

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Сибирский государственный индустриальный университет»

Кафедра теплоэнергетики и экологии

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

выпускной квалификационной работы:

**Исследование возможности использования водорода как технологического
энергоносителя в теплоэнергетике Кузбасса**

ОБУЧАЮЩИЙСЯ

(подпись)

Коньшев Леонид Алексеевич

(фамилия, имя, отчество)

допущен к защите в государственной экзаменационной комиссии «30» июня 2020 г.

Руководитель

к.т.н., доцент

(уч. степень, звание)

(подпись)

Михайличенко Т.А.

(фамилия, имя, отчество)

И.о зав. кафедрой

к.т.н., доцент

(уч. степень, звание)

(подпись)

Темлянцева Е.Н.

(фамилия, имя, отчество)

Директор института
металлургии и
материаловедения

д.т.н., профессор

(уч. степень, звание)

(подпись)

Галевский Г.В.

(фамилия, имя, отчество)

Новокузнецк

2020 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

Кафедра теплоэнергетики и экологии

УТВЕРЖДАЮ

И.о. заведующего кафедрой

_____ Темлянцев Е.Н.

(подпись)

«12» февраля 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу
обучающегося Кобышева Леонида Алексеевича

группы МТ-16

Тема работы: «Исследование возможности использования водорода как технологического энергоносителя в теплоэнергетике Кузбасса»

Утверждена приказом от 12.02.2020 г. № 124-об

Характер работы: аналитическая работа.

Сроки сдачи обучающимся законченной работы «20» июня 2020 г.

Исходные условия и данные к работе: учебные пособия, монографии, справочники, периодическая литература, диссертационные исследования, научная литература и статьи по теме исследования, нормативные документы.

Цель, задачи работы: анализ методов производства водорода и его использования в качестве топлива для генерации тепловой и электрической энергии в различных установках. Представление основных способов получения водорода, которые могут быть использованы в энергетике; проведение сравнительного анализа технологий производства водорода; патентная проработка; выбор устройства для производства тепловой и электроэнергии посредством сжигания водородного топлива.

Содержание работы: Введение; Методы генерации водорода; Метод преобразования биологической массы; Термохимический способ разложения воды; Плазмохимические методы генерации водорода из газообразного топлива; Метод паровой конверсии метана; Получение водорода методом электролиза воды; Получение водорода посредством газификации твердых ископаемых; Патентная проработка; Выбор и обоснование предмета поиска; Регламент патентного поиска; Результаты патентного поиска; Электролизер высокого давления; Водородный парогенератор; Анализ результатов поиска перспективных установок; Сравнительная характеристика прототипов электролизеров; Сравнительная характеристика прототипов парогенераторов; Выводы по главе; Оптимальные

методы производства водорода и энергии на его основе; Методы производства водорода. Выбор и обоснование; Аналитическое сравнение методов паровой конверсии метана и электролиза воды; Расчет мощности электролизной установки Западно-Сибирской ТЭЦ; Метод производства тепловой и электрической энергии при использовании водородного топлива; Выводы по главе; Зарубежный опыт генерации тепловой и электрической энергии при использовании водорода; Водородная станция Энель Фузина; Водородный путь Кавасаки; Безопасность жизнедеятельности при эксплуатации объектов теплоэнергетики; Социальные и правовые нормы трудового законодательства; Промышленная санитария; Пожарная безопасность; Предотвращение вредного воздействия шумов и вибраций на человека; Предотвращение инцидентов, связанных с поражением электрическим током; Особенности работы с водородным топливом; Меры безопасности при работе с водородом; Заключение; Список использованной литературы.

Предполагаемое использование результатов: результаты представляют интерес для разработки проектных решений по модернизации и реконструкции существующих электростанций Кузбасса, работающих на твердом топливе.

Перечень графического материала: Структура мирового производства водорода; Результаты патентного поиска полезных моделей электролизеров; Результаты патентного поиска полезных моделей парогенераторов; Схема электролизера высокого давления; Удельные капиталовложения в электролизные установки; Прогнозные удельные капиталовложения в электролизные установки; Показатели себестоимости водорода в зависимости от методов его генерации; Смесительная головка парогенератора; Принципиальная схема парогенератора; Панорамный вид на электростанцию; Принципиальная тепловая схема ПГУ на ТЭС; Тестовая установка водородной КГС Kawasaki; Контрольный экран станции при режиме потребления $H_2 = 100\%$; Первичные средства пожаротушения; Определение группы сосуда.

Консультанты по работе с указанием относящихся к ним разделов работы:

Нормоконтроль: Михайличенко Т.А.

Руководитель _____
(подпись)

АННОТАЦИЯ

Коньшев Л.А. Исследование возможности использования водорода как технологического энергоносителя в теплоэнергетике Кузбасса: выпускная квалификационная работа по направлению подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника» (13.03.01). – Новокузнецк, 2020. – 64 с., табл. 5, ил. 10, источников 66, презентация – 14 слайдов.

В процессе выполнения работы был проведен сравнительный анализ существующих методов генерации водородного топлива, патентные изыскания на предмет наличия новых полезных моделей электролизеров и парогенераторов. На примере уже существующей отечественной модели электролизера были проведены расчеты, подтверждающие превосходство предлагаемого метода над методом паровой конверсии метана.

В результате разработки были представлены существующие промышленные объекты генерации электрической и тепловой энергии, освещена специфика безопасности жизнедеятельности при работе с водородным топливом.

Результаты работы представляют интерес для разработки проектных решений по модернизации и реконструкции существующих электростанций Кузбасса, работающих на твердом топливе.

Исполнитель

(подпись)

Коньшев Л.А.

ANNOTATION

Konyshev L.A. Study of the possibility of using hydrogen as a technological energy carrier in the Kuzbass heat power engineering: final qualification work in the direction of preparation “Heat power and thermal engineering” (13.03.01) – Novokuznetsk, 2020. – 64 pages, tables 5, illustrations 10, sources 66, the presentation – 14 slides.

The purpose of the work is to analyze the methods of hydrogen production and its use as a fuel for the generation of thermal and electric energy in various plants.

