

УДК 661.961 (045)

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-101-108

Сравнение различных технологий производства водорода из природного газа

Н. А. Мезаал, аспирант, Институт энергетики,

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

А. А. Калюттик, кандидат технических наук, доцент, Институт энергетики,

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

А. С. Салман, кандидат технических наук, доцент, Киркукский технический колледж,

Северный технический университет, Киркук, Ирак

Л. М. Абдали, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности

Севастопольского государственного университета, Россия, Севастополь

В данной статье представлен обзор текущего состояния и перспектив развития современных технологий, связанных с использованием водорода в энергетике. В ходе исследования рассмотрены наиболее распространенные методы получения водорода из природного газа. Паровая конверсия метана (SMR) описывает метод, при котором метан превращается в водород и диоксид углерода при высоких температурах. Частичное окисление (POX) представляет собой технологию, которая основана на контролируемом окислении метана, что приводит к формированию смеси водорода, окислительного газа и других компонентов. Автотермический риформинг – это процесс, который объединяет характеристики паровой конверсии и частичного окисления, что значительно повышает эффективность производства водорода. В статье также рассматриваются ближайшие перспективы развития данных технологий в области водородной энергетики. Однако промышленное применение этих технологий требует высокого уровня НИОКР в масштабе опытного предприятия. Также в статье обсуждаются глобальная энергетическая система, источники энергии, история открытия водорода и методы его производства. Рассматриваются вопросы, связанные со способами технологий производства водорода, с акцентом на технологии получения водорода из природного газа. Путем сравнения преимуществ и недостатков каждой технологии, как объяснялось в последней части работы, было сделано несколько важных выводов. Технология паровой конверсии метана SMR имеет самую высокую скорость производства водорода среди трех технологий. Скорость реакции каталитического парциального окисления метана самая высокая, однако для процесса реакции требуется чистый кислород, что представляет собой проблему безопасности. Самоконверсия метана не требует внешнего тепла и имеет наименьшие энергозатраты. Технология паровой конверсии метана экологически безопасна, перспективна с научной точки зрения и является одной из наиболее эффективных, но она еще не доработана для использования в промышленных масштабах. Необходимо разработать новые недорогие катализаторы и системы реакторов непрерывного действия для технологии паровой конверсии метана, чтобы сделать их экономически выгодными.

Ключевые слова: водород; паровая конверсия метана (SMR), метан, частичное окисление (POX), автотермический риформинг (ATR), природный газ.

Введение

Обнаружение источников энергии остается одной из ключевых задач на протяжении всей истории человечества. Миру не хватает безопасных, низкоуглеродных и дешевых крупномасштабных энергетических альтернатив ископаемому топливу. Различные источники энергии, от угольных до атомных и от солнечных до ветряных, используются для удовлетворения энергетических потребностей всех секторов промышленности. Однако все типы используемых источников энергии ограничены из-за физических условий, соображений безопасности и так далее.

Ученые всегда ищут альтернативные источники энергии для удовлетворения глобальных потребностей. Одним из вариантов чистого топлива для сокращения вредных выбросов является водород. С момента открытия в XVI веке (около 1520 г. – первое зарегистрированное наблюдение водорода Парацельсом при растворении металлов (железа, цинка и олова) в серной кислоте) и в XVII веке (1625 г. – первое описание водорода Иоганном Баптистом ван Гельмонтом, который первым употребил слово «газ» при описании водорода) [1]

по настоящий день водород является объектом интереса ученых и исследователей в разработке технологий производства.

Водород имеет стратегическое значение для создания экологически чистой и устойчивой энергетической системы с низким уровнем выбросов. Продукт сгорания водорода является экологически чистым, он состоит из воды и небольшого количества оксидов азота. В качестве транспортного топлива водород обладает уникальными характеристиками, включая высокую скорость горения, эффективное высокое октановое число, а также отсутствие токсичности и потенциала образования озона. Его пределы воспламеняемости на воздухе гораздо шире, чем у метана и бензина. Водород стал доминирующим транспортным топливом и производится централизованно из смеси чистого угля и ископаемого топлива (со связыванием углерода), а также с использованием ядерной энергии и крупномасштабных возобновляемых источников энергии [2]. Крупномасштабное производство водорода вероятно в долгосрочной перспективе. В текущей и среднесрочной перспективе варианты производства водорода в пер-

вую очередь основаны на распределенном производстве водорода путем электролиза воды и риформинга природного газа и угля. Каждый из сценариев централизованного производства водорода может произвести 40 миллионов тонн водорода в год.

Паровой риформинг метана является самым важным распространенным способом для производства водорода из природного газа среди тех технологий, использующих метан (CH_4). С помощью паровой конверсии метана производство водорода является наиболее экономичным из существующих промышленных процессов. В дальнейшем рассмотрении основное внимание будет уделено истории разработки газообразного водорода и методам производства, особенно методам производства водорода из природного газа.

Целью данной статьи является проведение сравнительного анализа различных технологий производства водорода из природного газа. В рамках исследования будут рассмотрены разнообразные методы и процессы, применяемые для получения водорода из данного исходного сырья. Основной упор будет сделан на анализ экономической эффективности, экологических аспектов и технических параметров каждой из рассматриваемых технологий.

