

УДК 662.7

**ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ**© 2021 г. В. М. Зайченко<sup>1</sup>, \*, Э. Е. Сон<sup>1</sup>, А. А. Чернявский<sup>1</sup><sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

\*e-mail: zaitch@oivtran.ru

Поступила в редакцию 17.03.2021 г.

После доработки 23.04.2021 г.

Принята к публикации 26.04.2021 г.

Антропогенное влияние на природное равновесие — одно из наиболее востребованных направлений в современной практике научно-технических исследований. Мир переходит к низкоуглеродистому развитию. Значительная роль в этом процессе отводится водородной энергетике. Показано, что существующие методы получения водорода, применяемые в настоящее время в химической промышленности, не могут быть эффективно использованы в энергетике. Необходима разработка новых технологий, обеспечивающих экономически оправданное и экологически чистое получение водорода для энергетики. Информация о новых методах получения водорода, разрабатываемых в Объединенном институте высоких температур Российской академии наук, представлена в данной статье.

*Ключевые слова:* водород, энергетическая утилизация отходов, возобновляемые источники энергии, пироуглерод, распределенная энергетика

DOI: 10.31857/S0002331021030109

**ВВЕДЕНИЕ**

Прошедший год был отмечен принятием достаточно важных решений в области сохранения и использования новых энергетических технологий, направленных на сохранение экологического равновесия. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 12.10.2020 № 2634-р утвержден план мероприятий (“дорожная карта”) по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 г. Этот документ направлен не только на увеличение производства и расширение сферы применения водорода в качестве экологически чистого энергоносителя, но также на создание условий вхождения страны в число мировых лидеров по производству и экспорту водорода. В последние дни уходящего года В.В. Путин провел рабочую встречу с Председателем Правительства Российской Федерации М.В. Мишустиним, на которой обсуждались вопросы, связанные с использованием в стране водородного топлива. Подчеркнем, что в Распоряжении Правительства РФ ставится задача не только использования водорода в транспортных и энергетических установках на территории нашей страны, но и выход нашей страны на лидирующие позиции по производству данного вида топлива. Последнее означает разработку и освоение новых методов и технологий получения водорода, использование которых позволит решить поставленные задачи экономически оправданными методами.

В настоящее время основным процессом получения водорода является каталитическая конверсия природного газа. Процесс является двухстадийным.



При взаимодействии метана с водяным паром образуется водород и окись углерода. Затем окись конвертируется в двуокись углерода, которая удаляется из реакционного объема с применением моноэтаноламиновой очистки. В конечном итоге образующаяся в процессе получения водорода двуокись углерода выбрасывается в атмосферу. Каталитической конверсией природного газа производится основное количество водорода в мире. Водород используется в химической индустрии для синтеза аммиака и метанола. Согласно существующим данным [1], при производстве водорода в атмосферу поступает ~830 млн тонн  $\text{CO}_2$  [2]. Суммарный годовой объем эмиссии углекислого газа на Земле на сегодняшний день оценивается в 36573 млн т (100%). Т.е. выбросы от производства водорода с использованием каталитической конверсии природного газа, состоящие из выбросов, получаемых при нагреве реакторов конверсии и очистке получаемых продуктов, составляют около 2.2% от общего количества  $\text{CO}_2$ , поступающего в атмосферу нашей планеты из других источников.

Основным источником  $\text{CO}_2$  являются выбросы от использования ископаемых топлив. При топливном использовании биомассы природный баланс двуокиси углерода не нарушается. Растения поглощают двуокись углерода из атмосферы в процессе роста. Такое же количество двуокиси углерода эмитируется в процессе сжигания биомассы, либо в процессах ее естественной утилизации при гниении. Использование топлива, извлеченного из толщи земли, которое на поверхности природой не предусмотрено, приводит к нарушению природного равновесия. Увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере является одним из следствий этих действий.