In the process of performing the work, a comparative analysis of existing methods for generating hydrogen fuel was carried out, as well as patent surveys for the availability of new useful models of electrolyzers and steam generators. On the example of an existing domestic model of the electrolyzer, calculations were carried out confirming the superiority of the proposed method over the methane steam reforming method.

As a result of the development, existing industrial facilities for generating electric and thermal energy were presented, specifics of life safety during work with hydrogen fuel were highlighted.

The results of the work are of interest for the development of design solutions for the modernization and reconstruction of existing Kuzbass power plants operating on solid fuel.

The executor

(signature)

Konyshev L.A.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

Сокращения:

ПГУ – Парогазовая установка.

ПСУ – Паросиловая установка.

ГТУ – Газотурбинная установка.

ТЭС – Тепловая электростанция.

ТЭЦ – Теплоэлектроцентраль.

КС – Камера сгорания.

ПКМ – Паровая конверсия метана.

КГС – Когенерационная система.

ГВС – Горячее водоснабжение.

КИПиА – Контрольно-измерительные приборы и аппаратура.

ПСХ – Паросиловое хозяйство.

СИЗ – Средства индивидуальной защиты.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
1 Методы генерации водорода	11
1.1 Метод преобразования биологической массы.....	12
1.2 Термохимический способ разложения воды	12
1.3 Плазмохимические методы генерации водорода из газообразного топлива.....	14
1.4 Метод паровой конверсии метана	15
1.5 Получение водорода методом электролиза воды	17
1.6 Получение водорода посредством газификации твердых ископаемых	18
2 Патентная проработка.....	20
2.1 Выбор и обоснование предмета поиска	20
2.2 Регламент патентного поиска	20
2.3 Результаты патентного поиска	20
2.3.1 Электролизер высокого давления.....	20
2.3.2 Водородный парогенератор	21
2.4 Анализ результатов поиска перспективных установок.....	22
2.4.1 Сравнительная характеристика прототипов электролизеров	22
2.4.2 Сравнительная характеристика прототипов парогенераторов	23
2.5 Выводы по главе.....	24
3 Оптимальные методы производства водорода и энергии на его основе.....	25
3.1 Методы производства водорода. Выбор и обоснование	25

3.2 Аналитическое сравнение методов паровой конверсии метана и электролиза воды	28
3.3 Расчет мощности электролизной установки Западно-Сибирской ТЭЦ	31
3.4 Метод производства тепловой и электрической энергии	33
при использовании водородного топлива.....	33
3.5 Выводы по главе.....	36
4 Зарубежный опыт генерации тепловой и электрической	37
энергии при использовании водорода	37
4.1 Водородная станция Энель Фузина	37
4.2 Водородный путь Kawasaki	40
5 Безопасность жизнедеятельности при эксплуатации объектов теплоэнергетики	43
5.1 Социальные и правовые нормы трудового законодательства	43
5.2 Промышленная санитария	44
5.3 Пожарная безопасность	45
5.4 Предотвращение вредного воздействия шумов и вибраций на человека.....	46
5.5 Предотвращение инцидентов, связанных с поражением	47
электрическим током	47
5.6 Особенности работы с водородным топливом	49
5.7 Меры безопасности при работе с водородом	51
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач энергетики является поиск альтернативных источников энергии. Как известно, ресурсы планеты конечны, а темпы роста потребителей в количественном и качественном отношении все увеличиваются. Кроме того, экологическая повестка конца второго, начала третьего десятилетия непреклонна, а подписание Россией Парижского соглашения [1] еще сильнее актуализирует изыскания в области энергетики, альтернативной нынешней.

Сжигание углеродного топлива все еще считается предпочтительным методом генерации энергии, поскольку является наиболее исследованным и предсказуемым с экономической и технологической точки зрения. Тем не менее, ученые еще в середине прошлого столетия наряду с атомной энергетикой заинтересовались перспективами использования водорода в качестве топлива.

Сегодня, спустя более чем полувека накопленные знания и результаты исследований методов выработки «чистой» энергии из водорода могут стать серьезным подспорьем как для отдельных предприятий, преследующих цель получить экономическую выгоду, так и для государства в целом, чья приоритетная задача – сберечь природу от огромных эмиссий вредных газов. Именно сейчас водород может стать надежной опорой экономики и помочь сохранить планету для следующих поколений, что в полной мере соответствует Концепции устойчивого развития [2], которую разработало и приняло мировое сообщество государств.

Целью настоящей работы является проведение анализа методов производства водорода и его использования в качестве топлива для генерации тепловой и электрической энергии в различных установках.

Задачами работы являются:

- представление основных способов получения водорода, которые могут быть использованы в энергетике;
- проведение сравнительного анализа технологий производства водорода;
- патентная проработка;

– выбор устройства для производства тепловой и электроэнергии посредством сжигания водородного топлива.

1 Методы генерации водорода

На сегодняшний день известны следующие методы генерации водорода, используемые в промышленности [3–5]: преобразование биологической массы; термохимическое разложение воды; плазмохимическое получение водорода из газообразного топлива; каталитические методы разложения углеводородных топлив и метана (метод паровой конверсии, пиролиз, парокислородная конверсия); электролиз воды; газификация угля.

Научное сообщество видит серьезный потенциал к совершенствованию в следующих методах производства: прямое термическое разложение воды (термолиз), метод термохимических циклов расщепления воды, биоконверсия масс и электролиз воды.

На рисунке 1 приведена структура производства водорода различными методами при мировом потреблении водорода на уровне 2019 г. ~100 млн. т [5].

