

Модернизация установки производства водорода методом короткоцикловой адсорбции с целью повышения качества продукции

Анастасия Тимуровна Ибрагимова✉

Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: at_ibragimova@tnnc.rosneft.ru✉

Аннотация. Объектом исследования является установка производства водорода (УПВ) с применением технологии паровой конверсии метана. В статье рассматриваются современные тенденции развития водородных технологий, методы его производства и очистки. Основной проблемой при производстве водорода является недостаточная очистка продукта от загрязняющих газообразных примесей — CO , CO_2 , CH_4 . В работе предложен способ глубокой очистки водорода методом короткоцикловой адсорбции (КЦА) и внедрения данной технологии в качестве способа усовершенствования установки. Результаты исследования показывают, что метод паровой конверсии метана является эффективным и экономически выгодным способом получения водорода, а внедрение адсорбционной установки значительно повышает чистоту получаемого водорода до 99,9% мольн. При этом технико-экономический анализ предложенного варианта показал положительную чистую текущую стоимость (NPV) в размере 45 условных единиц, что свидетельствует о большом потенциале реализации. Проведенное исследование может быть практически ценно предприятиям, занимающимся развитием водородных технологий, для проведения оценки потенциальной выгоды от применения КЦА.

Ключевые слова: производство водорода, паровая конверсия метана, короткоцикловая адсорбция, очистка водорода, водородсодержащий газ, дизельное топливо, гидроочистка

Цитирование: Ибрагимова А. Т. 2024. Модернизация установки производства водорода методом короткоцикловой адсорбции с целью повышения качества продукции // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 4 (40). С. 18–33. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-18-33>

Поступила 12.11.2024; одобрена 12.12.2024; принята 16.12.2024

Modernization of the hydrogen production unit by pressure swing adsorption to improve product quality

Anastasiya T. Ibragimova✉

Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia
Corresponding author: at_ibragimova@tnnc.rosneft.ru✉

Abstract. The object of this study is a hydrogen production unit with methane steam reforming technology. The article discusses modern trends in the development of hydrogen technologies, methods of hydrogen production, and purification. The main problem in hydrogen production is insufficient purification of the product from contaminants — CO , CO_2 , and CH_4 . The authors propose a method for deep purification of hydrogen by pressure swing adsorption (PSA) and the introduction of this technology to improve the whole unit. The results show that the method of methane steam reforming is an effective and cost-effective way to produce hydrogen, and the introduction of an adsorption unit significantly increases the purity of the hydrogen obtained to 99.9% mol. Meanwhile, the technical and economic analysis of the proposed option showed a positive net present value (NPV) in the amount of 45 conventional units, which indicates great potential for implementation. This study can be valuable for enterprises of hydrogen technologies development and for assessing the potential benefits of using PSA.

Keywords: hydrogen production, steam methane reforming, pressure swing adsorption, hydrogen purification, hydrogen-containing gas, diesel fuel, hydro-treating

Citation: Ibragimova, A. T. (2024). Modernization of the hydrogen production unit by pressure swing adsorption to improve product quality. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(4), 18–33. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-18-33>

Received Nov. 12, 2024; Reviewed Dec. 12, 2024; Accepted Dec. 16, 2024

Введение

Водород применяется во многих нефтехимических процессах и производствах. Анализ и выбор технологии производства зависит от планируемых мощностей предприятия, требований к чистоте продукции и экономической эффективности. При синтезе водорода, помимо целевого продукта, образуются другие нежелательные вещества — CO , CO_2 ,

CH_4 , содержание которых в водородсодержащем газе (ВСГ) может достигать более 25% масс.ⁱ

В наши дни производство высококачественного водорода для нефтехимической промышленности является актуальной задачей. В связи с этим растет интерес к технологиям очистки водорода, которые могут обеспечить максимальную чистоту продукта, поставляемого потребителям.

Синтез водорода высокой чистоты актуален в т. ч. и по следующим причинам:

1. Применение в нефтехимических процессах:

- гидрокрекинге — водород используется для расщепления больших молекул углеводородов на более мелкие, которые затем используются для производства бензина и других видов топлива;
- гидроочистке — водород используется для удаления примесей из сырой нефти, таких как соединения серы и азота, с целью производства более чистого топлива;
- гидрогенизации — процесс смешения водорода с ненасыщенными углеводородными соединениями для синтеза насыщенных углеводородов при производстве маргарина, мыла и других химических веществ.

Все эти процессы требуют водорода высокой чистоты для обеспечения максимальной эффективности и качества продукции — более 99,9% мольн.

2. Экологичность топлива. Водород считается экологически чистым топливом, которое производит только воду в качестве побочного продукта. Высокая чистота продукта гарантирует эффективность топлива, а также возможность снижения углеродного следа.
3. Использование топливных элементов — устройств, преобразующих химическую энергию в электрическую. Высокочистый водород необходим для эффективной работы топливных элементов, обеспечивая надежный и эффективный источник электроэнергии.

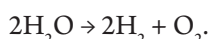
В целом ВСГ с концентрацией водорода от 99,9% мольн. применяется в различных отраслях промышленности, способствуя устойчивости и эффективности процессов при производстве высококачественной продукции.

Методы

Технологии производства водорода

Рассмотрим подробнее основные технологии производства H_2 .