Водород

Водород является наиболее распространенным химическим элементом во Вселенной, его можно найти на разных газовых планетах нашей солнечной системы, Солнце и других звездах. На Земле водород широко распространен в естественной среде, но не в достаточно больших количествах, чтобы производить его по конкурентоспособной цене. Поэтому его необходимо отделить от других элементов. Проблема использования водорода в качестве топлива насчитывает более 150 лет.

В 1776 году Генри Кавендиш обнаружил, что газообразный водород является отдельным от кислорода элементом. В 1800 году английские ученые Никсон и Каллиль обнаружили, что при электрическом воздействии на воду образуются кислород и водород. Позднее этот процесс был назван электролизом. В 1838 году Кристиан Фридрих Шёнбейн обнаружил, что водород и кислород образуют воду при использовании эффекта топливного элемента. В 1959 году в Кембриджском университете в Англии был построен первый практический водородный и воздушный элемент. Началась разработка элементов водородного топлива для обычного коммерческого применения. В 1974 г. Национальный научно-исследовательский фонд передает Министерству энергии США федеральную программу по исследованиям и разработкам водорода. Профессор Т. Н. Визероглу из Майамиского университета в Флориде организовал энергетическую конференцию ТНЕМЕ в Майами, первую мировую конференцию по энергетике водородов. По результатам конференции участники конференции и ученые, присутствующие на конференции ТЕМЕ, создали Международную ассоциацию водородной энергии ИЯЭ (IAHE). В 1974 г. было создано Международное энергетическое агентство (МЭА) в ответ на сбой на мировом рынке нефти [3–5].

Технологии производства водорода

Особенно привлекательной является возможность производства водорода с применением разнообразных ресурсов и технологических процессов. В современных условиях основным методом для создания водорода является паровая конверсия природных газов. Однако этот метод, к сожалению, сопровождается значительными выбросами парниковых газов [6]. Глобальный спрос на водород в настоящее время распределен следующим образом: около 50 % от общего спроса, в том числе примерно 30 % составляют паровые конверсии природного газа, и еще около 30 % связаны с переработкой нефтяного газа, выделяемого в процессе нефтеперерабатывающей химии. Доля газификации угля составляет 18 %, электролиз воды – 3,9 и 0,1 % [7–9].

Проблема, связанная с использованием ископаемых топлив для производства водорода, заключается в их высокой энергоемкости. Следовательно, нашей задачей является поиск путей производства водорода с более эффективным использованием энергии. Варианты подходов включают использование возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая, а также применение более эффективных методов, вроде газификации или пиролиза биомассы. Важно понимать, что даже при использовании наилучших методов необходимо учитывать экологический след, который мы оставляем на окружающей среде. Например, фотолиз воды, несмотря на свою экологическую безопасность, может оказаться неоптимальным вариантом для эффективного производства водорода [10, 11].

Технологии производства водорода из природного газа

Природный газ представляет собой значительный резервуар водорода, так как содержит метан, который используется в процессе извлечения водорода из ископаемого топлива. Состав природного газа значительно меняется в зависимости от его происхождения. Типичный состав природного газа приведен в табл. 1 [12–14].

Процесс превращения бензина, углеводов, метанола и этанола в газ с высоким содержанием водорода называется метановой переработкой. Этот метод является наиболее распространенным способом получения водорода из ископаемых топлив. Перед трансформацией в газ вещества, такие как сера, часто удаляют, чтобы предотвратить ухудшение эффективности водородного топлива. Получение водородного газа из углеводородных топлив возможно с использованием трех основных технологий:

- а) паровая конверсия метана (SMR);
- б) частичное окисление (POX);
- в) автотермический риформинг (ATR).

Эти подходы приводят к генерации значительного объема оксида углерода (CO). Для достижения необходимой экологической устойчивости на этапе преобразования CO в диоксид углерода (CO_2) могут быть применены методы конверсии водородного газа (WGS), желаемого окисления (PrOx) или метанирования. Эти реакции подробно описаны ниже [15–17].

Таблица 1. Состав природного газа

Table 1. Composition of natural gas

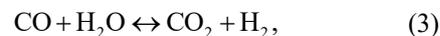
Компонент	Типичный анализ (моль%)	Диапазон (моль%)
Метан	87,76	70–95
Этан	5,00	1,8–5,1
Пропан	1,00	0,1–1,5
i-Бутан	0,30	0,01–0,30
ii-Бутан	0,50	0,01–0,50
Пентан	0,20	До 0,3
Гексан	0,30	До 0,3
Гептан	0,26	До 0,3
Октан	0,15	До 0,2
Нонан	0,08	До 0,1
Углекислый газ	2,85	0,1–1
Азот	1,4	1,3–5,6
Кислород	0,02	0,01–0,1
Водород	Мало	0 до 0,02

1. Паровая конверсия метана (SMR)

Метан представляет собой большую молекулу водорода, состоящую из одного углеродного атома и 4 водородных атомов. Уже из формулы химического происхождения видно, что метан «сильно обогащает» водороды. Производится более 95 % водородов паровой конверсией метана (SMR). Первые патенты на катализаторы парового риформинга метана (реакция между паром и углеводородом) относятся к 1913 году. Когда процесс Габера – Боша для производства аммиака был первоначально разработан, водород для процесса производился путем взаимодействия пара с коксом. Однако позже интерес был сосредоточен на том, как можно использовать паровую конверсию метана для производства более экономичного источника водорода. Паровой риформинг был впервые использован для производства водорода в Батон-Руж в 1931 году компанией Standard Oil, а вскоре после этого в Биллингеме, Великобритании, был введен в эксплуатацию завод, основанный на собственной технологии Биллингема [18].