Назначение водородной энергетики – сокращение антропогенного воздействия на природное равновесие. Эта задача может быть выполнена только при условии, что технологии, применяемые для производства водорода для энергетического использования, будут также экологически безопасными. Мы не будем останавливаться на методах получения водорода, используемых в химической индустрии, которые не могут быть использованы для водородной энергетики. Реализация этих технологий связана со значительными выбросами двуокиси углерода. Кроме того, необходимо учитывать, что цена водорода, получаемого каталитической конверсией метана, достаточно высока. Согласно выполненным оценкам, получение энергии с использованием водорода, получаемого по технологии каталитической конверсии, будет значительно дороже, чем с использованием традиционных топлив. Это означает, что водородная энергетика будет экономически нерентабельна. Необходима разработка методов и технологий получения водорода, которые обеспечат экономически оправданное использование данного вида топлива в энергетических установках.

В настоящее время именно по этому пути развития и внедрения методов водородной энергетики идут многие развитые страны. Предлагаемые методы получения водорода связаны с решением задачи обеспечения нормального функционирования солнечной и ветровой энергетики. Это своеобразный метод резервирования возобновляемых источников энергии. Когда потребление энергии отсутствует, а ветровая (солнечная) энергия есть, станция работает. При этом производимую ветровую (солнечную) энергию предлагается использовать для получения водорода электролизом воды. Это своеобразный метод аккумуляирования возобновляемой энергии. Электролиз – очень дорогостоящий процесс. Но в этом случае он экономически оправдан, поскольку для его реализации используется электроэнергия в те моменты времени, когда она “лишняя”, и ее потребление отсутствует.

Ориентация на широкое использование солнечной и ветровой энергии в западном мире и необходимость решения одной из основных проблем возобновляемой энергетики, заключающейся в резервировании энергии, является объяснением значительного интереса к развитию водородной энергетики в последнее время.

Конечно, при формировании новых подходов в развитии и модернизации существующей системы энергетического обеспечения мы должны принимать во внимание последние новации в зарубежных странах. Определяющим при принятии решений о технической модернизации тех или иных областей техники в нашей стране должен быть учет местных климатических и географических условий, существующего задела в области научно-технического обеспечения планируемых нововведений, существующая ресурсная база. Подходы к развитию водородной энергетики, предлагаемые в западных странах, базируются в настоящее время, в основном, на использовании солнечно-ветровой энергетики. Отработка технологий водородной энергетики проводится с целью использования ее в качестве резервирования при развитии возобновляемой энергетики в будущем.

В настоящее время резервирование возобновляемых источников в западных странах осуществляется сетью. В нашей стране этот метод может быть использован в достаточно ограниченных пределах. У нас примерно 60% территории, на которой проживают 20 млн человек, не имеет централизованного энергоснабжения. Именно на этих территориях организация распределенного энергоснабжения без использования привозных ископаемых топлив является насущной и первоочередной задачей.

Значительное место в развитии возобновляемых методов получения энергии отводится энергетическому использованию биомассы. В Западной Европе создаются плантации по выращиванию быстрорастущих деревьев, которые также должны использоваться в качестве возобновляемого энергетического топлива. Нам не надо создавать подобные плантации, поскольку на территории нашей страны находится примерно 24% мировых запасов древесины и около 50% торфа. Именно на базе данных ресурсов должен осуществляться переход на альтернативную энергетику в нашей стране. Для этого необходима разработка новых технологий энергетического использования биомассы, отвечающих современным требованиям по экологии.

### ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ МЕСТНЫХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ (ТОРФ, ДРЕВЕСНЫЕ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ОТХОДЫ, ОТХОДЫ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ) С ПОЛУЧЕНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ГАЗА С ВЫСОКИМИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Использование местных топливно-энергетических ресурсов экономически является более выгодным по отношению к централизованному энергоснабжению [3]. Сравнение параметров технико-экономической эффективности централизованной и распределенной энергетики представлено в [4]. В [3] также приведено описание новой технологии термической конверсии биомассы, разработанной в ОИВТ РАН, с получением энергетического газа, состоящего примерно на 90% из  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ . Состав газов, получаемый по разрабатываемой технологии из различных видов биомассы, приведен в табл. 1.

Суммарное содержание  $\text{H}_2 + \text{CO}$  в получаемом газе составляет порядка 90%. При этом отношение  $\text{H}_2/\text{CO}$  для различных видов биомассы также различно. Продуктами процесса каталитической конверсии природного газа является также смесь водорода и окиси углерода.

