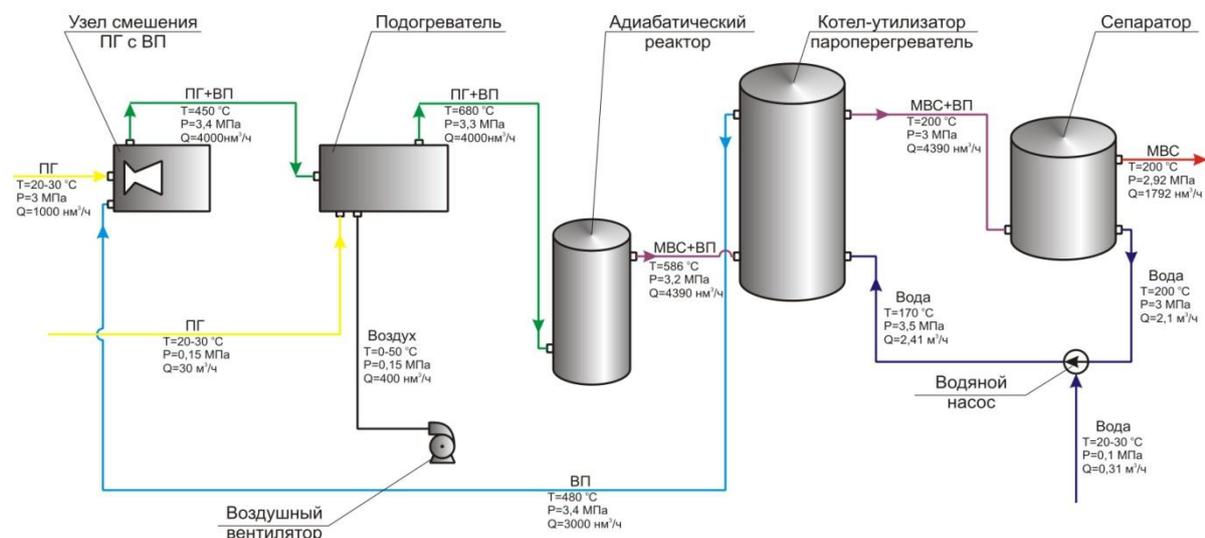
получения водорода, производится постоянная подпитка воды в систему. Перед тем как попасть в систему вода проходит через фильтр.

Все расходные показатели по природному газу, метано-водородной смеси, водяному пару и воде показаны на схеме.

Применение метано-водородных смесей с высоким содержанием водорода (до 50%) в качестве топливного газа на строящихся, а также на действующих компрессорных станциях (КС) с газоперекачивающими агрегатами (ГПА), подлежащими реконструкции, позволит существенно улучшить как эксплуатационные характеристики и снизить расход топливного газа, значительно снизит эмиссионные показатели.

Такая работа должна учитывать различные варианты конструктивного выполнения заменяющих агрегатов при одновременной высокой унификации блоков производства МВС, ориентированных на наиболее массовые представительные проекты.

Схема установки по получению метано-водородной смеси (МВС)



ПГ - природный газ
 МВС - метано-водородная смесь
 ВП - водяной пар

Рис. 1. Принципиальная схема установки получения метано-водородной смеси с помощью технологии АКМ

На рис. 2 представлена диаграмма изменения требуемой температуры конверсии метана в метано-водородную смесь в зависимости от активности катализатора для получения конечного содержания водорода в сухой смеси – 42-48% (объемный). Как видно из представленной диаграммы при увеличении активности катализатора всего в два раза температура конверсии метана уменьшается на 25 градусов.

В данной установке при подаче на вход природного газа в количестве $1000\text{ нм}^3/\text{ч}$, а на выходе из установки получают метано-водородную смесь в количестве $1792\text{ нм}^3/\text{ч}$.