В настоящее время паровые риформинги считаются одними из наиболее популярных и эффективных способов получения водорода. Их преимущество – высокая эффективность работы, небольшие эксплуатационные и производственные затраты. Основными источниками являются природный газ, легкое углеводородное и формальдегидное и иное кислородное соединение. разрабо-

таны альтернативные схемы формирования углеводородов, формальдегидов и углеводородов, применяемых как сырье, с целью их дальнейшего применения.



Процесс делится на два этапа. На первом этапе углеводородное сырье смешивается водяным паром и направляется в катализатор 9. На этом этапе образуется газовый синтез газовой смеси (H_2/CO) относительно невысокого содержания CO_2 ((1) и (2)). Чтобы обеспечить необходимую реакционную теплоту внутри реактора, добавляется воздух и кислород, чтобы частично сжигать греющий газ. На втором этапе охлажденные газовые продукты поступают в каталитические нейтрализаторы CO , в которых углерод преимущественно переходит в углеродный диоксид и водород (3). Процесс паровой риформации требует применения сырья, не содержащего серы, для того чтобы не дезактивировать катализатор, см. рис. 1. Для процессов SMR характерно относительно низкое температурное значение, например 180 °C для формально-окисленного углеводорода, а более 500 °C для обычного углеводорода [19–21].

Использованные катализаторы могут быть разделены на две группы: обыкновенные металлы обычно состоят из никеля; благородные металлы VIII группы обычно состоят из платины или родия, составляющих менее 5 % общей массы. Время реакции иногда ограничивается кинетикой для стандартных паровых реакторов риформинга, поэтому в промышленности предпочтение отдается менее затратным никелевым катализаторам.

Важным аспектом, характеризующим процесс парового риформинга (SR), является соотношение атомов водорода (H) к углероду (C) в исходном сырье. Чем выше это соотношение, тем меньше происходит образования выбросов углекислого газа. Мембранный реактор обладает способностью объединить оба этапа стандартного процесса парового риформинга для обеспечения согласованной реакции (2) [23–25].

Тепловая эффективность получения водорода методом парового риформинга метана в промышленных масштабах составляет от 70 до 85 %. Для того чтобы достичь такой высокой эффективности, в будущем может быть использовано разнообразное сырье, такое как твердый коммунальный отход, пищевые продукты, растительное масло, выращиваемая или переработанная сельскохозяйственная биомасса, а также ископаемые горящие вещества, такие как уголь. Впрочем, стоит заметить, что подобный подход связан со значительным образованием углекислых газов.

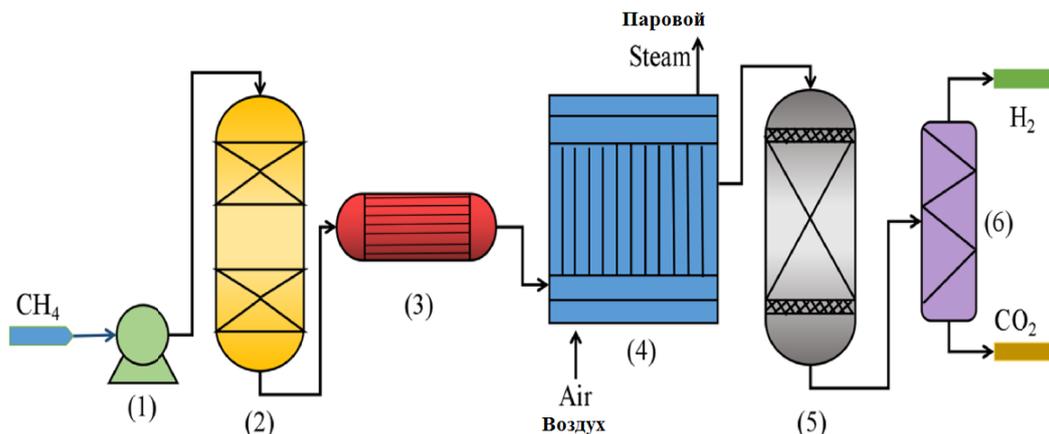


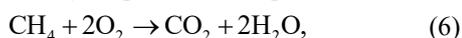
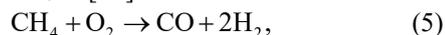
Рис. 1. Схема производства водорода паровой конверсией метана (SMR):
1 – нагнетательный насос; 2 – реактор десульфуризации; 3 – подогреватель; 4 – реформер; 5 – реактор WGS; 6 – колонна PSA [22]

Fig. 1. Scheme of hydrogen production by steam methane reforming (SMR):
1 – injection pump; 2 – desulfurization reactor; 3 – heater; 4 – reformer; 5 – WGS reactor; 6 – PSA column [22]

2. Частичное окисление (POX)

Частичное окисление (Partial Oxidation, POX) – это технология производства водорода из природного газа или других углеводородных материалов путем их частичного сгорания с кислородом или паром. Этот процесс создает смесь водорода, угарного газа (CO) и других компонентов. По сравнению с паровой конверсией метана (SMR), POX производит больше CO, что может быть полезным для производства синтез-газа, но требует дополнительных усилий для очистки и уменьшения выбросов угарного газа при производстве водорода.