По технологии ОИВТ РАН при переработке 1 кг биомассы различных видов производится порядка 1.0–1.2 м<sup>3</sup> смеси  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ . В дальнейшем такие же методы выделения водорода, которые используются в промышленности в процессах каталитической конверсии природного газа, могут быть использованы и в данной технологии, в которой водород производится из биомассы. При этом возникает вопрос о необходимых затратах тепловой энергии для процесса термической переработки биомассы и очистки получаемой смеси газов от окиси углерода. По оценкам, выполненным в ОИВТ РАН, на

Таблица 1.

Сырье для производства синтез-газа	Свойства синтез-газа	
	H <sub>2</sub> + CO, %	H <sub>2</sub> /CO
Древесные пеллеты	92	1.0
Торфяные пеллеты	90	1.2
Соломенные пеллеты	78	1.0
Пеллеты из лузги подсолнечника	80	1.2
Пометно-подстилочная масса	83	1.2
Осадки сточных вод	95	1.8
Опил (отходы целлюлозно-бумажного производства)	96	1.0
Кора древесная	92	1.6

основании экспериментальной апробации метода получения водорода при термической переработке биомассы, собственное тепловое потребление процесса может быть обеспечено за счет использования 15–20% горючих газов, получаемых в данном процессе.

Водород в максимальном соотношении к окиси углерода может быть получен из осадков сточных вод (табл. 1). В этом случае решается две задачи: получение водорода и утилизация осадков сточных вод. Переработка данного вида отходов жизнедеятельности является большой проблемой в настоящее время. Как известно, хранилища иловых осадков сточных вод занимают значительные территории в нашей стране и оказывают вредное влияние на состояние окружающей среды. Предлагаемый метод позволяет решить эту проблему. При этом производится водород, который может быть использован для создания установок распределенной генерации, на которых будет производиться экологически чистая электроэнергия.

Соотношение водорода и окиси углерода, полученное для осадков сточных вод, является оптимальным для получения из данной газовой смеси искусственных жидких топлив. Полученные в ОИВТ РАН экспериментальные результаты по конверсии данной смеси газов показали, что из одного кг осадков сточных вод при трехступенчатом синтезе может быть получено порядка 154 г бензина с октановым числом 92. У нас в стране достаточно много регионов, в которых имеются определенные трудности со снабжением жидкими топливами. И, как правило, в этих регионах имеются ресурсы осадков сточных вод. Предлагаемые технические решения эту проблему позволяют решить.

В таблице 1 приведены показатели, полученные при переработке различных видов отходов, в том числе сельскохозяйственных. Именно при переработке таких отходов с использованием разрабатываемых технологий могут быть получены продукты необходимые для решения проблем, связанных с переходом на безуглеродную энергетику. Это является главным трендом модернизации энергетических систем в настоящее время.

Идея переработки отходов в экологически чистое топливо может быть реализована не только по отношению к различным видам биомасс, но и применительно к переработке других видов отходов. В частности, к углеводородным газам, к которым могут быть отнесены попутные нефтяные газы (ПНГ), а также отходящие газы различных нефтехимических производств. К разряду “неперерабатываемых” могут быть отнесены газы низкодебитных месторождений, которые из-за низкого пластового давления не могут быть транспортированы с использованием трубопроводов. В этом случае необходима переработка данных газов непосредственно на месторождении.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЧИСТЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СОВМЕСТНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ (ПОПУТНЫХ ГАЗОВ)

В данном разделе изложены результаты, полученные при проведении исследований по разработке новой технологии получения углеродных материалов высокой чистоты и водорода, применительно к использованию в качестве одного из компонентов переработки древесины. В принципе, для этих целей могут быть использованы и другие виды биомассы, торф, древесные и сельскохозяйственные отходы, отходы жизнедеятельности различных видов. Данная технология может рассматриваться в качестве переработки различных видов биомассы в виде отходов с получением полезных продуктов. Суть разрабатываемого процесса заключается в получении углеродного композита, состоящего из углерода, входящего в состав биомассы (в рассматриваемом случае древесины), и углерода сырьевых газов. Процесс является двухстадийным. На первой стадии осуществляется термическая деструкция древесины с получением древесного угля пористой структуры. На второй стадии в пористой засыпке древесного угля осуществляется гетерогенное термическое разложение сырьевых газов с получением пироуглерода, который, откладываясь на внутренней и внешней поверхности пор древесного угля, превращает его в монолит с высоким содержанием углерода.