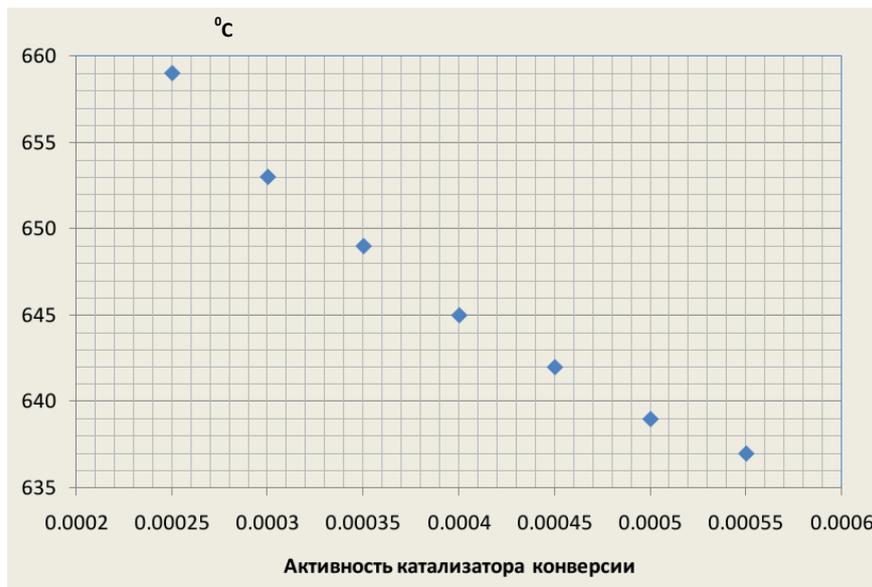


Рис. 2. Значение требуемой температуры конверсии метана в МВС (°C) в зависимости от активности катализатора

Таким образом, согласно расчетам, температуры конверсии метана в МВС лежат в интервале 637-659°C, в зависимости от активности применяемого катализатора. Поскольку активность катализатора является эмпирической величиной и может отличаться от принятых значений, а также может снижаться в ходе эксплуатации, предусмотрена возможность подогрева поступающей на конверсию парогазовой смеси (ПГС) до температур выше расчетной.

Содержание водорода в МВС может изменяться от 0 до 44-48% как путем изменения температуры нагрева парогазовой смеси (рис.4), так и путем разбавления товарной МВС природным газом.

Содержание водорода в МВС может изменяться от 0 до 44-48% как путем изменения температуры нагрева парогазовой смеси (рис.3), так и путем разбавления товарной МВС природным газом.

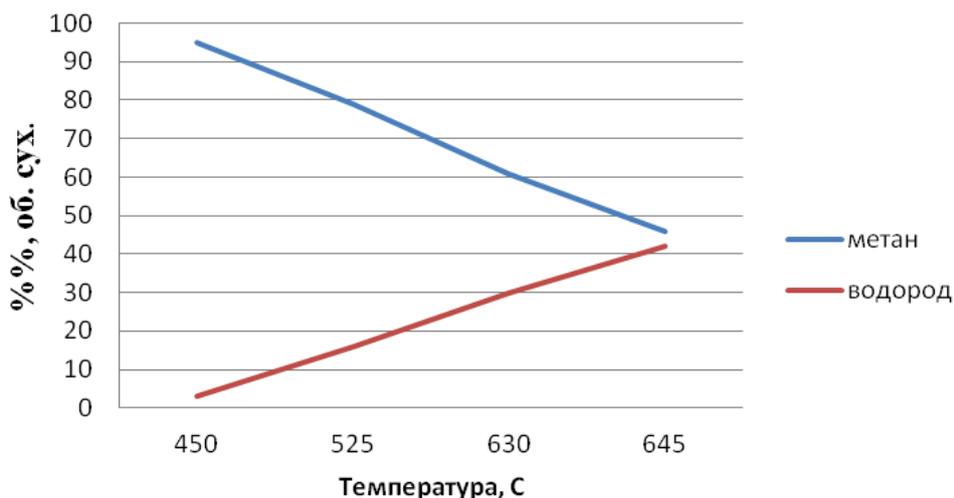


Рис. 3. Изменение содержание водорода и метана в МВС в зависимости от температуры нагрева парогазовой смеси

Повышение содержания водорода в МВС позволяет при относительно небольшом снижении индекса Воббе существенно уменьшить эмиссию CO₂ за счет вывода углекислоты в

процессе АКМ (табл.2). В соответствии с представленными данными в табл. 2, при содержании водорода в МВС - 48% (объемных), относительная эмиссия CO₂ - 76%.

Таблица 2. Значения индекса Воббе и относительного выброса CO₂ с изменением содержания водорода в МВС

МВС (H ₂ -содержание [% об.])	Относительный индекс Воббе [%]*	Относительная. эмиссия CO ₂ , %
0	100	100
10	97.4	96.65
20	94.7	92.73
30	92.0	88.00
40	89,3	83.28
60	84,2	68.86
80	80,4	45.33
100	85,0	0

*Индекс Воббе (W) определялся как $W = \text{HHV}_{\text{H}_2} / \sqrt{d}$, HHV_{H_2} – высшая теплота сгорания газа, МДж/ м³, d-плотность газа, кг/м³.