1. *Электролиз воды.* По реакции электролиза образуется чистый водород с кислородом в виде побочного продукта [Дуников, 2017]:



ⁱ International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2022. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022> (дата обращения 12.12.2024).

Электролиз воды осуществляется в электролизере, принцип которого описан далее. Схематичное отображение процесса электролиза приведено на рис. 1.

Электролизер состоит из двух электродов — анода и катода, погруженных в водный раствор электролита — проводника электрического тока. При подаче напряжения под действием электрического поля положительные ионы движутся к катоду, а отрицательные — к аноду. Таким образом, молекулы воды расщепляются на кислород (O_2), протоны (H^+) и электроны (e^-). На анодной стороне образуется молекулярный кислород O_2 , на катодной стороне осуществляется соединение протонов и электронов с образованием H_2 [Тарамов и др., 2021].

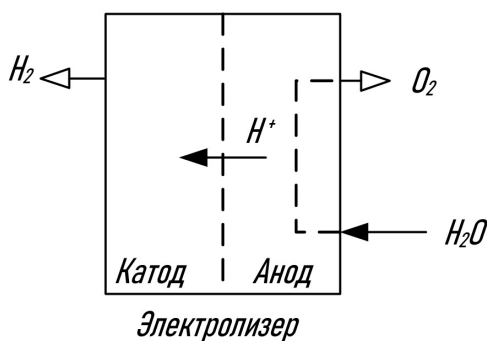
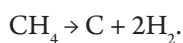


Рис. 1. Схема электролиза

Fig. 1. Electrolysis scheme

2. *Пиролиз метана.* Пиролиз метана заключается в термическом крекинге метана, т. е. его разделении на отдельные компоненты. В ходе целевой реакции образуется твердый углерод и водород:



Варианты технологической реализации процесса разнообразны [Urham и др., 2017]. На рис. 2 представлена схема пиролиза в расплаве металла.

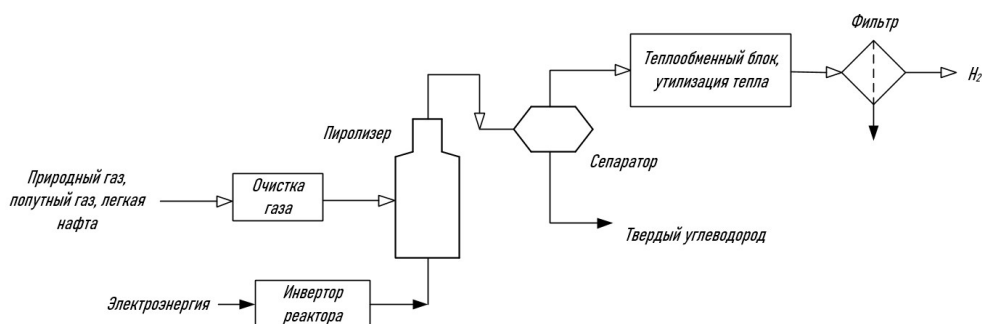


Рис. 2. Схема пиролиза в расплаве металла

Fig. 2. Pyrolysis scheme in a molten metal reactor

Реактор представляет из себя жидкостно-пузырьковый колонный аппарат с расплавленной средой (рис. 3): металлами (например, Ti, Pb, Sn, Ga, Fe), металлическими сплавами (Ni–Bi, Cu–Bi) или солями (KBr, NaBr, NaCl и др.), применяемыми в качестве теплоносителей и потенциальных катализаторов реакции.

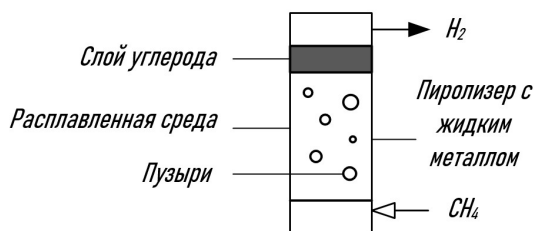


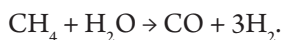
Рис. 3. Пироллизер с расплавленным металлом

Fig. 3. Pyrolyzer with molten metal

Работа жидкостно-пузырьковых колонных реакторов основана на образовании пузырьков в результате контакта между поднимающимся газообразным метаном и жидкой средой. Реакция протекает на границе раздела «жидкость — газ» между металлическим расплавом и пузырями соответственно. Пузырьки проходят реактор снизу вверх, увеличиваясь в размере ввиду молярного расширения из-за образования молекул водорода и слияния пузырьков. Вместе с тем формирующийся углерод осаждается на границе раздела «жидкость — газ». При достижении пузырями поверхности границы расплава происходит их раскрытие и выделение водорода и углерода. Газообразный H_2 уходит с верхней части реактора, а углерод осаждается поверх границы расплавленного слоя.

Пиролиз природного газа еще не получил коммерческого применения с точки зрения производства водорода [Кодряну и др., 2022].

3. *Паровая конверсия метана, или паровой риформинг* (steam methane reforming, SMR), представляет собой процесс, в котором поток природного газа (ПГ) реагирует с паром в присутствии катализатора с образованием водорода и двуокиси углерода [Schneider и др., 2020]:



На рис. 4 приведена типичная принципиальная схема установки риформинга метана [Мейерс, 2011].