Частичное окисление POX и катализатор частичного окисления POX углеводородов предлагаются для изготовления водорода, используемого для применения в автомобильных топливах и иных платных приложениях. Для газификации может быть использовано метан, биогаз, а также тяжелое нефтяное сырье, например вакуумный остаток и топливо, которое ранее было трудно перерабатывать и уничтожать. Процесс POX является некаталитическим и подразумевает газификацию сырья в присутствии воздуха ((5) и (6)), возможно также образование угарного газа ((7), ATR) при температурах от 1300 до 1500 °C и давлении от 3 до 8 МПа. По сравнению с паровым риформингом ($H_2:CO=3:1$), соотношение $H_2:CO$ при POX склоняется к большему количеству CO ($H_2:CO=1:1$ или $2:1$). Таким образом, происходит превращение CO с помощью водяного пара в H_2 и CO_2 . Эта реакция поддерживает баланс между различными продуктами реакции [13].



Образующаяся при частичном окислении газовая смесь содержит CO, CO_2 , H_2O , H_2 , CH_4 , а также сероводород (H_2S) и сероуглерод (COS). Часть газа подвергается сжиганию, чтобы обеспечить достаточное

количество тепла для эндотермических процессов. Побочный продукт разложения ацетилена – копоть, считается избыточным. Ее образование зависит от соотношения H:C в исходном топливе. Как и в случае с паровым риформингом (SMR), были попытки перейти на сырье с более высоким соотношением H:C, например на природный газ.

В частичном окислении реактор POX работает более экономно, чем в паровом риформинге, однако дополнительная замена делает этот процесс более затратным. Преимуществом POX является то, что не требуется обязательного применения катализатора — это, вместе с тем, устраняет потребность в удалении серы с природного газа, а также способствует снизить эффективность катализаторов. Серное соединение, содержащееся в газе, превращается в сероводород примерно на 95 %, а в сероуглерод примерно на 5 %. Катализаторы можно ввести в каталитический частичный окислитель (CPOX), чтобы снизить рабочую температуру около 700–1000 °C. Однако контроль температуры осложняется образованием коксовых и интенсивных точек реакции в связи с экзотермией реакций [26–28]. Для конверсии природного газа катализаторы, как правило, основаны на Ni или Rh.

Впрочем, никель обладает выраженной предрасположенностью к образованию кокса, и стоимость синтеза значительно увеличилась. Исследователи, как Крумменахер и команда, успешно использовали каталитические парциальные окисления для деканов, гексадеканов и дизельного топлива. Однако высокая рабочая температура (>800 °C) градусов и потребность в высоком уровне безопасности могут мешать внедрению данной технологии в компактные и небольшие миниатюры, поскольку сложность контроля температурного режима может затруднять внедрение данной технологии в компактные и небольшие миниатюры. Обычно тепловой КПД реакторов POX при использовании метана в качестве топлива составляет примерно 60–75 %.

3. Автотермический риформинг (ATR)

В процессе автотермического риформинга (ATR) к каталитическому парциальному окислению добавляется пар. ATR объединяет эндотермические реакции парового риформинга с экзотермическим парциальным окислением. Преимущество ATR заключается в его независимости от внешнего тепла, а также в его более удобной реализации и экономичности по сравнению с паровым риформингом (SMR). Диапазон работы топливного микропроцессора для производства водорода представлен на рис. 2. Выбор режима работы установки риформинга зависит от конкретной задачи. Главной целью является повышение выхода водорода при минимальном содержании монооксида углерода.

При паровом риформинге вероятна высокая эффективность использования водорода и низкое содержание оксида углерода. Однако паровой риформинг, будучи эндотермическим процессом, требует значительных энергетических затрат, и энергия должна поступать извне. Другим важным преимуще-

ством ATR по сравнению с SMR является его способность к быстрому останову и запуску, при этом обеспечивая больший выход водорода, чем только частичное окисление (ПОХ) [29–31].

Согласно ожиданиям, этот процесс будет привлекательным для индустрии синтеза газообразных топлив, благодаря подходящему составу газа для синтеза Фишера – Тропша (химический процесс, считающийся ключевым этапом передового метода производства синтетических топлив), компактности ATR и минимальным затратам. При риформинге метана тепловая эффективность сопоставима с той, что характерна для частичного окисления (ПОХ), и составляет примерно 60–75 %. Это значение немного ниже, чем у парового риформинга SMR. Примечательно, что бензин и другие сложные углеводороды могут быть трансформированы в водород непосредственно на автомобильном борту, используя процесс автотермического риформинга в сочетании с оптимальными катализаторами.