Применение МВС как топлива для газотурбинной техники

Продуцируемая метано-водородная смесь может применяться в качестве топлива в газотурбинном приводе. Определены компонентные составы исходного продукта - природного газа и товарного газа на выходе из установки получения МВС (табл. 3).

Таблица 3. Компонентный состав входного и выходящего продукта в технологии АКМ с получением МВС

Компонентный состав, % объем (влажн.)	вход	выход
	Природный газ	Метано-водородная смесь (влажная)
Диоксид углерода, CO ₂	0,065	3,262
Оксид углерода, CO	0,000	0,233
Водород, H ₂	0,000	13,621
Азот, N ₂	0,780	0,145
Аргон, Ar	0,000	0,000
Вода, H ₂ O	0,000	67,694
Метан, CH ₄	98,836	15,045
Этан, C ₂ H ₆	0,242	0,000
Пропан, C ₃ H ₈	0,055	0,000
Бутан, C ₄ H ₁₀	0,016	0,000
Пентан, C ₅ H ₁₂	0,006	0,000
Всего	100,000	100,000

Входящий продукт (природный газ) в основном состоит из метана (99%). Выходящий продукт является смесью трех компонентов: водяного пара - 67,7% (об.), водорода – 13,6% (об.) и метана – 15%. Повышенное содержание по сравнению с входящим продуктом имеют: диоксид углерода – 3,3% и оксид углерода – 0,233%. Однако при использовании МВС в качестве топливного газа выбросы CO₂ и CO уменьшаются в полтора раза. Это связано с

тем, что часть водорода, содержащегося в МВС, получается из воды, а также уменьшается на 30-40% количество используемого топливного газа.

При создании на компрессорных или электрических станциях с современными ГТУ блоков утилизации тепла на основе АКМ с производством МВС КПД может быть повышен выше 50% даже без применения регенерации и паровых энергоустановок, а при подключении тепловых отопительных нагрузок полезное использование газа может быть доведено до 60-62% при резком снижении эмиссионных показателей ниже 10–25 ppm (20–50 мг/м³) по NO_x, а также устранение выбросов HCN (синильной кислоты) и этилена.

В последние 10÷15 лет отечественные и зарубежные газотурбинные фирмы ведут интенсивную работу по созданию камер сгорания с организацией сжигания предварительно перемешанных топливовоздушных смесей с коэффициентом избытка воздуха в зоне горения ($\alpha_{фр}$) до 1,9÷2,5. При внедрении этого способа сжигания в камерах сгорания практически всех ведущих газотурбинных фирм получены концентрации оксидов азота на рабочих режимах не выше 8÷25 млн⁻¹ (O₂=15 %).

Однако при отработке и эксплуатации камер сгорания с сжиганием «бедных» гомогенных топливовоздушных смесей возникают серьезные проблемы по обеспечению ее надежной эксплуатации и получения гарантированных показателей по вредным выбросам.

Роль водородной компоненты в метано-водородном топливе - снять ограничения на состав топливно-воздушной смеси и повысить устойчивость горения «сверхбедных» смесей.

Важно также то, что повышенное содержание водорода (до 40-44%) в метано-водородном топливе позволяет снизить углеродный индекс топлива и уменьшить выбросы углекислого газа и других парниковых газов.

Эксперименты, проведенные в 2011 г., показали, что добавление к метану водорода расширяет пределы его горения. В частности добавка 10% водорода сделала смесь воспламеняемой с коэффициентом избытка топлива $\phi = 0.43$ (рис. 4). Если без водорода такая смесь воспламенялась только при начальном давлении 10 атм. Добавление 20% водорода делает горение смеси устойчивым и при нормальном давлении (рис. 5).

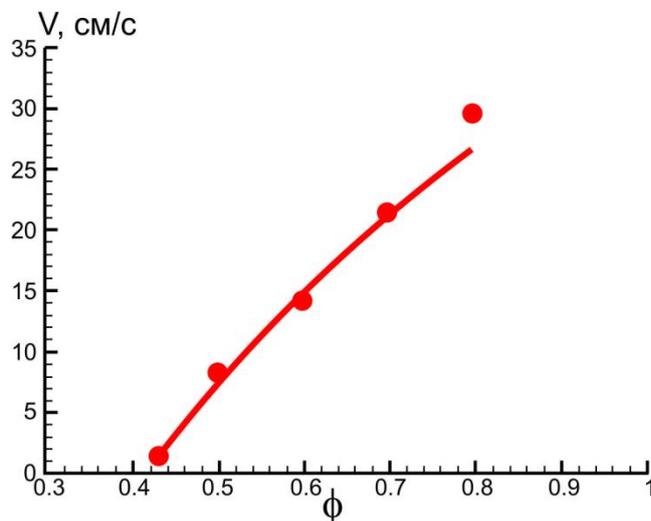


Рис. 4. Зависимость нормальной скорости горения метано-водородной смеси (10%Н₂+90%СН₄) при P₀=1 атм., T₀=22⁰С от коэффициента избытка топлива ϕ .