Разрабатываемый процесс прошел апробацию на экспериментальных установках ОИВТ РАН. Основным элементом установки для совместной термической переработки древесных отходов и углеводородов является высокотемпературная печь или реактор. Газы, подаваемые на крекинг, и измельченные (гранулированные) древесные отходы движутся в противотоке: отходы — сверху вниз, газы — снизу вверх. Выгрузка готового материала осуществляется в нижней части высокотемпературного реактора. Термическое разложение углеводородов происходит в нижней высокотемпературной зоне реактора. За счет тепла газообразных продуктов реакции термического разложения сырьевых газов, при движении в противотоке с измельченной древесиной и внешнего обогрева происходит получение древесного угля. Таким образом, в высокотемпературную зону древесина поступает уже в виде древесного угля. Крекинг попутных нефтяных газов (ПНГ) в среде высокопористого древесного угля осуществляется по линии образования пироуглерода, который, откладываясь в порах, образует углеродный монолит на каркасе (матрице) исходного древесного угля. В результате из пористой структуры древесного угля получается высокопрочный монолит с высоким содержанием углерода, состоящий из углерода древесины и углерода ПНГ. В выполненных экспериментах по совместной термической переработке сырьевых газов и древесных отходов содержание углерода в получаемом продукте находилось на уровне 96,0–99,9%.

Поскольку температурный диапазон термической диссоциации метана (основной составляющей ПНГ) с приемлемой скоростью составляет 950–1000°C, то максимальную температуру греющих газов можно ограничить величиной 1100°C. Указанный уровень температур предусматривает выполнение большей части корпуса реакционной зоны из нержавеющей стали.

Выгрузка готового материала осуществляется в нижней части реактора. Газообразные продукты реакции на 80–85% состоят из водорода. Получаемые в данном процессе углеродные материалы получили название “гранулированный пироуглерод”.

Основные физико-технические свойства нового материала (средние по десяти опытным партиям) приведены в табл. 2.

Плотность материала зависит от режимных параметров процесса переработки и может варьироваться в пределах от 0,7 до 1,8 г/см<sup>3</sup>. Перспективным направлением использования данной технологии является переработка попутных нефтяных газов (ПНГ). По минимальным оценкам, которые существуют в литературе, в стране еже-



**Рис. 1.** Фотография углеродных материалов, получаемых при совместной переработке биомассы (древесных отходов) и углеводородных (попутных) газов.

годно сжигается в факелах порядка 20 млрд м<sup>3</sup> ПНГ. При использовании разрабатываемой технологии – совместной переработки углеводородных газов и биомассы – из данного объема ПНГ может быть получено порядка 15 млн тонн пироуглерода и 40 млрд м<sup>3</sup> водорода, что составляет примерно 5% от мирового производства водорода в настоящее время.

Себестоимость углеродных материалов, получаемых при использовании попутных газов – \$80–110 за тонну. Цена углеродных материалов данного качества – с содержа-

**Таблица 2.**

Показатель	Значение
Влажность, %	0.28
Летучие, %	0.66
Зола, %	1.17
Сера, %	0.027
Углерод, %	97.92
Водород, %	0.20
Q, МДж/кг	32.48
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0.93

нием углерода более 96% – на внутреннем рынке РФ доходит до \$800 за тонну [5], на мировых рынках – до \$2000–5000 за тонну [6].

По имеющимся данным, несбалансированный спрос металлургической промышленности только западной Европы в чистых углеродных материалах подобного качества составляет около 8 млн тонн. При наличии биомассы (древесные и сельскохозяйственные отходы, торф) данная технология может рассматриваться в качестве одного из возможных направлений переработки природного и попутных нефтяных газов, а также природного газа низкодбитных месторождений.