Установка содержит следующие блоки:

- сероочистки сырья в колонне Р-1 на алюмокобальтмолибденовом катализаторе (в процессе гидрогенолиза сернистых соединений) и адсорбере А-1 на окиси цинка;
- риформинга метана в печи конверсии П-1 при температурах 800...900 °С;
- конверсии СО в реакторах среднетемпературной конверсии Р-2 на железохромовом катализаторе и низкотемпературной конверсии СО Р-3 над цинк-медным катализатором.

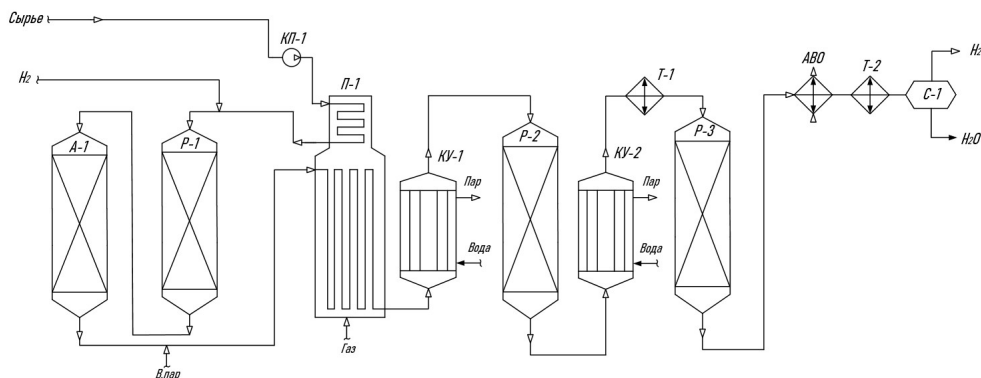


Рис. 4. Схема риформинга метана: А-1 — адсорбер; П-1 — печь риформинга; Р-1 — реактор гидрогенолиза; Р-3 — реактор конверсии; КП-1 — компрессор; КУ-1-2 — котел-утилизатор; Т-1-2 — теплообменник; С-1 — сепаратор; АВО — аппарат воздушного охлаждения

Fig. 4. Steam methane reforming: A-1 — adsorber; П-1 — reforming furnace; P-1 — hydrogenolysis reactor; P-2-3 — conversion reactor; КП-1 — compressor; KY-1-2 — waste heat boiler; T-1-2 — heat exchanger; C-1 — separator; ABO — air cooler

Стоит отметить, что паровая конверсия ПГ обеспечивает около половины мировых запасов водорода и остается наиболее часто используемым методом производства.

Воздействие на окружающую среду также является серьезной проблемой при проведении данного процесса, поскольку преобразование ПГ в водород приводит к такому же загрязнению окружающей среды и выбросу CO_2 , как и непосредственное сжигание ПГ [Sharma, Ghoshal, 2015].

По результатам обзора в табл. 1 представлена сравнительная оценка разных технологий синтеза водорода.

В данном исследовании в качестве технологии производства выбрана паровая конверсия метана. Процесс, несмотря на основной недостаток — высокую эмиссию оксидов углерода, является основополагающим, отличается высокой конверсией по сырью, дешевизной процесса и может быть модернизирован технологией улавливания и хранения CO_2 .

Технологии очистки водорода

Рассмотрим основные технологии очистки H_2 .

1. *Абсорбционная (мокрая) очистка* (рис. 5). Неочищенный ВСГ промывается в абсорбере К-1 жидким поглотителем — раствором слабого основания (карбонат калия или этаноламин). В колонне К-2 происходит регенерация абсорбента и отделение уловленных газообразных примесей. В реакторе Р-1 осуществляется процесс метанирования сырья, основной целью которого является удаление СО из газообразного водорода.

Представленная схема извлекает лишь кислые газы без возможности извлечения метана и других легких газов от ВСГ.

Табл. 1. Матрица вариантов технологий производства
Table 1. Matrix of hydrogen production technology options

Процесс	Паровая конверсия метана	Пиролиз метана	Электролиз воды	Углекислотная конверсия	Парциальное окисление метана		Парокислородная конверсия
Реакция	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$	$\text{CH}_4 = \text{C} + 2\text{H}_2$	$2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{O}_2$	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	$\text{CH}_4 + 0,5\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2$		$\text{CH}_4 + 1,5\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$
t, °C	800...900	500...2 000	90	1 000...1 100	750...900	1 100...1 300	800...900
P, МПа	2...3	0,1...0,3	До 3	2...3	2,5...3,5	2,5...8,0	2...4
Условия проведения реакции	Избыток H_2O : сырье = (2...5) : 1	—	H_2O : сырье = (2...12) : 1	—	Избыток O_2 : CH_4 = (0,6...0,7) : 1	Избыток O_2 : CH_4 = (0,6...0,7) : 1	Присутствие кислорода CH_4 : O_2 = 1,0 : 0,55 Водяной пар : сырье = (0,6...3) : 1
H_2 : CO	(3...7) : 1	2 : 1	—	(1,14...2,15) : 1	(1,6...1,8) : 1	(1,6...1,8) : 1	(1,6...2,7) : 1
Конверсия, %	90...92	60...80	60...80	≈100	100	100	90...92
Селективность, %	50...80	90...95	90...95	≈100	95	60...75	60...75
Чистота водорода, % мольн.	98	99,85	99,77	—	—	—	—
Общие затраты энергии, кВт	262 150	289 268	903 600	—	—	—	—
Энергозатраты, кВт/нм³ H_2	1,19	1,32	4,3	—	—	—	—
Катализаторы	Ni/Co на оксиде алюминия	Ni/Co на оксиде алюминия	—	Ni/Co на оксиде алюминия с 0,01...2% благородных металлов	Ni на носителе	—	Ni/Co на оксиде алюминия
Катализаторы «ЗХК Экотек» (Россия)	K-905-D1, АKN-M, НИАП-03-01, ГИАП-8	K-905-D1, АKN-M, НИАП-03-01, ГИАП-8	—	K-905-D1, ГИАП-8	K-905-D1, ГИАП-8	—	K-905-D1, НИАП-03-01
Катализаторы «НИАП-Катализатор» (Россия)	НИАП-10-01, НИАП-03-01, НИАП-03-01Ш, K-905-D1, ГИАП-8	НИАП-10-01, НИАП-03-01, НИАП-03-01Ш, K-905-D1, ГИАП-8	—	НИАП-10-01, НИАП-03-01, K-905-D1, ГИАП-8	НИАП-10-01, НИАП-03-01, K-905-D1, ГИАП-8	—	НИАП-04-02, НИАП-03-01, K-905-D1
Реактор	Трубчатый реактор	Реактор пиролиза	Электролизер	Трубчатый реактор	Реактор для парциального окисления	Реактор для парциального окисления	Шахтная печь со сплошным слоем катализатора