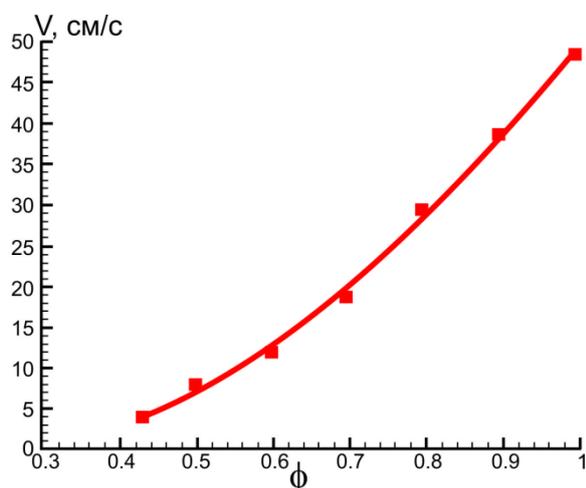


Рис. 5. Зависимость нормальной скорости горения метано-водородной смеси (20% H_2 +90% CH_4) при $P_0=1$ атм., $T_0=22^\circ C$ от коэффициента избытка топлива ϕ .

МВС устойчиво сгорает даже при значительном содержании (20-30%) паров воды, как показано на рис.6, что позволяет также использовать водяной пар для снижения эмиссии, повышения мощности и КПД газовых турбин. Из полученных результатов модельных расчетов и экспериментальных данных следует, что с увеличением концентрации водяного пара максимальная концентрация оксидов азота и углерода снижается.

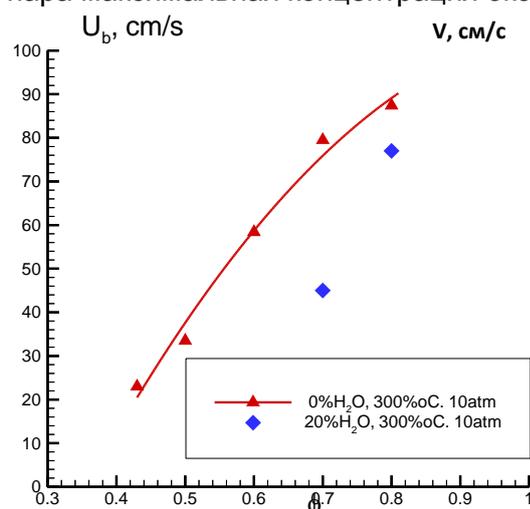


Рис.6. Влияние добавки 20% паров воды на нормальную скорость горения смеси 20% H_2 +80% CH_4 в воздухе при $P = 10$ атм и $T_0 = 300^\circ C$

Для газотурбинных установок (ГТУ) малых мощностей технологически трудно создать турбомшины с высокими к.п.д., организовать эффективные системы охлаждения горячих частей ГТУ. При модернизации таких машин применение МВС оказывается наиболее целесообразным.

Для агрегатов с относительно низкими начальными к.п.д. перевод на МВС позволяет повысить эффективность использования газа на 20-25% и снизить выбросы NO_x более чем на порядок.

Создание новых ГПА, конструктивно отличающихся от старых приводов и отвечающих современным эксплуатационным требованиям, ведется с учетом последних требований газовой промышленности для использования при реконструкции существующих и строительстве новых компрессорных станций ОАО "Газпром".

Во всех программах по модернизации турбоагрегатов, в том числе при создании современных ГПА, неизменным условием остается обеспечение высокой эффективности, надежности и экологической безопасности новых установок.

Основная задача реконструкции - обеспечение требуемых потоков газа. При этом желательно устанавливать газоперекачивающие агрегаты повышенной единичной мощности. Средняя мощность всех агрегатов, работающих на одну трубу диаметром 1420 мм с суточным расходом газа 90-95 млн м³, составляет 80-85 МВт.