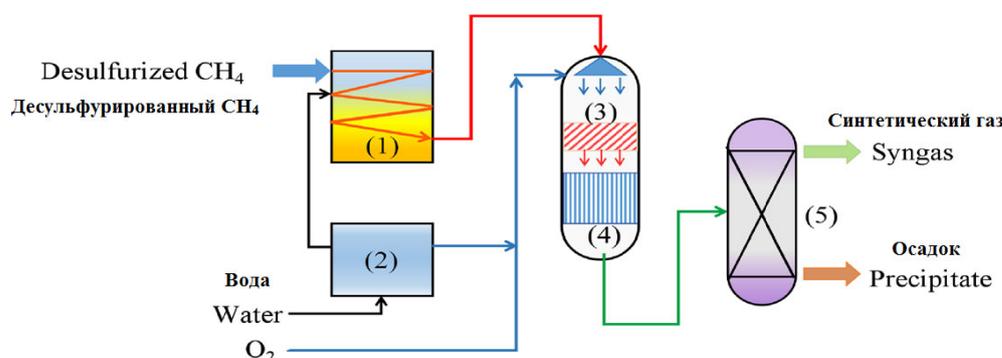


Рис. 2. Принципиальная схема установки производства водорода метановым автотермальным способом:
1 – подогреватель; 2 – парогенератор; 3 – камера сгорания; 4 – каталитический слой; 5 – сепаратор

Fig. 2. Schematic diagram of a hydrogen production plant using the methane autothermal method:
1 – heater; 2 – steam generator; 3 – combustion chamber; 4 – catalytic layer; 5 – separator

Сравнение различных технологий производства водорода из природного газа

Из вышеприведенного анализа делаем вывод, что три технологии производства водорода из природного газа имеют преимущества и недостатки. Сравнение трех различных технологий производства водорода из природного газа показано в табл. 2. В сравнении можно узнать, что:

1) технология паровой конверсии метана имеет высокую скорость производства водорода среди трех технологий;

2) скорость реакции каталитического парциального окисления метана самая высокая. Однако для процесса реакции требуется чистый кислород, что создает проблему безопасности;

3) автотермическая конверсия метана не требует внешнего тепла и имеет наименьшие энергозатраты.

Тем не менее на эффективность производства водорода сильно влияет соотношение $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$. От сравнения также можно обнаружить, что относительно зрелые технологии парового риформинга метана, частичного окисления метана и автотермического риформинга метана производят CO_2 во время реакции, что не способствует уменьшению углерода.

Таблица 2. Сравнение технологий производства водорода

Table 2. Comparison of hydrogen production technologies

Процесс Process	CH_4 , паровой риформинг	CH_4 , ката- литическое парциальное окисление	CH_4 , авто- термический риформинг
По продукту	H_2 , CO_2 , CO	H_2 , CO_2 , CO	H_2 , CO_2 , CO
Ступени контроля	Медленный паровой риформинг	Быстрое частичное окисление метана	Медленный паровой риформинг
Чистота кислорода O_2	Не нужен O_2	Чистый O_2	Не нужен O_2
Метод нагрева	Внешнее отопление	Внешнее отопление	Самонагрев
Соотноше- ние H_2/CO	3:1	2:1	Зависит от соотношения CH_4 , O_2 , H_2O
Материал реактора	Неорганичес- кая керамика	Нержавею- щая сталь	Нержавею- щая сталь
Эффектив- ность	70–85 %	60–75 %	60–75 %

Для уменьшения углерода важно усилить исследование и разработки технологий улавливания, хранения и утилизации углерода; также необходимо исследовать новые технологии для получения зеленого водорода.

Сравним экономические аспекты трех различных технологий производства водорода из метана: паровой конверсии метана (SMR), частичного окисления (POX) и автотермического риформинга (ATR) (табл. 3).

Таблица 3. Сравнение экономических аспектов трех различных технологий производства водорода

Table 3. Comparison of economic aspects of three different hydrogen production technologies

Процесс Process	Паровая конверсия метана (SMR)	Частичное окисление (POX)	Автотермический риформинг (ATR)
Стоимость оборудования	SMR требует значительных инвестиций в высокотемпературные реакторы и катализаторы, что может привести к высокой стоимости оборудования	POX также требует специализированного оборудования, но оно может быть менее дорогим по сравнению с SMR	ATR также требует специализированного оборудования, но оно может быть менее затратным по сравнению с SMR
Сырье	Эта технология использует метан в качестве сырья, и его стоимость может значительно влиять на экономическую эффективность	Эта технология также использует метан в качестве сырья, и его стоимость остается ключевым фактором	Подобно SMR и POX, ATR использует метан в качестве сырья, что может влиять на экономические аспекты
Эффективность	SMR обеспечивает высокую эффективность водородного производства, но при этом выделяется CO ₂ , что может потребовать дополнительных затрат на его улавливание и хранение	POX может обеспечивать хорошую эффективность, но, подобно SMR, выделяет CO ₂	ATR может обеспечивать хорошую эффективность и может быть более эффективным в использовании тепловой энергии из внешних источников

Итоговый выбор между этими технологиями будет зависеть от многих факторов, включая стоимость сырья (метана), стоимость энергии, доступность инфраструктуры, требования к утилизации CO₂ и регулирование. Например, если дешевый источник метана доступен, то SMR или POX могут быть более привлекательными с экономической точки зрения. Если важна более низкая эмиссия CO₂, то ATR может быть более подходящей технологией.