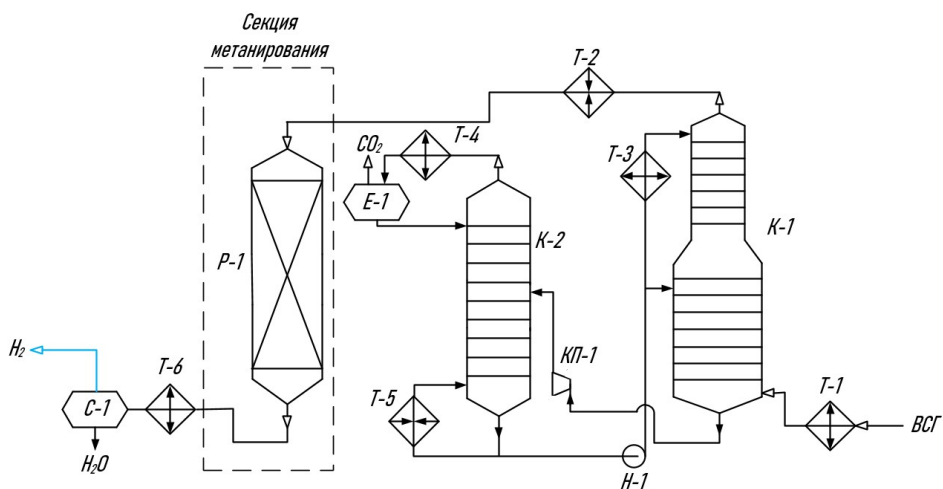


Рис. 5. Схема абсорбционной очистки: К-1 — абсорбер; К-2 — ректификационная колонна; Р-1 — реактор; Т-1-6 — теплообменник; Е-1 — емкость; С-1 — сепаратор; Н-1 — насос; КП-1 — компрессор

Fig. 5. Absorption purification scheme: К-1 — absorber; К-2 — distillation column; Р-1 — reactor; Т-1-6 — heat exchanger; Е-1 — vessel; С-1 — separator; Н-1 — pump; КП-1 — compressor

2. КЦА при переменном давлении (pressure swing adsorption, PSA) (рис. 6). Принцип технологии заключен в извлечении газообразных примесей из ВСГ в слое твердого адсорбента. При этом поглощение адсорбентом водорода в процессе незначительно. Преимущества процесса КЦА: высокая степень извлечения нежелательных примесей до 99,9% об. [Kalman и др., 2022], низкие эксплуатационные затраты и простота работы установки.

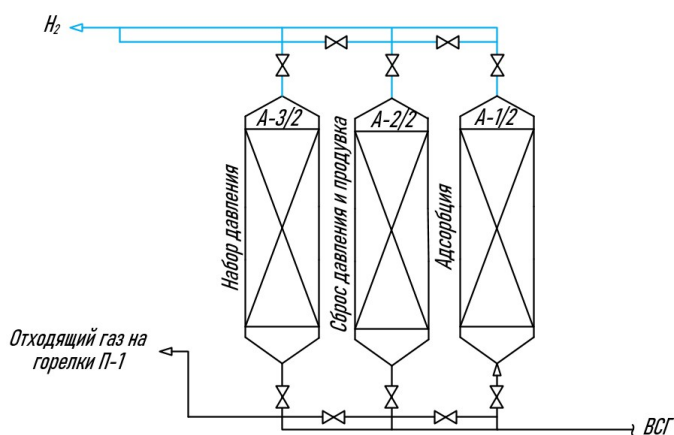


Рис. 6. Схема КЦА

Fig. 6. Pressure swing adsorption

Блок КЦА представляет собой установку, состоящую из минимум четырех адсорберов, каждый аппарат может быть заполнен поглотителем-адсорбентом. Слои сорбентов используются для удаления примесей и концентрирования газообразного водорода.