Отработку режимов работы и конфигурации комплекса ГПА-блок МВС намечено выполнить в период 2012-2013 гг. на опытно-промышленной установке применительно к характеристикам ГТУ-25П.

Эффективность применения МВС в газотурбинных агрегатах

Для новых мощных ГПА применение МВС позволяет в зависимости от проектных решений снизить расход газа на 8-16% и снизить выбросы NO_x до уровня ниже 25 мг/нм³.

При производстве электроэнергии с помощью ГТУ применение водорода и МВС также характеризуется высокой эффективностью.

Максимальная единичная мощность ГТУ достигла к настоящему времени 300 МВт, к.п.д. при автономной работе составляет 36-38 %. В многовальных ГТУ, созданных на базе авиадвигателей с высокими степенями повышения давления, к.п.д. достигает 40% и более, начальная температура газов - 1300-1500 °С, степени сжатия - 20-30.

В ГТУ освоено «малотоксичное» сжигание природного газа. Оно наиболее эффективно в камерах сгорания, работающих на предварительно подготовленной гомогенной смеси газа с воздухом при больших ($\sigma=2-2,1$) избытках воздуха и с равномерной и сравнительно невысокой (1500-1550 °С) температурой факела. При такой организации горения образование NO_x удается ограничить 20-50 мг/м³ при нормальных условиях (стандартно они относятся к продуктам сгорания, содержащим 15% кислорода) при высокой полноте сгорания (концентрации CO < 50 мг/м³). Проблема заключается в сохранении устойчивости горения и близких к оптимальным условиям горения при изменении режимов.

Сформулированные выше результаты показывают, что ресурсы дальнейшего совершенствования процесса сгорания практически исчерпаны, и перспективы улучшения экономических и экологических характеристик ГТД следует связывать с применением водорода в сочетании с метаном или другим дешевым горючим.

По отечественным исследованиям, в т.ч. ИХФ РАН, делается утверждение о невозможности радикально решить проблему перехода на бедное горение при использовании однородных (идеально перемешанных) смесей: такие смеси просто не могут устойчиво воспламеняться в режимах низких нагрузок реальной камеры сгорания газовой турбины независимо от ее конструкции. Этот тезис подтверждается также и имеющимися данными о расширении эффективного бедного предела при неидеальном смешении. В то же время результаты указывают на возможность резкого улучшения характеристик процесса сгорания при использовании водорода в качестве топлива или его компонента (совместно с углеводородным топливом). Создание оптимальной схемы процесса сгорания с использованием водорода в качестве добавки к основному (углеводородному) горючему является предметом исследований, проводимых в настоящее время за рубежом, и будет оставаться актуальным в обозримой перспективе ввиду экологических преимуществ водорода. В связи с общей тенденцией роста цен на нефть особое внимание уделяется исследованию горения и разработке газотурбинных двигателей (ГТД) для смесей водорода с метаном (hythane). При создании на электростанциях с современными ГТУ блоков утилизации тепла на основе АКМ с производством МВС к.п.д. может быть повышен выше 50% даже без применения регенерации и паровых энергоустановок, а при подключении тепловых отопительных нагрузок полезное использование газа может быть доведено до 60-62% при резком снижении эмиссионных показателей до 10-25 ppm (20-50 мг/м³).

В состав установки помимо газовой турбины целесообразно включить паровой котёл-утилизатор, контактный конденсатор. Теплота выхлопных газов газовой турбины утилизируется в теплообменнике для нагрева парогазовой смеси, используемой для получения смеси водяного пара и метано-водородной смеси, которая впрыскивается в камеру сгорания, а часть поступает на охлаждение элементов газовой турбины. Из выхлопных газов конденсируются водяные пары, полученный конденсат поступает на технологию. Общий коэффициент использования теплоты топливного газа может быть доведен до 75-80%.

Утилизация теплоты уходящих газов является одним из основных направлений повышения эффективности газотурбинных установок и в настоящее время активно проводятся работы в этом направлении. Созданные когенерационные и парогазовые установки позволяют существенно повысить эффективность использования энергии топлива. Разработаны и поставляются уникальные контактные газопаротурбинные установки с генерацией воды в цикле - «Водолей». Дальнейшее совершенствование таких установок ведется в направлении повышения степени утилизации теплоты уходящих газов. В этой связи, наиболее перспективно - эффективное использование технологий термохимической регенерации теплоты, которые позволяют получить метано-водородное топливо, обладающее рядом преимуществ. Интеграция технологий «Водолей» и низкотемпературной паровой конверсии метана позволит создать газотурбинную установку нового типа с высокими энергетическими и экологическими показателями (технология «Тандем») с учетом опыта использования водородосодержащих газов в качестве топлива ГТУ (рис. 7). В частности, с июля 2005 г. на Мозырском НПЗ эксплуатируется когенерационная газотурбинная электростанция ГТЭ-15, использующая в качестве топлива газ с содержанием водорода до 26 % (об.).