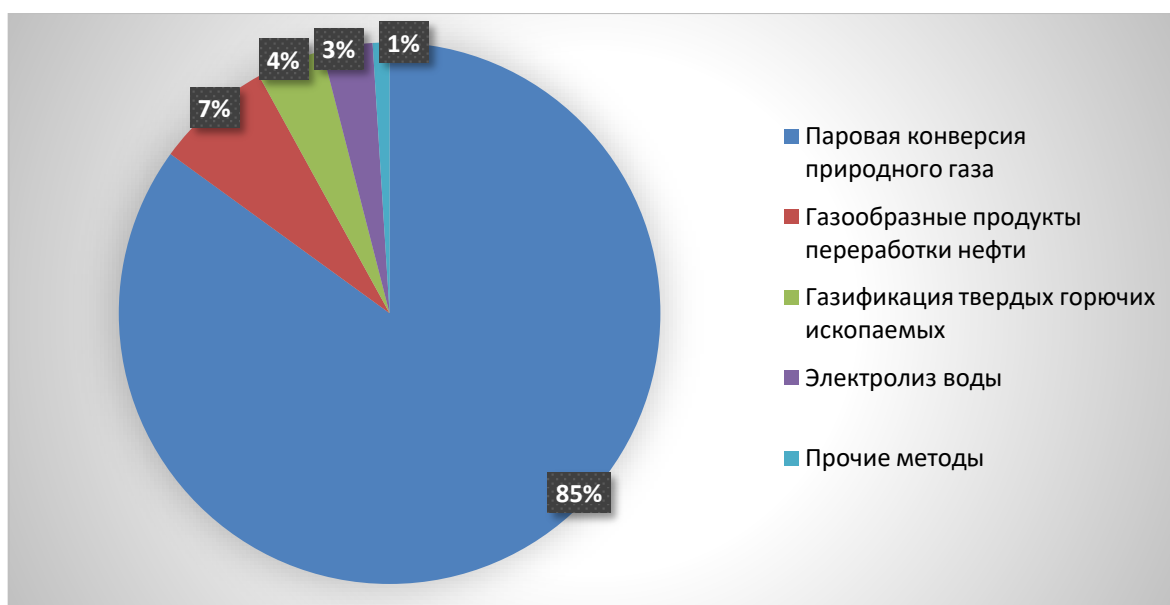


Рисунок 1 – Структура мирового производства водорода

Ниже изложено детальное описание каждого из упомянутых методов.

1.1 Метод преобразования биологической массы

Водород из биомассы можно получить биохимическим или термохимическим способом [6, 7].

При термохимическом методе исходную биологическую массу в форме древесины подвергают нагреву до 800°C в отсутствие O₂. Указанная температура ниже температуры газификации продуктов угледобычи, что приводит к эмиссии водорода, монооксида углерода и метана.

Стоимость процесса на килограмм произведенной продукции составляет примерно 360 руб./кг. Согласно оптимистичному сценарию, в течение 5 лет прогнозируется снижение себестоимости до 130 руб./кг водорода [8].

Биохимический процесс известен тем, что водород вырабатывают с помощью различных бактерий, например, *Enterobacter cloacae*.

Также возможно применение присадок с целью ускорения производства водорода из крахмала и целлюлозы, содержащихся в биологической массе. Процесс протекает при температуре 30°C и атмосферном давлении. Себестоимость водорода, произведенного данным методом, составляет около 120 руб./кг.

1.2 Термохимический способ разложения воды

Одним из наиболее востребованных на рынке сегодня является прямой термолиз, который предполагает разложение воды на H₂ и O₂. Известны различные способы термохимической переработки биомассы в синтез-газ (различные по стехиометрическому составу комбинаторные смеси газов H₂ и CO), заключающиеся в подаче этого сырья в реактор, где сырье нагревается до высоких температур, при которых начинается процесс его термического разложения с образованием синтез-газа и сопутствующих продуктов. Как правило, данный процесс производят в

термохимических установках пиролизного или газогенераторного типа. Процесс переработки биомассы в таких реакторах проводят при сжигании некоторой биомассы при ограничении поступления кислорода. В этом случае синтез-газ является составной частью продуктов частичного сгорания биомассы. Весомым недостатком данной технологии при воздушном и паровоздушном дутье является плохое качество получаемого продукта и низкий выход синтез-газа из-за большого количества примесей азота, попадающего в продукт вместе с воздушным дутьем, а также присутствие значительных количеств смолы, органических кислот и углистого остатка веществ в продуктах неполного сгорания биомассы. Получаемые попутно продукты переработки биомассы в отличие от газа не могут служить самостоятельным сырьем для получения жидких топлив высокого качества, а также применяться в химической отрасли промышленности.

При парокислородном дутье эффект от получения высокой концентрации синтез-газа в процессе переработки биологической массы оказывается экономически невыгодным для большинства промышленных применений в связи со слишком большими энергетическими затратами на производство применяемого в технологии кислорода. Указанные выше недостатки получения из биомассы синтез-газа частично устранены при термохимической переработке биомассы путем пиролиза без доступа кислорода в типовых установках медленного и быстрого пиролиза, где биомассу порционно или непрерывно подают в камеру пиролиза, в которой при высоких температурах происходит разложение биомассы с образованием жидких, твердых и газообразных продуктов.

К недостаткам описанного процесса относятся: высокая энергоемкость процесса из-за высоких температур; необходимость в использовании тепловой энергии, полученной от атомного реактора или от сгорания природного топлива (угля, нефти, либо природного газа); недостаточно высокая производительность процесса и эффективность в связи с плохим перемешиванием твердых частиц на стадии регенерации в нисходящем потоке под действием собственного веса;

трудность создания экологически чистого процесса; сложность технологической установки и, как следствие, ее высокая стоимость.

1.3 Плазмохимические методы генерации водорода из газообразного топлива

Плазмохимический метод предполагает использование плазмы или ионизированного газа. Пары разных по составу веществ подводят в плазмотроны, где под действием электромагнитного поля высокой интенсивности генерируют электроразряды, образуя плазму. Электронам передается энергия электрического поля, а они, в свою очередь, передают ее нейтронам, которые переходят в химически активное, возбужденное состояние.

Плазмохимические неравновесные системы, где электроны, греются электромагнитным полем до 15000 °С, являются особо перспективными. Они избирательно передают энергию молекулам, которые образуют нужные химические соединения в процессе распада. Несмотря на сложные преобразования и критически высокие температуры, газ остается холодным, его температура едва достигает 300°С. Стоит отметить, что интересное преимущество описываемых систем — объемный характер протекающих в них процессов. Высокие скорости химических превращений в газовой фазе позволяют добиваться крайне высокой производительности на единицу мощности используемых плазмотронов.