Поскольку нагрев или охлаждение не требуется, достигаются короткие циклы в пределах нескольких минут.

Каждый из адсорберов параллельно и попеременно переключается на следующие стадии:

- адсорбция,
- сброс давления,
- продувка,
- повышение давления.

Сначала сырьевая газовая смесь проходит через слой адсорбента, где примеси поглощаются из ВСГ. Когда слой адсорбента насыщается, начинается десорбция с параллельным сбросом давления. Часть потока очищенного H_2 применяют для увеличения давления в других адсорберах или для продувки. Для увеличения скорости десорбции проводится противоточный сброс давления. После окончания регенерации давление возвращается к уровню давления адсорбции и процесс начинается снова с самого начала. Отходящий газ блока КЦА может служить топливом в горелках печи конверсии.

3. *Мембранное разделение* (установка схематично отображена на рис. 7). Принцип действия заключен в различии скоростей диффузии газов при прохождении сквозь полупроницаемые мембраны (на основе палладия, к примеру твердый раствор Pd-Cu [Иевлев и др., 2019]).

Газообразная смесь водорода подается в установку с одной стороны мембраны. Поскольку водород обладает высокой проницаемостью через мембрану, он диффундирует через нее быстрее, чем другие газы. Нежелательные газообразные примеси задерживаются слоями мембраны и удаляются с другой стороны.

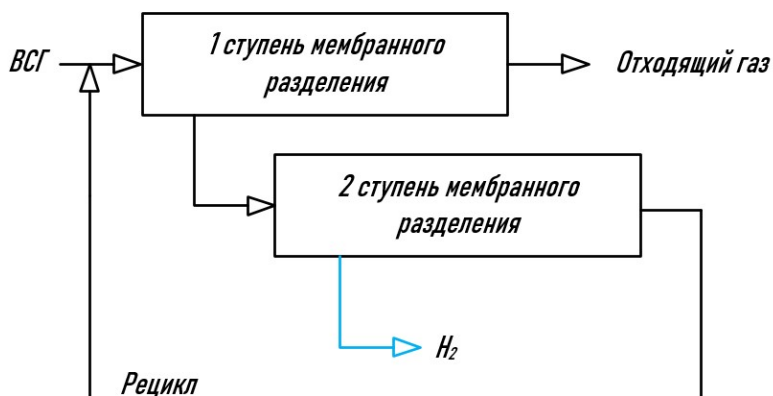


Рис. 7. Схема мембранной очистки

Fig. 7. Hydrogen membrane purification

Недостатком подобной системы очистки является потенциальное образование трещин и разрывов в мембране ввиду воздействия ароматических углеводородов, разъедающих слой мембраны, и жидкой фазы, способной закупорить проницаемые поры. Данная технология применима к малотоннажным установкам.

4. *Криогенное разделение.* Принцип работы установки заключен в охлаждении ВСГ и полной или частичной его конденсации. При содержании в обрабатываемом газе замерзающих компонентов (воды или CO_2) необходима предварительная подготовка сырья, что повышает капитальные вложения.

На рис. 8 отображена схема установки для очистки водорода в процессе гидрогенизации.

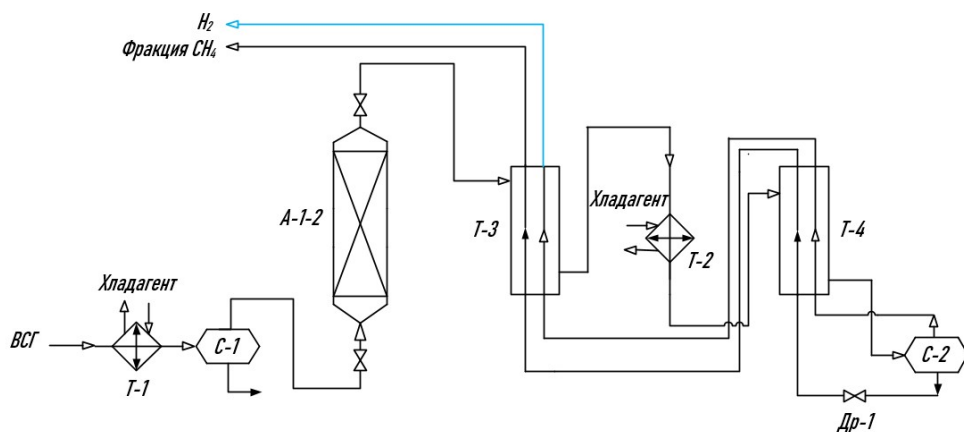


Рис. 8. Схема очистки отходящих газов процесса гидрогенизации криогенным методом: А-1-2 — адсорбер с алюмогелем и активированным углем; Т-1-4 — теплообменник; С-1-2 — сепаратор; Др-1 — дроссель

Fig. 8. Cryogenic method: А-1-2 — adsorber with alumolegel and activated carbon; Т-1-4 — heat exchanger; С-1-2 — separator; Др-1 — choke

Здесь на разделение в криогенный блок поступает смесь ВСГ с высоким содержанием водорода, в котором, кроме того, содержится некоторое количество тяжелых углеводородов от C_2 и выше.