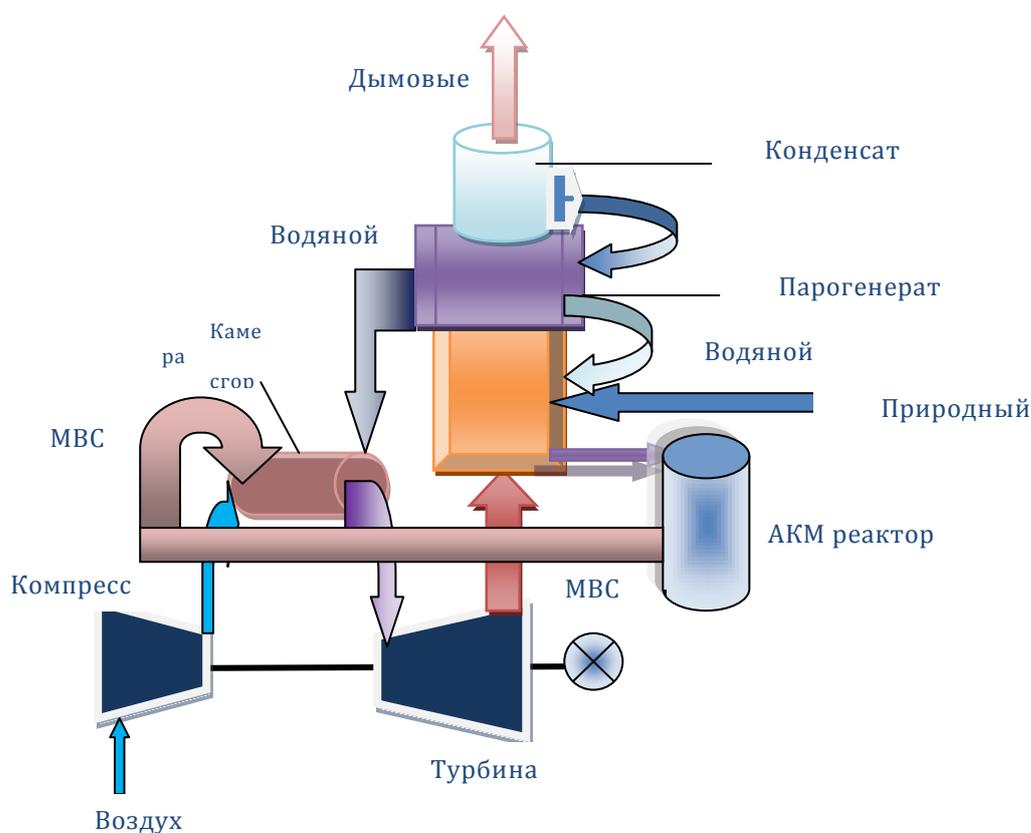


Рис. 7. Схема ГТУ с МВС (технология «Тандем»)

По имеющимся данным оценки характеристик ГТУ типа «Тандем» показывают, что увеличение мощности установки по сравнению с базовой ГТУ может составить до 70-80%, снижение расхода топлива – до 35-40% при одновременном резком снижении эмиссии NO_x (в 4-8 раз).

Применение МВС в энергетике

В производстве отопительного тепла на котельных агрегатах качественно сжечь природные углеводородные топлива можно лишь при чрезвычайно форсированном ведении процесса горения. Интенсификация сжигания жидкого топлива позволяет осуществить полное горение практически при стехиометрическом соотношении воздуха и топлива /коэффициент избытка воздуха $\sim 1,0$ /, тогда как для обычных энергоустановок нормальным считается избыток воздуха 1,15 - 1,25. К.п.д. котельного агрегата при уменьшении коэффициента избытка

воздуха на 0,1% увеличивается на 1%. Расчеты показывают, что если в камерных печах с температурой уходящих газов 400 - 500 °С снизить коэффициент расхода воздуха в горелочных устройствах с 1,2 до 1,05, то только это мероприятие обеспечило бы экономию топлива в количестве не менее 15 -20 %, т.е. превысило в несколько раз энергозатраты на конверсию природного газа для производства МВС. При сжигании МВС вместо природного топлива энергия расходуется не только на улучшение качества топлива, но и воздействует на факел, турбулизируя последний, и улучшает перемешивание сжигаемой среды.