Выводы

Водород – это энергия будущего благодаря многим его преимуществам и долгосрочному потенциалу широко применяемого устойчивого энергоносителя. В этой работе обсуждаются глобальная энергетическая система, источники энергии, история водорода и методы его производства. Рассмотрено несколько способов технологий производства водорода с акцентом на технологии получения водорода из природного газа. Путем сравнения преимуществ и недостатков каждой технологии было сделано несколько важных выводов:

1) технология паровой конверсии метана SMR имеет самую высокую скорость производства водорода среди трех технологий;

2) скорость реакции каталитического парциального окисления метана самая высокая. Однако для процесса реакции требуется чистый кислород, что представляет собой проблему безопасности;

3) самоконверсия метана не требует внешнего тепла и имеет наименьшие энергозатраты.

Спрос на водород постоянно растет. В настоящее время технология паровой конверсии природного газа SMR является наиболее передовым и экономичным способом производства водорода. Хотя высокие выбросы парниковых газов и энергоемкое использование производства водорода с использованием методов преобразования природного газа вызывают экологические проблемы, преобразование паров

природного газа секвестрацией двуокиси углерода представляет собой прямое решение экологических проблем. Однако промышленное применение этих технологий требует высокого уровня НИОКР в масштабе опытного предприятия. Технология паровой конверсии метана экологически безопасна, применима с научной точки зрения и является одной из наиболее эффективных, но она еще не применяется в промышленных масштабах. Необходимо разработать новые недорогие катализаторы и системы реакторов непрерывного действия для технологии паровой конверсии метана, чтобы сделать их экономически выгодными.

Библиографические ссылки

1. Avelar A.M., de Camargo F., da Silva V.S.P., Giovedi C., Abe A. and Mourão M.B. Effectiveness of Ni-based and Fe-based cladding alloys in delaying hydrogen generation for small modular reactors with increased accident tolerance. *Nuclear Engineering and Technology*, 2023, 55(1), pp. 156-168.
2. Abd Ali L.M., Al-Rufae F.M., Kuvshinov V.V. et al. Study of Hybrid Wind – Solar Systems for the Iraq Energy Complex // *Applied Solar Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284-290.
3. Report prepared by International Energy Agency: IEA for the G20, Japan. *The Future of Hydrogen* // International Energy Agency IEA, 2019, pp. 1-284.
4. Rasul M.G., Hazrat M.A., Sattar M.A., Jahirul M.I. and Shearer M.J. The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications. *Energy Conversion and Management*, 2022, 272, p. 116326.
5. Tarhan C. and Çil M.A. A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods. *Journal of Energy Storage*, 2021 40, pp. 102676.
6. Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell) // *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, no. 14, pp. 4414-4418. DOI:10.3923/jeasci.2019.4414.4418.
7. Li S., Kang Q., Baeyens J., Zhang H. L., Deng Y. M. Hydrogen Production: State of Technology // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 544 0012011, 2020, pp. 1-8.