Исследования показали, что на момент написания настоящей работы метод прямого плазмохимического разложения паров воды является крайне малоэффективным. Идеальным объектом плазмохимических преобразований является CO_2 . При его разложении на кислород и оксид углерода коэффициент полезного действия превышает 80%. Почти вся энергия, вкладываемая в разряд, направляется на осуществление полезной работы. В свете этого является возможной организация цикла производства водорода двух стадий: на первой необходимо осуществить плазмохимическое разложение CO_2 ; на второй — выполнить широко

известную реакцию взаимодействия диоксида углерода с водяным паром. В результате образуется водород и исходное вещество — углекислый газ. Углекислый газ выступает в роли физического катализатора для получения H_2 из воды и решает проблему, возникшую при разложении водяного пара. Как итог – формирование окончательного процесса, в котором тратится только вода, а углекислый газ циркулирует в замкнутом цикле. В случае реализации в виде установки, производительность описанной системы в десятки тысяч раз превзойдет производительность электролизеров воды, однако себестоимость получаемого газа будет такой же, относительно электролиза.

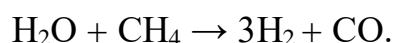
Многие проблемы, связанные с использованием газообразного топлива, обусловлены выбросами сероводорода или продуктов его переработки в атмосферу. В лучшем случае сероводород окисляют кислородом воздуха по методу Клауса и получают при этом серу, а водород в результате связывается с кислородом. Но не все производства добросовестно относятся к проблемам, связанным с экологией.

Как результат – основной недостаток этого процесса заключается в необходимости извлечения серы из газа.

1.4 Метод паровой конверсии метана

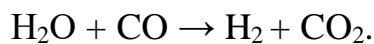
Конверсией газов называется их рециклинг с целью изменения состава газовой смеси. Конвертируют, как правило, метан и его гомологи с целью получения водорода или его смеси. Такие смеси используются для синтеза органических продуктов, а также в качестве газов-восстановителей в металлургической промышленности. Нередко конверсия метана производится для получения водорода.

Паровую конверсию метана проводят в печах при температуре от до 900°C по следующей схеме:



Однако в представленной реакции окисление метана происходит не полностью. В качестве побочного продукта образуется монооксид углерода,

который впоследствии может быть конвертирован в H_2 и двуокись углерода посредством пара H_2O :



Представленная цепочка реакций дает дополнительный выход технического водорода, тем самым увеличивая количество конечного продукта. Остается всего лишь очистить газ от примесей – CO_2 , оксида углерода и непрореагировавшего метана. В представленном процессе нужно следить за тем, чтобы не происходило закоксовывание катализатора из никеля. Соотношение водяного пара и углерода следует поддерживать в пропорции два к одному, но во избежание образования свободного углерода необходимо увеличить это соотношение до 2,2 к одному. Основными преимуществами метода паровой конверсии метана для производства водорода являются надежность, безопасность и простота в эксплуатации. В связи с этим, данный метод получил наибольшее распространение в промышленности, как в России, так и за ее пределами [9]. Так, например, производство технического водорода данным методом освоено на заводе ОАО «Танеко» в городе Нижнекамск. Здесь получаемый водородсодержащий газ (ВСГ) в дальнейшем отправляется на установку гидрокрекинга. Пройдя реактор гидрокрекинга, газовая смесь отправляется в сепаратор, где отделяется от не прореагировавшего ВСГ. После этого часть отправляется на факел. ВСГ на 97,14 % состоит из водорода, а остальная часть – примеси метана, диоксид и монооксид углерода. Однако, если эту часть ВСГ отправить в узел короткоциклового адсорбции для дальнейшей очистки водорода, то это позволит увеличить выход водорода в 1,5 раза и уменьшить потребления природного газа. Для реализации необходимо увеличить число устройств-адсорберов, чтобы получаемый водород соответствовал требованиям чистоты. Финансовые затраты на закупку, монтаж и эксплуатацию данного оборудования окупятся в течение двух лет эксплуатации.

1.5 Получение водорода методом электролиза воды

Впервые процесс электролиза был предложен Майклом Фарадеем в 1820 году. С тех пор технология неоднократно претерпевала изменения. По сей день электролиз остается единственным методом, способным обеспечить крупномасштабное производство водорода из воды с КПД более 90 % [10]. Электролиз воды – это цепочка физико-химических процессов, в результате которых в установке-электролизере электрический ток инициирует расщепление молекулы H_2O на две молекулы водорода и молекулу кислорода. Электроток пропускается между двумя электродами, разделенными проводящим электролитом, или так называемой «средой переноса ионов». Водород концентрируется на отрицательном катоде, а кислород на положительном аноде. Принимая во внимание тот факт, что химическая формула воды содержит два атома водорода и один атом кислорода (H_2O), в процессе электролиза водорода генерируется по объему в два раза больше, чем кислорода. Водород в газообразном состоянии, полученный в результате осуществления данной цепочки превращений, может сразу же использоваться или аккумулироваться в системах хранения [11, 12].

В сравнении с прочими методами генерации водорода, описанный способ имеет ряд существенных преимуществ, притом не только с точки зрения совершенства технологии или перспектив совершенствования процесса, но и с экологической точки зрения. Можно отметить следующие достоинства: чистота получаемого водорода достигает 99,97% и выше; технологический процесс прост относительно конкурентных решений, процесс непрерывен, возможна его полная автоматизация и отсутствие сложных механических частей; возможно получение ценных побочных продуктов (кислорода и тяжелой воды); вода, являющаяся исходным сырьем – доступный и практически неисчерпаемый исходный материал; процесс гибок относительно аналогов; разделение кислорода и водорода физически происходит уже на самом этапе электролиза; метод делает производство водорода фактически безвредным для окружающей среды за счет отсутствия эмиссии

парниковых газов. Эффективность описанного процесса производства коммерческого водорода щелочного и с протонообменной мембраной составляет 62% и 75% соответственно [13]. Для того, чтобы интенсифицировать процесс, сегодня активно проводятся исследования на предмет возможности сохранения позиции применения технологии электролиза при производстве водородного топлива, приоритет – снижение энергоемкости процесса, поскольку последняя является решающим фактором в формировании себестоимости водорода, произведенного методом электролиза. Многообещающим направлением в этой области является использование для процесса электролиза возобновляемых источников энергии: ветроэнергоустановок, солнечных преобразователей, гидроэнергосистем, гидротермальных подземных источников, приливных энергоустановок [14–18].