Данное преимущество, получаемое за счет улучшения качества топлива и воздействия на факел сжигаемого топлива, а так же свойств водорода, позволяет использовать высокообводнённое нестандартное жидкое топливо, нефтесодержащие отходы с содержанием механических примесей размером до 2 мм в качестве добавки к основному газовому топливу, повысить к.п.д. котла как минимум на 2-3 % за счет снижения потерь теплоты с теплом отходящих дымовых газов, активизации теплообмена и снижения коэффициента избытка воздуха. Снижение выбросов оксидов азота достигает до 70 % при номинальном режиме работы котельного агрегата.

Применение МВС на транспорте

Перевод на альтернативное топливо становится важным этапом применения чистого водорода в качестве топлива для автотранспорта — создание водородного электромобиля с топливным элементом и электроприводом. В этом случае к.п.д. двигательной установки на водороде при городском цикле езды (с многочисленными остановками, торможениями и ускорениями) может достигать 50-55%, что почти в 2-2.5 раза превышает к.п.д. бензинового двигателя внутреннего сгорания, и обеспечивается полное отсутствие вредных выбросов.

Опытная эксплуатация автомобилей на альтернативном топливе, осуществлявшаяся в стране и за рубежом, показала перспективность перевода автотранспорта на метано-водородные смеси с содержанием водорода от 5% до 10% по весу (20-40% по объему). При этом резко (в 2-4 раза) снижается токсичность выбросов, эксплуатационный расход углеводородного топлива уменьшается на 35-40%, а эксплуатационная экономичность повышается на 20-25%.

Использование *Nythane* на автобусах в Калифорнии показало, что выбросы оксидов азота снижаются на 50%, метана на 16%, углеводородов на 23%, CO_2 на 7% в сравнении с автобусами, работающими на природном газе.

Если перевод автотранспорта на природный газ позволяет обеспечить нормы Евро-3 и (с переходом на новые усовершенствованные двигатели) также и Евро-4, то метано-водородные смеси (МВС) при доле водорода не менее 20% даже на существующих двигателях выполняют нормы Евро-4, а при повышении доли водорода в смеси до 44-48% (смеси типа МВС) выполняют нормы Евро-5.

Эффективность снижения вредных выбросов при использовании метано-водородных смесей (МВС) выше, чем при прямом использовании водорода сравнимого объёма. Дело в том, что при переводе, например, 10% автопарка на чистый водород (снижающий выбросы, практически, до 0) общий эффект снижения выбросов всего автопарка равен 10%, то при использовании МВС с содержанием водорода 10%вес. на всех транспортных средствах этого автопарка общее снижение выбросов всего автопарка составляет 50%, т.е. эффективность применения водорода возрастает в 5 раз.

В отличие от водорода, используемого в топливных элементах, где жёстко ограничиваются примеси (особенно монооксида углерода) и требуемая чистота достигает 99,9999%, в смесях типа МВС требования к чистоте не являются столь жёсткими, поскольку большая часть примесей является компонентами топлива и сжигается в основном процессе двигателя.

В качестве важных энергоёмких потребителей метано-водородных смесей в экономике необходимо учитывать металлургию, в первую очередь, - бескоксую и цветную, крупнотоннажную химию, в первую очередь, - азотную (аммиак и его производные, метанол), а также нефтепереработку и нефтехимию, потребление водорода в которых растёт в связи с повышением качества и расширением линейки продуктов.

Таким образом, централизованная магистральная поставка и широкое применение метано-водородных смесей станет закономерным этапом перевода экономики на экологически

чистые водородные технологии с существенным улучшением состояния окружающей среды и снижением расхода природных минеральных ресурсов.

Промышленные технологии, основанные на МВС

В процессе адиабатической конверсии метана состав исходного сырьевого газа нормализуется с преобразованием высших гомологов метана в водород. Это позволяет рассматривать процесс получения МВС как эффективное средство диверсификации газовой отрасли с получением альтернативного газового топлива нормализованного состава из различного сырья, в том числе – газового конденсата, попутных газов, газов коксохимии, сланцевого газа и других источников газа с ненормализованным составом.