8. Holladay J.D., Hu J., King D.L. and Wang Y. An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis today*, 2009, 139(4), pp. 244-260.
9. Xu X., Zhou Q. and Yu D. The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47 (79), pp. 33677-33698.
10. Megia P. J., Vizcaíno A. J., Callesand A. Carrero J. A. Hydrogen Production Technologies from Fossil Fuels toward Renewable Sources, A Mini Review / *ACS Energy&Fuels*. 35,2021,pp.16403–16415.
11. Bains M., Hill L., Rossington P. Material decisions comparators for end of waste decisions Fuels: natural gas Report / Environment Agency, Horizon House, Deanery Road, Bristol, BS1 5AH, 2016, pp. 1-34.
12. Fowles M., and Carlsson M. Steam reforming of hydrocarbons for synthesis gas production. *Topics in Catalysis* 64, no. 17-20, 2021, pp. 856-875.
13. Amiri T.Y., Ghasemzageh K. and Iulianelli A. Membrane reactors for sustainable hydrogen production through steam reforming of hydrocarbons: A review. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2020, 157, pp. 108148.
14. Hou L., Jia Z., Gong J., Xhou Y. and Piao Y. Heat sink and conversion of catalytic steam reforming for hydrocarbon fuel. *Journal of Propulsion and Power*, 2012, 28(3), pp. 453-595.
15. Ishihara A., Tsujino H., Hashimoto T. Effects of the addition of CeO₂ on the steam reforming of ethanol using novel carbon-Al₂O₃ and carbon-ZrO₂ composite-supported Co catalysts / *Royal society of chemistry*, 11, 2021, pp. 8530-8539.
16. Marquart W., 2018. Effect of ammonia co-feeding on oxygenates over K-Mo₂C in the Fischer-Tropsch synthesis (Master's thesis, University of Cape Town).
17. Gonzalez-Fernandez, A., 2020. Gas phase catalytic hydrogenation of alkynols over palladium and nickel catalysts (Doctoral dissertation, Heriot-Watt University).
18. Получение водорода в процессах конверсии углеводородных газов / И. В. Седов, Л. П. Диденко, А. Ю. Зайченко, А. В. Никитин // *Водород. Технологии. Будущее : сборник тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции. Томск : Изд-во Томского политехнического университета*, 2021. С. 49–50.
19. Chai, Siqi, Guojie Zhang, Guoqiang Li, and Yongfa Zhang. Industrial hydrogen production technology and development status in China: A review. *Clean Technologies and Environmental Policy* 23, no. 7, 2021, pp. 1931-1946.
20. Pal D.B., Singh A. and Bhatnagar A. A review on biomass-based hydrogen production technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47 (3), pp.1461-1480.
21. Vidas L. and Castro R. Recent developments on hydrogen production technologies: state-of-the-art review with a focus on green-electrolysis. *Applied Sciences*, 2021, 11 (23), pp. 11363.
22. Mikheeva E. R., Katraeva I. V., Vorozhtsov D. L., Kovalev D. A., Kovalev A. A., Grigoriev V. S., and Littit Yu V. Dark fermentative biohydrogen production from confectionery wastewater in continuous-flow reactors. *International Journal of Hydrogen Energy* 47, no. 53, 2022, pp. 22348-22358.
23. Орлов М. Е., Шарапов В. И. Повышение эффективности систем теплоснабжения городов // *Сантехника. Отопление, Кондиционирование*. 2014. № 1 (145). С. 72–77.
24. Gunawardena K.R., Wells M.J. and Kershaw T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 2017, 584, pp. 1040-1055.
25. Li X., Zhou Y., Yu S., Jia G., Li H. and Li W. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*, 2019, 174, pp. 407-419.
26. Chen W., Malhotra A., Yu K., Zheng W., Plaza-Gonzalez P.J., Catala-Civera J.M., Santamaria J. and Vlachos D.G. Intensified microwave-assisted heterogeneous catalytic reactors for sustainable chemical manufacturing. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol.420, pp. 130476.
27. Martín Á. and Navarrete A. Microwave-assisted process intensification techniques. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2018, 11, pp. 70-75.
28. Reddy B.R., Malhotra A., Najmi S., Baker-Fales M., Coasey K., Mackay M. and Vlachos D.G. Microwave assisted heating of plastic waste: Effect of plastic/susceptor (SiC) contacting patterns. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2022, 182, pp. 109202.
29. Гимаева А. Р., Хасанов И. И. Методы производства синтез-газа для метанола // *Химические технологии и продукты*. 2018. № 1. С. 14–19.
30. Khanipour M., Mirvakili A., Bakhtyari A., Farniaei M. and Rahimpour M.R. Enhancement of synthesis gas and methanol production by flare gas recovery utilizing a membrane-based separation process. *Fuel Processing Technology*, 2017, 166, pp. 186-201.
31. Mikheeva E.R., Katraeva I.V., Vorozhtsov D.L., Kovalev D.A., Kovalev A.A., Grigoriev V.S. and Littit Y.V. Dark fermentative biohydrogen production from confectionery wastewater in continuous-flow reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(53), pp. 22348-22358.

References

1. Avelar A.M., de Camargo F., da Silva V.S.P., Giovedi C., Abe A. and Mourão M.B. Effectiveness of Ni-based and Fe-based cladding alloys in delaying hydrogen generation for small modular reactors with increased accident tolerance. *Nuclear Engineering and Technology*, 2023, 55(1), pp. 156-168.
2. Abd Ali L.M., Al-Rufae F.M., Kuvshinov V.V. et al. Study of Hybrid Wind – Solar Systems for the Iraq Energy Complex // *Applied Solar Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290.
3. Report prepared by International Energy Agency: IEA for the G20, Japan. The Future of Hydrogen // *International Energy Agency IEA*, 2019, pp. 1-284.
4. Rasul M.G., Hazrat M.A., Sattar M.A., Jahirul M.I. and Shearer M.J. The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications. *Energy Conversion and Management*, 2022, 272, p. 116326.
5. Tarhan C. and Çil M.A. A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods. *Journal of Energy Storage*, 2021 40, pp. 102676.
6. Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell) // *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, no. 14, pp. 4414-4418. DOI:10.3923/jeasci.2019.4414.4418.
7. Li S., Kang Q., Baeyens J., Zhang H. L., Deng Y. M. Hydrogen Production: State of Technology // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 544 0012011, 2020, pp. 1-8.
8. Holladay J.D., Hu J., King D.L. and Wang Y. An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis today*, 2009, 139(4), pp. 244-260.
9. Xu X., Zhou Q. and Yu D. The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47 (79), pp. 33677-33698.
10. Megia P. J., Vizcaíno A. J., Callesand A. Carrero J. A. Hydrogen Production Technologies from Fossil Fuels toward Renewable Sources, A Mini Review / *ACS Energy&Fuels*. 35,2021,pp.16403–16415.
11. Bains M., Hill L., Rossington P. Material decisions comparators for end of waste decisions Fuels: natural gas Report / Environment Agency, Horizon House, Deanery Road, Bristol, BS1 5AH, 2016, pp. 1-34.
12. Fowles M., and Carlsson M. Steam reforming of hydrocarbons for synthesis gas production. *Topics in Catalysis* 64, no. 17-20, 2021, pp. 856-875.
13. Amiri T.Y., Ghasemzageh K. and Iulianelli A. Membrane reactors for sustainable hydrogen production through steam

reforming of hydrocarbons: A review. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2020, 157, pp. 108148.

14. Hou L., Jia Z., Gong J., Xhou Y. and Piao Y. Heat sink and conversion of catalytic steam reforming for hydrocarbon fuel. *Journal of Propulsion and Power*, 2012, 28(3), pp. 453-595.