Анализируя изученные современные данные можно сделать вывод о том, рассматриваемая технология занимает твердую позицию в общем списке перспективных и реализуемых способов производства водорода, в том числе и в промышленных масштабах [19]. Например, 2015 году в энергетическом парке Майнца (Германия) состоялся официальный запуск самого крупного в мире завода по генерации водорода путем электролиза. Разработка технологии и проектирование предприятия осуществлялись при участии компании «Сименс».

На сегодняшний день электролитическое разложение воды справедливо заняло свою нишу в области промышленного производства водорода.

1.6 Получение водорода посредством газификации твердых ископаемых

На сегодняшний день в Российской Федерации водород методом газификации твердого топлива получают лишь в черте Ленобласти, где установлены газогенераторные установки на горючих сланцах.

В Институте проблем химической физики Российской академии наук, расположенной в городе Черноголовке проводят исследования, нацеленные на

освоение газификации угля в сверхadiaбатическом режиме. Данный метод имеет высокий КПД около 98% и позволяет переводить энергию угля в тепловую энергию водорода.

Представленный процесс широко известен в коксохимической промышленности, где H_2 представлен лишь попутным продуктом производства.

Эксперты утверждают, что упомянутый метод фактически уступает существующим альтернативам по себестоимости уже сегодня. Кроме того, данная тенденция будет сохраняться и дальше. Прогнозируется повышение себестоимости более, чем на 20 пунктов. Исходя из результатов экономических показателей эксплуатации крупного промышленного предприятия Great Plains (США) по получению искусственного природного газа из угля, прогноз может оказаться даже более пессимистичным. Не стоит забывать, что в соответствии с Парижским соглашением, согласно которому предприятия в странах, его подписавших, обязаны сокращать эмиссию парниковых газов в атмосферу, либо совершать систематические штрафные выплаты за выбросы. Разумеется, при использовании угля удельные выбросы CO_2 на единицу получаемого водорода будут в разы выше, чем при производстве водорода из природного газа. Из вышесказанного следует однозначный вывод, что газификация твердых горючих ископаемых на 2020 год является неконкурентоспособным методом с учетом всех обстоятельств.

2 Патентная проработка

2.1 Выбор и обоснование предмета поиска

Одной из главных целей настоящей работы является поиск разработок, внедрение которых позволит составить конкуренцию существующим техническим решениям в области производства водорода и его сжигания с целью получения тепловой и электрической энергии.

2.2 Регламент патентного поиска

Патентный поиск проводился с использованием ресурса Яндекс.Патенты [20] по источникам патентной документации Российской Федерации. Глубина поиска – пять лет (2015–2020 г.г.). Приоритетными решениями являлись наиболее свежие из найденных патентов. Поиск производился по индексу международной патентной классификации (МПК) C25B 1/12 – «Электролизер водорода», а также по индексу F22B 37/00 – «Водородно-кислородный парогенератор». При этом использовались следующие источники патентной информации: документы справочно-поискового аппарата, полные описания к патентам России, официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам.

2.3 Результаты патентного поиска

2.3.1 Электролизер высокого давления

Для наглядности результаты исследования источников патентной информации представлены в таблице 1. Анализ патентов с №174582 по №179209 показал, что перспективными и конкурентоспособными, относительно существующих прототипов, являются два электролизера высокого давления отечественного

производства. В пункте 2.4.1 будет представлен технический результат, достигаемый внедрением полезных моделей, а также преимущества и недостатки упомянутых устройств.

Таблица 1 – Результаты патентного поиска полезных моделей электролизеров

Страна	Индекс МПК	Номера просмотренных патентов	Выявленные аналоги
Россия	С25В 1/12	№ 174582 – 179209	№174582 «ЭЛЕКТРОЛИЗЕР ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ»
			№179209 «ЭЛЕКТРОЛИЗЕР ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ»

2.3.2 Водородный парогенератор

Для наглядности результаты исследования источников патентной информации были представлены в таблице 2. По аналогии с предыдущим пунктом, далее будут предоставлены данные для сравнения полезных моделей.

Таблица 2 – Результаты патентного поиска полезных моделей парогенераторов

Страна	Индекс МПК	Номера просмотренных патентов	Выявленные аналоги
Россия	F22В 37/00	№ 2309325 – 2705925	№ 2309325 «ПАРОГЕНЕРАТОР»
			№ 2623017 «ПАРОГЕНЕРАТОР»
			№ 2705925 «ПАРОГЕНЕРАТОР»

2.4 Анализ результатов поиска перспективных установок

2.4.1 Сравнительная характеристика прототипов электролизеров

Техническим результатом электролизера высокого давления по патенту № 174582 является улучшение эксплуатационных характеристик, заключающееся в увеличении ресурса непрерывной работы, высокой ремонтоспособности и простоты эксплуатации. Полезная модель состоит из корпуса со съемным фланцем с прикрепленными к нему анодом, катодом, мембраной, электродными рамками, патрубками подвода и отвода реагентов, герметичным токоподводом и штуцером для создания давления внутри корпуса. Установка отличается от аналогов тем, что корпус электролизера снабжен съемной крышкой с патрубками подвода и отвода реагентов и токоотводами, к крышке прикреплены с помощью выступов электролизные ячейки, выполненные независимыми друг от друга с отдельными патрубками подвода и отвода реагентов и токоподводами. Заявлено, что в предлагаемом техническом решении электролизные ячейки работают независимо друг от друга, за счет чего достигается заявленный технический результат по улучшению эксплуатационных характеристик электролизера высокого давления, заключающемуся в увеличении ресурса непрерывной работы, высокой ремонтоспособности и простоты эксплуатации.