Охлаждение в теплообменном оборудовании достигает следующих значений: Т-1 — охлаждение ВСГ до 5°C хладагентом, кипящим при 0°C ; Т-3 — охлаждение до -60°C обратными потоками водорода и метановой фракции; Т-2 — охлаждение до -65°C хладагентом, кипящим при -70°C ; Т-4 — стадия окончательного охлаждения до -145°C . Метановая фракция после С-2 дросселируется до $0,2\text{ МПа}$ [Словецкий, 2010].

5. *Металлогидридная технология очистки и хранения водорода.* Технология основана на принципе обратимой абсорбции газа металлогидридным материалом за счет протекания обратимой реакции поглощения и выделения водорода при образовании металлогидридов — соединений металлов с водородом.

Газообразный водород пропускают через интерметаллическое соединение (ИМС), которое поглощает примеси и нежелательные газы. Для хранения водорода металлогидриды

используют в качестве твердых носителей. Водород поглощается металлгидридом при высоком давлении и выделяется при низком, что позволяет компактно и безопасно хранить большие объемы газа в твердой форме.

Используемые металлгидридные материалы включают: лантанид-никелевые сплавы, интерметаллические соединения, комплексные гидриды.

На рис. 9 приведена упрощенная схема металлгидридной очистки водорода.

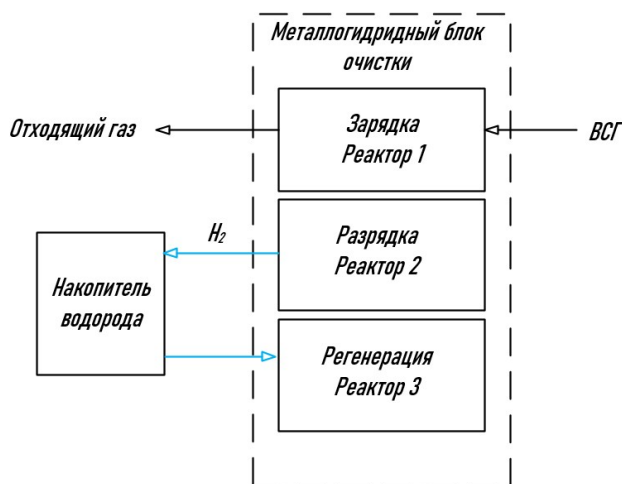


Рис. 9. Схема металлгидридной очистки

Fig. 9. Metal hydride purification

Для осуществления непрерывности работы установки применяют как минимум два металлгидридных реактора: один работает на стадии извлечения водорода из газовой смеси, второй — на стадии выделения уловленного чистого H_2 .

Ключевым недостатком технологии является «отравляющее» воздействие на ИМС присутствия в ВСГ даже незначительной концентрации CO , SO_2 и H_2S [Блинов и др., 2021].

Таким образом, проанализировав рассмотренные технологии, можно отметить процесс КЦА как оптимальный вариант очистки водорода и интеграции в процесс парового риформинга. Преимуществами технологии является высокая степень очистки водорода, умеренная себестоимость, отсутствие необходимости подготовки сырьевого газа и средние значения давлений 1...4 МПа во время всего процесса.

Результаты

Моделирование и расчет установки производства водорода с блоком КЦА

Для оценки эффективности метода совершенствования технологии производства водорода путем ввода блока КЦА использовался материальный баланс, рассчитанный в ходе моделирования процесса риформинга метана в ПО Aspen Hysys (рис. 10).

В табл. 2 представлен материальный баланс установки производства водорода (УПВ) мощностью 2,75 т/час по водороду с реинжинирингом установки блоком КЦА в соответствии с построенной моделью.

Таким образом, установка с блоком КЦА повышает концентрацию водорода в ВСГ с 82 до 99,99% мольн., выход на сырье составляет ≈12% масс. Отходящий газ направляется на горелки трубчатого реактора, вода после подготовки подается на смешение с сырьевым газом.

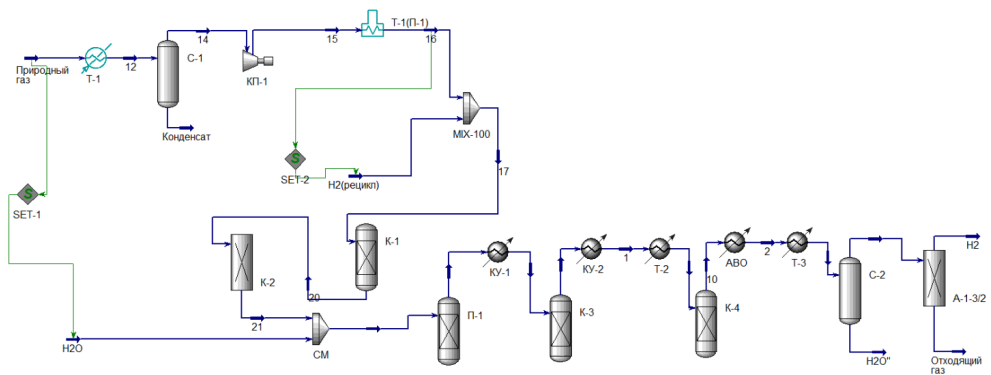


Рис. 10. Модель технологической схемы УПВ с КЦА
Fig. 10. Model of the production hydrogen unit with PSA

Табл. 2. Материальный баланс установки производства водорода
Table 2. Material balance of the hydrogen production unit