Цены на углеродные материалы, получаемые по разрабатываемой технологии, значительно ниже, чем принятые в настоящее время в нашей стране и за рубежом цены на углеродные материалы подобного состава и ниже существующих цен на кокс.

Металлургическое производство, являющееся одним из главных потребителей топливно-энергетических ресурсов в стране, может стать значительным потребителем энергоресурсов, получаемых из биомассы.

За период с 2000 по 2020 гг. цена металлургического кокса в нашей стране возросла в четыре раза: с \$100 до \$400 за тонну. Идет активный поиск возможностей вовлечения в оборот новых месторождений коксующихся углей. Как известно, производство кокса из углей считается одним из самых экологически неблагоприятных. Материалы, получаемые по разрабатываемой технологии, могут рассматриваться в качестве заменителя металлургического кокса.

На рисунке 2 представлено изменение цен в период с 2000 г. по 2020 г. на чистые углеродные материалы, названные нами “гранулированный пироуглерод”. Приведены средние мировые и внутренние цены на углеродные материалы с содержанием углерода выше 96%, а также средние цены на кокс. Для РФ рассмотрены два сценария получения данного материала. При первом водород отпускается потребителю по ценам, которые являются средними по стране на водород подобного качества (нижняя граница цен); во втором случае водород не используется и сжигается в факеле (верхняя граница цен).

Как показывают технико-экономические оценки, производство пироуглерода является экономически выгодным даже при условии, что получаемый при этом водород не используется в энергетических процессах, а сжигается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С энергетическим использованием водорода в настоящее время связывают перспективы снижения отрицательного влияния на природное равновесие со стороны топливно-энергетического комплекса. Очевидно, что использование существующих технологий получения водорода, разработанных применительно к химической индустрии, для этих целей не является оптимальным. Необходима разработка новых методов получения водорода, отвечающих современным требованиям по экологической безопасности.

Одна из важных проблем настоящего времени – утилизация отходов. Получение водорода из отходов является перспективным направлением энергетической утилизации данного вида материалов. В статье рассмотрены возможные пути решения данной проблемы применительно к определенным видам отходов жизнедеятельности, древесным и сельскохозяйственным отходам, а также при использовании попутного нефтяного газа. В частности, показано, что использование в качестве сырья по разрабатываемым технологиям осадков сточных вод может стать эффективным и экономически обоснованным решением проблемы утилизации данного вида отходов.

Суть технологии совместного производства водорода с пироуглеродом состоит в создании армирующего каркаса, который в процессе карбонизации является матрицей для осаждения пироуглерода из парогазовой фазы.