Более того, состав МВС с высоким содержанием водорода позволяет применять ее как эффективное топливо для установок прямого электрохимического получения энергии в высокотемпературных твердооксидных топливных элементах – ТОТЭ (SOFC) с КПД до 60% в режиме электрогенерации и КПД до 80% в режиме когенерации тепла и электроэнергии. Такая технология создает переход к дальнейшим секторам так называемой Водородной экономики, в том числе - автотранспорту с практически нулевыми выбросами.

В ряде стран (Франция, Канада, Швеция, Индия, Австралия и др.) успешно проходит применение МВС на автотранспорте с двигателями внутреннего сгорания.

На острове Амелан (Нидерланды) в период 2007-2011 г. проходил важный масштабный эксперимент с подачей потребителям ЖКХ метано-водородного топлива с содержанием водорода до 20%, которое не вызвало каких-либо отклонений от принятых регулирующих норм по природному газу.

Метано-водородное топливо может быть преобразовано в дальнейшем в синтез-газ для применения в процессах газохимии (GTL), либо из него может быть выделен водород как целевой продукт для различных отраслей с помощью методов PSA (короткоциклового адсорбции) или мембранных крупнотоннажных технологий, освоенных в мировой практике. Такие широкие возможности применения МВС как альтернативного газового топлива, состоящего из метана и водорода, позволяют рассматривать эти технологии как отдельную технологическую платформу централизованного производства газового топлива не только для локальных и региональных сфер его применения, но и для поставок по отдельным энергетическим коридорам в транснациональные газотранспортные сети и создания запасов этого топлива в подземных газохранилищах (ПГХ).

Диоксид углерода (CO_2) в технологии АКМ легко извлекается при высоком давлении, поэтому можно ожидать также эффективную поддержку механизмов и технологий CCS (система секвестрирования углерода), инструментов ETS (системы торговли выбросами (эмиссией)), в том числе в рамках «дорожной карты» ЕС в сфере энергоснабжения до 2050 года.

Выводы

1. Природный газ является одним из ключевых энергоносителей в мировой глобальной энергетике XXI века, роль которого с каждым годом увеличивается, благодаря его эксплуатационным особенностям.
2. В дальнейшей перспективе на смену природному газу должно придти водородное топливо. Водород – самое эффективное и экологически чистое топливо.
3. В России разработана технология адиабатической конверсии метана (АКМ), производящая метано-водородное топливо (МВС) с содержанием водорода до 48%. Данная технология существенно упрощает промышленный процесс получения водорода, поскольку не требует производства кислорода и происходит при более низких температурах (до 680°C).
4. Проведенные эксперименты показали, что повышение содержания водорода в МВС:
 - расширяет пределы его горения;
 - делает горение смеси устойчивым и при нормальном давлении;
 - смесь сгорает при значительном содержании водяных паров (20-30%);

- позволяет при относительно небольшом снижении индекса Воббе существенно уменьшить эмиссию CO_2 за счет вывода углекислоты в процессе АКМ.

5. Интеграция технологий утилизации теплоты уходящих газов и низкотемпературной адиабатической конверсии метана позволит создать газотурбинную установку нового типа с высокими энергетическими и экологическими показателями (технология «Тандем»). Увеличение мощности газотурбинной установки по сравнению с базовой ГТУ может составить до 70-80%, снижение расхода топлива – до 35-40% при одновременном резком снижении эмиссии NO_x (в 4-8 раз).

6. Разработанная технология по производству МВС позволяет:

- рассматривать процесс получения МВС как эффективное средство диверсификации газовой отрасли с получением альтернативного газового топлива нормализованного состава из различного сырья, в том числе – газового конденсата, попутных газов, газов коксохимии, сланцевого газа и других источников газа с ненормализованным составом;

- применять МВС как эффективное топливо для установок прямого электрохимического получения энергии в высокотемпературных твердооксидных топливных элементах – ТОТЭ (SOFC) с КПД до 60% в режиме электрогенерации и КПД до 80% в режиме когенерации тепла и электроэнергии, создавая переход к дальнейшим секторам так называемой Водородной экономики, в том числе - автотранспорту с практически нулевыми выбросами;

- рассматривать эти технологии как отдельную технологическую платформу централизованного производства газового топлива не только для локальных и региональных сфер его применения, но и для поставок по отдельным энергетическим коридорам в транснациональные газотранспортные сети и создания запасов этого топлива в подземных газохранилищах (ПГХ);

- получить эффективную поддержку механизмов и технологий CCS (система секвестрирования углерода), инструментов ETS (системы торговли выбросами (эмиссией), в том числе в рамках «дорожной карты» ЕС в сфере энергоснабжения до 2050 года.