15. Ishihara A., Tsujino H., Hashimoto T. Effects of the addition of CeO₂ on the steam reforming of ethanol using novel carbon-Al₂O₃ and carbon-ZrO₂ composite-supported Co catalysts / *Royal society of chemistry*, 11, 2021, pp. 8530-8539.

16. Marquart W., 2018. production technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47 (3), pp.1461-1480.

17. Vidas L. and Castro R. Recent developments on hydrogen production technologies: state-of-the-art review with a focus on green-electrolysis. *Applied Sciences*, 2021, 11 (23), pp. 11363.

18. Mikheeva E. R., Katraeva I. V., Vorozhtsov D. L., Kovalev D. A., Kovalev A. A., Grigoriev V. S., and Littit Yu V. Dark fermentative biohydrogen production from confectionery wastewater in continuous-flow reactors. *International Journal of Hydrogen Energy* 47, no. 53, 2022, pp. 22348-22358.

19. Orlov M.Ye., Sharapov V.I. Povysheniye effektivnosti sistem teplosnabzheniya gorodov [Increasing the efficiency of urban heating systems]. *Santekhnika. Otopleniye. Konditsionirovaniye*. 2014. No. 1. Pp. 72-77 (in Russ.).

20. Gunawardena K.R., Wells M.J. and Kershaw T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 2017, 584, pp. 1040-1055.

21. Li X., Zhou Y., Yu S., Jia G., Li H. and Li W. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*, 2019, 174, pp. 407-419.

22. Chen W., Malhotra A., Yu K., Zheng W., Plaza-Gonzalez P.J., Catala-Civera J.M., Santamaria J. and Vlachos D.G. Intensified microwave-assisted heterogeneous catalytic reactors for sustainable chemical manufacturing. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol.420, pp. 130476.

23. Martín Á. and Navarrete A. Microwave-assisted process intensification techniques. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2018, 11, pp. 70-75.

24. Reddy B.R., Malhotra A., Najmi S., Baker-Fales M., Coasey K., Mackay M. and Vlachos D.G. Microwave assisted heating of plastic waste: Effect of plastic/susceptor (SiC) contacting patterns. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2022, 182, pp. 109202.

25. Гимаева А. Р., Хасанов И. И. Методы производства синтез-газа для метанола // *Химические технологии и продукты*. 2018. № 1. С. 14–19.

26. Khanipour M., Mirvakili A., Bakhtyari A., Farniaei M. and Rahimpour M.R. Enhancement of synthesis gas and methanol production by flare gas recovery utilizing a membrane-based separation process. *Fuel Processing Technology*, 2017, 166, pp. 186-201.

27. Mikheeva E.R., Katraeva I.V., Vorozhtsov D.L., Kovalev D.A., Kovalev A.A., Grigoriev V.S. and Littit Y.V. Dark fermentative biohydrogen production from confectionery wastewater in continuous-flow reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(53), pp. 22348-22358.

* * *

Comparison of Various Hydrogen Production Technologies from Natural Gas

N. A. Mezaal, Post-graduate, Energy Institute of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

A. A. Kalyutik, PhD in Engineering, Associate Professor, Energy Institute of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

A. S. Salman, Kirkuk Technical College, North Technical University, Kirkuk, Iraq

L. M. Abdali, Post-graduate, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

The article provides an overview of the present condition and immediate future potential in the realm of hydrogen energy technologies. The paper delves into the most renowned approaches for generating hydrogen from natural gas: a) Steam-Methane Reforming (SMR); b) Partial Oxidation (POX); and c) Autothermal Reforming (ATR). Nevertheless, employing these technologies on an industrial scale requires substantial R&D efforts, often on the scale of experimental ventures.

The article also examines the global energy landscape, energy sources, the historical discovery of hydrogen, and the various production methods. It addresses the intricacies associated with hydrogen production technologies, with a focal point on the technology of extracting hydrogen from natural gas. Through a comparison of the benefits and drawbacks of each method and, as explicated in the concluding section of the study, several significant insights have been derived.

Among the three technologies, SMR, the steam conversion process, boasts the highest hydrogen production rate. Catalytic partial oxidation of methane exhibits the swiftest reaction rate; however, it necessitates the use of pure oxygen, which poses safety concerns. The process of methane auto-thermal reforming requires no external heat and is characterized by minimal energy consumption. Steam reforming of methane emerges as an ecologically sound and scientifically promising avenue, offering high effectiveness. Nevertheless, its deployment on an industrial scale remains to be fully refined. Developing cost-effective catalysts and continuous reactor systems for methane steam conversion technology is essential to rendering it economically viable.

In conclusion, there is substantial potential for advancements at hydrogen energy technologies, particularly through refining and integrating these different production methods.

Keywords: hydrogen; steam-methane reforming (SMR); methane; partial oxidation (POX); autothermal reforming (ATR); natural gas.

Получено: 23.08.23

Образец цитирования

Сравнение различных технологий производства водорода из природного газа / Н. А. Мезаал, А. А. Калюттик, А. С. Салман, Л. М. Абдали // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2023. Т. 21, № 4. С. 101–108. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-101-108.

For Citation

Mezaal N. A., Kalyutik A. A., Salman A. S., Abdali L. M. [Comparison of Various Hydrogen Production Technologies from Natural Gas]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 101-108. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-101-108.