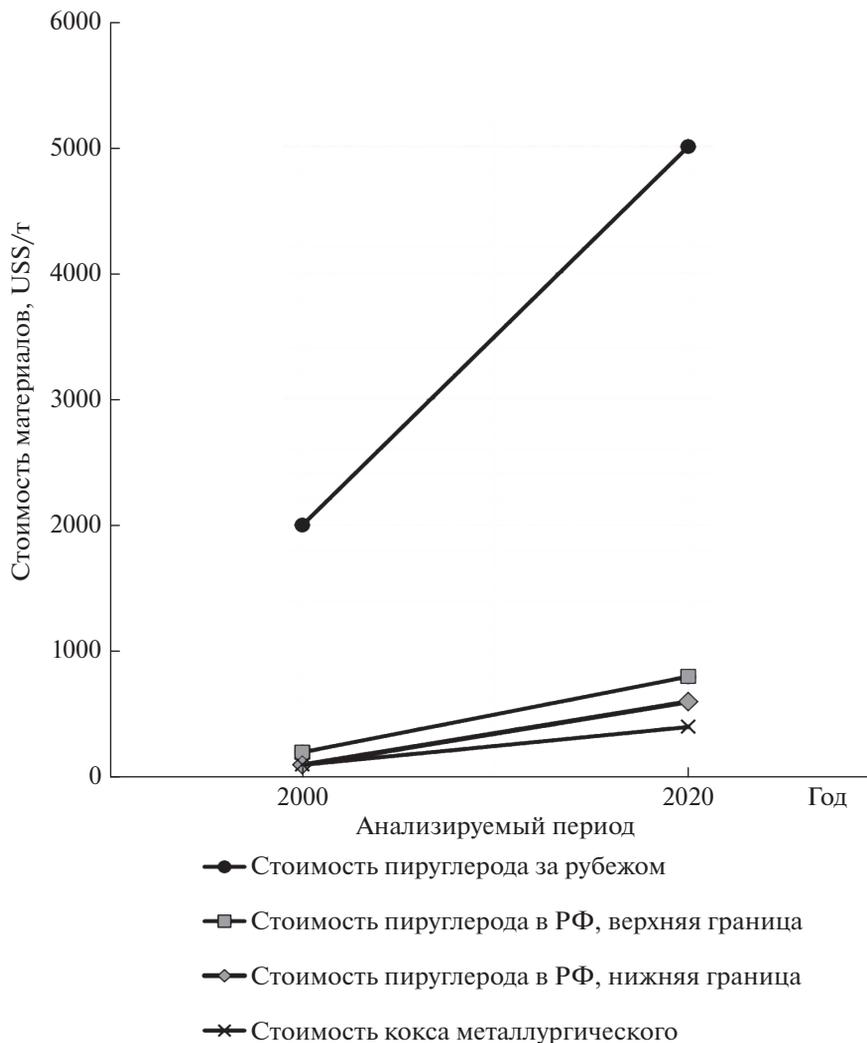


Рис. 2. Изменение цены на чистые углеродные материалы в период с 2000 по 2020 гг.

В качестве сырья для получения водорода традиционно используется природный газ. Получение водорода из природного газа связано с большими затратами. Значительные объемы водорода могут быть получены из попутных нефтяных газов. В нашей стране проблема утилизации ПНГ требует своего решения. Предлагаемая технология позволяет одновременно с водородом получать материалы, которые имеют высокую стоимость и пользуются большим спросом на международном и внутреннем рынках. Реализация данных подходов позволит сделать “водородную энергетику” выгодной с экономической точки зрения.

Рассматриваемые методы получения водорода и пироглерода отработаны в ОИВТ РАН на крупномасштабных экспериментальных установках. Следующим шагом должна явиться опытно-промышленная отработка описанных технологий, по результатам которых будет разработана техническая документация, необходимая для орга-

низации промышленного производства установок данного назначения. Решение данных проблем позволит нашей стране, как это предполагается в Распоряжении Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р, войти в число мировых лидеров по производству и экспорту водорода.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12.10. 2020 № 2634-р.
2. Стенограмма встречи Президента России Путина В.В. с премьер-министром РФ Мишустиным М.В. // <http://kremlin.ru/events/president/news/64806>.
3. *Зайченко В.М.* Основные направления развития распределенной энергетики. Региональная энергетика и энергосбережение. 2019. № 1. С. 88–91.
4. *Зайченко В.М., Чернявский А.А.* Сравнение характеристик распределенных и централизованных схем энергоснабжения. Промышленная энергетика. 2016. № 1. С. 2–8.
5. Бизнес по утилизации отходов. М.: ООО “ЭкоПромСервис”, 2020.
6. Источник высокого качества пироуглерода / [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com), 2020.

### Hydrogen Energy and Waste Processing

V. M. Zaichenko<sup>a, \*</sup>, E. E. Son<sup>a</sup>, and A. A. Chernyavskii<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Joint institute for High Temperature of Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

*\*e-mail: zaitch@oivtran.ru*

Anthropogenic influence on natural balance is one of the most demanded topics in modern practice of scientific and technical research. The world is moving towards low-carbon development. Hydrogen energy plays a significant role in this process. It is shown that the existing methods of hydrogen production, which are currently used in the chemical industry, cannot be effectively used in power engineering. It is necessary to develop new technologies that provide economically justified and environmentally friendly production of hydrogen for power engineering. Information on new methods of hydrogen production being developed at the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences is presented in this article.

*Keywords:* hydrogen, energy waste disposal, renewable energy sources, pyrocarbon, distributed energy