Электролизер высокого давления по патенту № 179209 состоит, аналогично предыдущему, из жесткого корпуса со съемным фланцем со штуцером для создания критического давления внутри корпуса и съемной крышкой, с электролизными ячейками дискообразной формы с анодом, катодом, мембраной, электродными рамками, патрубками подвода и отвода реагентов и герметичными токоподводами, с опорами для электролизных ячеек. Техническим результатом заявленной полезной модели является улучшение эксплуатационных характеристик электролизера высокого давления, заключающееся в увеличении допустимого рабочего давления и снижения стоимости продуктов электролиза. В предлагаемом электролизере

реализована более высокая прочность корпуса и снижение балластного объема ячеек, что позволяет повысить эксплуатационные характеристики.

2.4.2 Сравнительная характеристика прототипов парогенераторов

Парогенератор по патенту № 2309325 содержит запальное устройство с электросвечой и магистралями подвода горючего и окислителя, смесительную головку с огневым днищем, коллекторами окислителя и горючего и соответствующими магистралями, камеры сгорания и смешения, промежуточное сопло с профилированными стенками, вкладыш подачи балластировочного компонента с магистралью подвода балластировочного компонента. Смесительная головка содержит триплетные смесительные элементы с обеспечением соударения струй. Техническим результатом является обеспечение улучшения характеристик смесеобразования между балластировочным компонентом и факелом продуктов сгорания, а также снижение массы и габаритов агрегата.

Парогенератор по патенту № 2623017 содержит запальное устройство с электросвечой, смесительную головку с магистралями подвода окислителя и горючего, камеру смешения с отверстиями, при этом камера сгорания с каналами тракта охлаждения выполнена выпуклой формы с центром вращения образующей вокруг оси камеры сгорания и состоит из двух частей, жестко и герметично соединенных между собой, с уступом, выполненным на внутренней стенке первой части, в котором имеются отверстия под углом к продольной оси камеры сгорания, соединенные с трактом охлаждения. Техническим результатом является повышение эффективности процесса горения в районе головки у внутренней стенки камеры сгорания и увеличение ресурса работы парогенератора.

Парогенератор по патенту № 2705925 содержит корпус с камерой сгорания, смесительную головку с полостями подвода компонентов топлива, пояса подачи компонентов топлива, соединенные с соответствующими полостями компонентов топлива при помощи каналов, при этом пояса подачи компонентов топлива

выполнены в виде нескольких коаксиально установленных обечаек, расположенных по отношению друг к другу с кольцевыми зазорами и образующих замкнутые кольцевые полости, открывающиеся в камеру сгорания, причем кольцевые полости компонентов топлива равномерно чередуются между собой, при этом в центральной части головки, между поясами подачи компонентов, установлен пояс подачи парообразующей жидкости, полость которого открывается в полость камеры сгорания, при этом на торцах обечаек со стороны входа установлены торцевые профилированные днища, скрепленные между собой и с корпусом и образующие последовательно расположенные торцевые кольцевые полости, причем в указанных днищах и полостях выполнены изолированные каналы, соединяющие упомянутые торцевые полости подачи компонентов топлива через одну между собой, при этом указанные кольцевые полости компонентов топлива соединены с соответствующими полостями подвода компонентов через упомянутые торцевые полости, образованные профилированными днищами. Техническим результатом является обеспечение возможности создания системы с надежным охлаждением и возможностью изменения расхода пара.

2.5 Выводы по главе

Патентные исследования показали, что на сегодняшний день существует достаточно широкий выбор релевантных технических решений, разнообразных по своему устройству и имеющих свои преимущества.

В данной работе является целесообразным взять наиболее свежую и совершенную доработку (относительно аналогов) для дальнейшего расчета энергоустановки. Таким образом, было принято решение остановиться на электролизере высокого давления по патенту № 179209, который был предложен Волощенко Г.Н. в мае 2018 года, а также парогенераторе по патенту № 2705925. Публикация этой полезной модели датируется ноябрем 2019 года. Обе установки удовлетворяют заданным параметрам поиска.

3 Оптимальные методы производства водорода и энергии на его основе

3.1 Методы производства водорода. Выбор и обоснование

Рассмотрим детально технический прогресс и перспективы в области описанных ранее способов генерации водорода. Приоритетными направлениями для исследований были выбраны метод паровой конверсии метана и метод электролиза воды. На основании ранее указанных преимуществ выбор пал именно на них.

В Российской Федерации активные исследования в области усовершенствования процесса электролиза воды проводит Российский научный центр «Курчатовский институт». На протяжении четверти века работы в данном направлении был создан ряд прототипов электролизеров. Одна из последних разработок в этой области посвящена электролизеру с улучшенными характеристиками, с рабочим давлением до 3 МПа вариативной производительности. Результат был достигнут благодаря тому, что корпус электролизной установки снабжена съемной крышкой с патрубками отвода/подвода реагентов и токоотводами, к крышке прикреплены электролизные ячейки, выполненные независимыми друг от друга с отдельными патрубками подвода, корпус содержит опоры для ячеек и как минимум один съемный фланец, электролизная ячейка представляет собой дискообразную форму, снабжена корпусом, который состоит из двух половинок с фланцами, между которыми зажата диафрагма, внутри каждой половины установлены электроды (дисковые), по внешнему краю оснащенные предохранительными изолирующими рамками, проходящим через гермоввод в корпусе ячейки, патрубки отвода реагентов установлены симметрично диафрагме, патрубки подвода электролита установлены в верхней части корпуса ячейки со смещением в разные стороны от середины и обеспечены трубками дугообразной формы для подвода электролита к нижнему сектору электрода, ячейка прикреплена к выступу крышки, а трубки подвода/отвода

реагентов и токоподводы ячейки прикреплены разъемными патрубками к патрубкам и токоподводам крышки корпуса электролизера, крышка корпуса электролизера загерметизирована с помощью уплотнения. Принципиальная схема описываемого устройства представлена на рисунке 2.