Вещество	% мольн.	% масс.	т/час	тыс. т/год
Приход:				
природный газ	33,00	31,05	7,21	57,70
вода	67,00	68,95	16,20	129,59
Всего	100,00	100,00	23,41	187,29
Расход:				
ВСГ, в т. ч.	—	11,77	2,76	22,05
водород	99,99	99,75	2,75	21,99
CO + CO ₂	0,01	0,25	0,01	0,06
вода	—	17,91	4,19	33,54
отходящий газ	—	70,32	16,46	131,70
CH ₄	21,78	9,64	1,59	12,69
CO ₂	68,80	83,53	13,75	110,01
CO	8,28	6,40	1,05	8,42
H ₂	0,30	0,02	0,00	0,02
H ₂ O	0,84	0,42	0,07	0,55
Всего	100,00	100,00	23,41	187,29

Далее проведем экономическую оценку возможности реализации предложенного метода реинжиниринга. Рассчитаем основные экономические показатели двух вариантов с реинжинирингом и без, а также NPV с учетом ставки дисконтирования 20%.

Капитальными затратами при реинжиниринге установки является оснащение УПВ адсорберами в количестве 6 единиц. Операционные затраты определены с учетом затрат на закупку адсорбента, его замену каждые 3 года, техническое обслуживание и ремонт оборудования. Денежные потоки на расчетный период представлены в табл. 3.

В результате за 11 лет достигается получение дополнительной прибыли в размере 45 условных единиц (у. е.).

Увеличение выручки достигается за счет продажи топлива высокого экологического класса марки Евро-5, получаемого при достижении высокой чистоты ВСГ на установке производства дизельного топлива (ДТ).

Отсутствие очистки на УПВ приводит к ограничению способности завода гидроочистки ДТ соответствовать высоким требованиям экологического класса дизельного топлива марки Евро-5, в котором содержание серы не превышает 0,001%. Использование слабоконцентрированного ВСГ в процессе гидроочистки приводит к снижению эффективности и селективности основных реакций и повышает риск побочных реакций.

Топливо, перерабатываемое на таком заводе, соответствует более низкому экологическому классу — Евро-3 (до 0,05% серы).

Табл. 3. Расчет денежных потоков, у. е.
Table 3. Cash flows, units

Год	Вар.	2024	2025	2026	2027	2028	2029	Σ1	Σ2
Выручка	B1	919	956	956	955	952	952	5 712	11 400
	B2	1 631	1 670	1 674	1 675	1 675	1 679	10 288	20 293
Налоги	B1	196	203	203	203	202	202	1 212	2 426
	B2	318	306	307	307	307	308	1 866	3 718
CAPEX	B1	—	—	—	—	—	—	—	0
	B2	2 800	—	—	—	—	—	—	2 800
OPEX	B1	—	—	—	—	—	—	—	0
	B2	210	—	—	210	—	—	420	840
ЧДП	B1	724	753	753	751	749	749	4 494	8 975
	B2	-1 697	1 364	1 368	1 158	1 368	1 372	8 004	12 935
NPV	B1	551	477	398	331	275	229	762	3 022
	B2	-1 291	865	722	510	502	419	1 341	3 067

Примечание. B1 — вариант УПВ по базовой технологии, продукт которой поступает на установку гидроочистки дизельного топлива мощностью 2 600 тыс. т/год; B2 — аналогичный вариант с включением блока КЦА в схему производства. Σ1 — сумма за период 2030–2035 гг.; Σ2 — итоговая сумма.

Note. B1 — a variant of the hydrogen production unit according to the basic technology, the product of which is supplied to the installation of diesel fuel with a capacity of 2,600 thousand tons/year; B2 — a similar option with PSA in the production scheme. Σ1 — the amount for the period 2030–2035; Σ2 — the total amount.

Оба проекта являются рентабельными. Однако отсутствие очистки приведет к получению водорода более низкой чистоты, что может ограничить способность завода соответствовать спецификациям клиентов и рыночному спросу. Это может привести к снижению доходов и рентабельности предприятия.

Производимый заводом водород более высокой чистоты позволит учесть требования клиентов и потенциально будет иметь более высокую цену на рынке. Как результат, у такого проекта более высокая доходность и предположительно более высокая прибыльность в долгосрочной перспективе.

Заключение

Предложено технологическое решение по совершенствованию базовой технологии производства водорода паровой конверсией путем установки блока КЦА с целью повышения чистоты продукта с 82 до 99,99% мольн. В ПО Nysys построена схема усовершенствованной УПВ и представлен материальный баланс установки.

Проведена технико-экономическая оценка УПВ с введением блока КЦА, оценены ключевые показатели эффективности разработанного варианта усовершенствования до 2035 г. Рост NPV составил 45 у. е.

Результаты могут быть полезны при проектировании, разработке и дальнейшем проведении исследований в области развития водородных технологий.