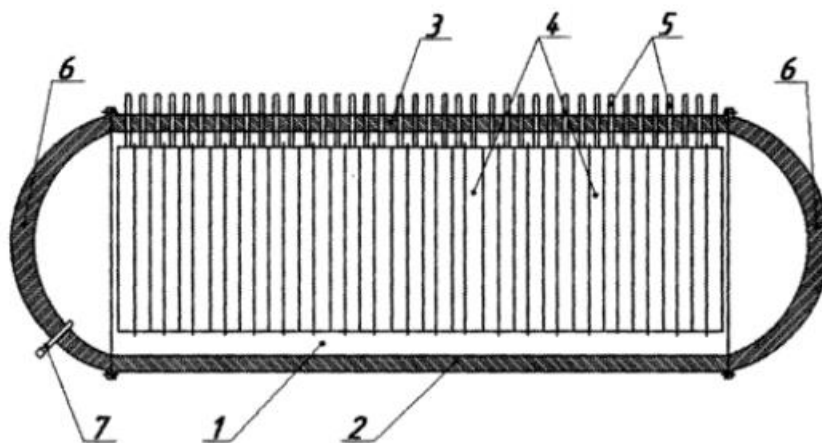


Рисунок 2 – Схема электролизера высокого давления

Установка включает в себя следующие элементы: 1 – электролизер; 2 – корпус; 3 – торцевая крышка; 4 – ячейки электролизера; 5 – токопроводящие отводы и отводы патрубков торцевой крышки; 6 – фланцевая часть корпуса; 7 - штуцер для подвода высокого давления.

Обращаясь к зарубежным публикациям за последние пару лет на тему, рассматриваемую в данной главе, можно отметить следующие достижения коллег:

Максимальный выход H_2 в количестве 5,3 л/ч в условиях пространства между электродами в 3 мм из пяти пар электродов, состоящих из никеля, в 25% -ном щелочном электролите и напряжении порядка 3В достигнут за счет использования внешнего магнитного поля исследователями из Тайваня [21]. В описанных условиях энергетическая эффективность достигает 92,14%, скорости производства водорода возрастает на 13,4%, энергоэффективность возрастает на 10,2% по сравнению с альтернативной технологией без использования описанной наработки.

Специалистам из института науки и технологий Сколково удалось создать прототип улучшенного катализатора электролиза воды посредством щелочи. Они

синтезировали ряд оксидов кобальта и лантана с перовскитом, сравнительно редким минералом (титанат кальция), свойства которых можно контролируемо изменять путем замещения части лантана стронцием [22].

Ученым из Федеративной Республики Германии удалось при тех же энергозатратах увеличить вдвое электрокаталитическую активность типового катализатора путем модификации катализатора из платины монослоем меди, нанесенным под поверхность, что привело к ослаблению поверхностного связывания промежуточных адсорбированных продуктов реакции и в результате к освобождению из H_2O двукратного объема водорода, в сравнении с обычным платиновым катализатором в кислых средах. Более того, данные катализаторы оказались ощутимо устойчивее к коррозии и с повышенным сроком эксплуатации [23].

Учеными из Ливерморской национальной лаборатории совместно с исследователями университета Сан-Диего и университета Райса были разработаны катализаторы повышенной эффективности на основе дихалькогенидов (соединения с серой, селеном и прочими) переходных металлов [24]. В результате проведенного исследования была достигнута еще большая производительность водорода, в связи с необычным свойством материалов принимать различные формы по мере выделения газообразного водорода.

Группе ученых из Южной Кореи и Соединенных Штатов под руководством Ненада Марковица удалось разработать стабильный катализатор разделения воды путем вытеснения осмия из сплава. Тесты показали, что его стабильность почти в тридцать раз превышает стабильность других иридиевых катализаторов [25]. Исследователи изготовили ряд осмиево-иридиевых сплавов с различной процентной концентрацией компонентов. Метод исследований заключался в последовательном выжигании осмия из сплава с помощью вращающегося электрода. По итогу возникала иридиевая пористая структура с массивной площадью активной поверхности и содержанием осмия около нуля. Оптимальным соединением из ранее синтезированных являлся $Ir_{25}Os_{75}$, стабильность которого оказалась выше в тридцать

раз. Проводимость и активность можно сопоставить с активностью «плоского» катализатора из иридиевых пластин.

Неожиданно высокую эффективность в области производства водорода с преобразователями солнечной энергии и результаты интеграции солнечной батареи с электролизером в модуле *HuCon* обнародовали авторы публикации [26]. Для производства водорода использовался метаморфический солнечный элемент *GaInP/GaInAs*. Тандем показал максимальную энергоэффективность при концентрации 34,2%. Решающим фактором производительности водорода данным методом является температура и активность солнца. Протонообменная мембрана соединена с титановым винтом с помощью сетки. Внешний контакт солнечного элемента подключен к катоду, а торцевой установлен непосредственно на аноде. Модуль *HuCon* первого поколения показал стабильную работу в результате тестов в реальных условиях. В настоящее время создается модуль второго поколения с улучшенной комбинацией линз солнечных элементов.

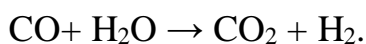
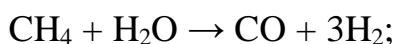
3.2 Аналитическое сравнение методов паровой конверсии метана и электролиза воды

В суточном интервале электрическая нагрузка крайне неравномерна. В этой связи для ухода от неравномерности генерации и электропотребления применяется система дифференциации тарифов на электроэнергию. Данный принцип предполагает преимущества для электропотребления вне пиков за счет более дешевого тарифа. С учетом вышесказанного, производство товарного водорода методом электролиза воды является перспективным решением, поскольку предполагает монтаж установок повышенной мощности и КПД [27–29]. Возможны два режима работы: в условиях, когда водородный энергетический комплекс является отдельной независимой станцией и потребляет электроэнергию из энергосистемы по средневзвешенному тарифу в условиях стационарного круглосуточного режима работы, и когда комплекс находится в составе

теплоэлектроцентрали, то есть потребление электроэнергии на нужды электролиза осуществляется по ее себестоимости во внепиковые часы электрической нагрузки с обеспечением ТЭЦ базисной электрической нагрузкой.