Список источников

- Блинов Д. В., Борзенко В. И., Бездудный А. В., Кулешов Н. В. 2021. Перспективные металл-гидридные технологии хранения и очистки водорода // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Том 23. № 2. С. 149–160. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-149-160>
- Дуников Д. О. (ред.). 2017. Водородные энергетические технологии. М.: ОИВТ РАН. 190 с.
- Иевлев В. М., Донцов А. И., Прижимов А. С., Новиков В. И., Рошан Н. Р. 2019. Мембраны для глубокой очистки водорода: от фундаментального исследования к практической реализации // Современные материалы и передовые производственные технологии (СМППТ-2019): тезисы докладов междунар. науч. конф., 25–28 июня 2019 г. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. С. 129. <https://www.elibrary.ru/nvgcvq>
- Кодряну Н. П., Ишмурзин А. А., Дауди Д. И., Насиров И. Р., Черных С. П. 2022. Теоретическая основа и практический анализ технологий для водородной стратегии Российской Федерации // Газовая промышленность. № 1 (827). С. 56–70. <https://neftegas.info/magazines/gas-industry/1/16> (дата обращения: 12.12.2024).
- Мейерс Р. А. 2011. Основные процессы нефтепереработки: справочник. СПб.: Профессия. 944 с.
- Словецкий Д. С. 2010. Сверхчистый водород // The Chemical Journal / Химический журнал. № 1-2. С. 33–35. https://tcj.ru/wp-content/uploads/2013/12/2010_1-2_33-35_sverhchisty-vodorod.pdf (дата обращения: 12.12.2024).
- Тарамов Ю. Х., Ахъядов Р. И., Эльмурзаев А. А. 2021. Производство водорода электролизом воды из полимерной электролитной мембраны (ПЭМ) // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том 17. № 4 (26). С. 33–37. <https://www.elibrary.ru/cydnvj>

- Kalman V., Voigt J., Jordan C., Harasek M. 2022. Hydrogen purification by pressure swing adsorption: high-pressure PSA performance in recovery from seasonal storage // *Sustainability*. Vol. 14. No. 21. Article 14037. <https://doi.org/10.3390/su142114037>
- Schneider S., Bajohr S., Graf F., Kolb T. 2020. Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse // *Chemie Ingenieur Technik*. Vol. 92. No. 8. Pp. 1023–1032. <https://doi.org/10.1002/cite.202000021>
- Sharma S., Ghoshal S. K. 2015. Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 43. Pp. 1151–1158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.093>
- Upham D. C., Agarwal V., Khechfe A., Snodgrass Z. R., Gordon M. J., Metiu H., McFarland E. W. 2017. Catalytic molten metals for the direct conversion of methane to hydrogen and separable carbon // *Science*. Vol. 358. No. 6365. Pp. 917–921. <https://doi.org/10.1126/science.aao5023>

References

- Blinov, D. V., Borzenko, V. I., Bezdudny, A. V., & Kuleshov, N. V. (2021). Prospective metal hydride hydrogen storage and purification technologies. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 23(2), 149–160. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-149-160> [In Russian]
- Dunikov, D. O. (Ed.). (2017). *Hydrogen Energy Technologies*. Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences. [In Russian]
- Ievlev, V. M., Dontsov, A. I., Prizhimov, A. S., Novikov, V. I., & Roshan, N. R. (2019). Membranes for deep hydrogen purification: from fundamental research to practical implementation. In *Modern Materials and Advanced Manufacturing Technology (MMAMT-2019): Abstracts of Reports of the International Scientific Conference, June 25–28, 2019* (p. 129). POLYTECH-PRESS. <https://www.elibrary.ru/nvgcvq> [In Russian]
- Kodryanu, N. P., Ishmurzin, A. A., Daudi, D. I., Nasirov, I. R., & Chernykh, S. P. (2022). Theoretical basis and practical analysis of the technologies for the hydrogen strategy of the Russian Federation. *Gas Industry*, (1), 56–70. Retrieved Dec. 12, 2024, from <https://neftegas.info/magazines/gas-industry/1/16> [In Russian]
- Meiers, R. A. (2011). *The Main Processes of Oil Refining*. Professiya. [In Russian]
- Slovetskiy, D. S. (2010). Ultrapure hydrogen. *The Chemical Journal*, (1-2), 33–35. Retrieved Dec. 12, 2024, from https://tcj.ru/wp-content/uploads/2013/12/2010_1-2_33-35_sverhchisty-vodorod.pdf [In Russian]
- Taramov, Yu. Kh., Akhyadov, R. I., & Elmurzaev, A. A. (2021). Hydrogen production by electrolysis of water from polymer electrolyte membrane (PEM). *Herald of GSTOU. Technical Sciences*, 17(4), 33–37. <https://www.elibrary.ru/cydnvj> [In Russian]
- Kalman, V., Voigt, J., Jordan, C., & Harasek, M. (2022). Hydrogen purification by pressure swing adsorption: high-pressure PSA performance in recovery from seasonal storage. *Sustainability*, 14(21), Article 14037. <https://doi.org/10.3390/su142114037>
- Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F., & Kolb, T. (2020). Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse. *Chemie Ingenieur Technik*, 92(8), 1023–1032. <https://doi.org/10.1002/cite.202000021>

Sharma, S., & Ghoshal, S. K. (2015). Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1151–1158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.093>

Upham, D. C., Agarwal, V., Khechfe, A., Snodgrass, Z. R., Gordon, M. J., Metiu, H., & McFarland, E. W. (2017). Catalytic molten metals for the direct conversion of methane to hydrogen and separable carbon. *Science*, 358(6365), 917–921. <https://doi.org/10.1126/science.aao5023>

Информация об авторе

Анастасия Тимуровна Ибрагимова, ведущий специалист, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия

at_ibragimova@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9519-0410>

Information about the author

Anastasiya T. Ibragimova, Leading Specialist, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia
at_ibragimova@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9519-0410>