Как уже было сказано ранее, одним из широко известных методов получения водорода в больших объемах является метод паровой конверсии метана.

Указанный процесс протекает по реакциям [30]:



Он характерен низкой стоимостью получаемого водорода, но предполагает потребность в дополнительных затратах на его очистку от CO_2 . Адсорбенты, поглощающие водяные пары, применяют для выделения водорода, его осушки и очистки от углеводородов, окислов углерода и сернистых соединений [31–34]. На выходе из установки паровой конверсии состав газа при рабочей температуре 880°C и давлении от 2 до 2,5 МПа в процентном соотношении следующий: CO_2 – 0,1; CO – 0,1; H_2 – 97,1; CH_4 – 2,7. Общий энергетический КПД процесса составляет около 60%.

Ранее было отмечено, что получение водорода методом электролиза происходит с высокой степенью чистоты (в пределах от 99,9 до 99,7%) [35]. Также известно, что существующие электролизные установки имеют невысокую единичную мощность (до 3 МВт), поэтому их использование для производства в больших объемах будет нецелесообразным. Вероятным решением является необходимость создания электролизных установок повышенной единичной мощности [36].

Таблица 3 – Удельные капиталовложения в электролизные установки

№ п/п	Тип установки (производитель)	Мощность установки, кВт	Удельные капиталовложения, тыс. руб./кВт, (тыс. долл./кВт)
1	HOGEN (США)	2–3	1422 (23,7)

2	СЭУ–40 (РФ)	200–250	55.9
3	HGM–2000 (США)	300	73,8 (1,2)
4	ФВ–500 (РФ)	3000	13,7

Таблица 3 иллюстрирует капиталовложения в электролизные установки производства России и США при 1 долл. = 60 руб. (по состоянию на январь 2020 г.) [37].

На основе табличных данных было получено эмпирическое уравнение для оценки удельных капиталовложений в электролизные установки в зависимости от их мощности, тыс. руб./кВт:

$$k = 1117 \cdot N^{-0,5}, \quad (1)$$

где N – прогнозируемая мощность установки, МВт.

По этому уравнению рассчитаны удельные капиталовложения в электролизные установки при повышении их мощности от 3 до 50 МВт (рисунок 3), не исключается создание электролизных агрегатов блочного типа.

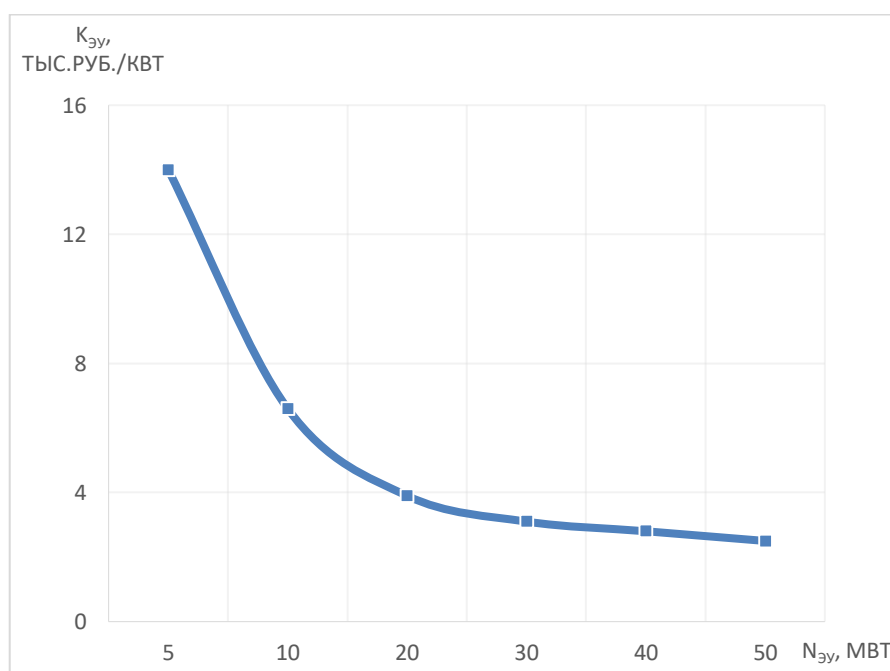


Рисунок 3 – Прогнозные удельные капиталовложения в электролизные установки

3.3 Расчет мощности электролизной установки Западно-Сибирской ТЭЦ

В настоящее время КПД существующих электролизных установок находится в пределах от 60% до 73% [38–40]. Этому соответствует расход в интервале от 55,5 до 45,5 кВт·ч энергии на производство 1 кг водорода.

Усредненные цены на электрическую энергию, вырабатываемую Западно-Сибирской ТЭЦ за 2019 год:

1,2 руб./кВт – себестоимость киловатта вырабатываемой энергии;

1,85 руб./кВт – стоимость энергии на нужды АО ЕВРАЗ ЗСМК.

Годовая производительность (т/год) с учетом простоя оборудования рассчитывается по следующей формуле:

$$G_H = V \cdot T\phi, \quad (2)$$

где V – объем производимой продукции, кг/ч;

$T\phi$ – фонд времени работы оборудования, год.

Объем производимой продукции может быть рассчитан следующим образом:

$$V = \frac{N \cdot \eta}{W}, \quad (3)$$

где N – мощность комбинированной установки, Вт;

η – КПД установки, %;

W – расход энергии на 1 кг продукции, Вт.

Расчёт фонда времени работы оборудования в год производится следующим образом:

$$T\phi = 365 \cdot 24 \cdot Kp, \quad (4)$$

где Kp – безразмерный коэффициент загрузки оборудования, равный 0,94 для механизмов непрерывного действия.

Если комплекс находится в составе ЗС ТЭЦ, при заявленной мощности 50 МВт, усредненном КПД = 66%, расход составит 50,5 кВт·ч энергии на 1 кг продукции. Отсюда выходит, что себестоимость 1 кг продукции при стоимости электроэнергии 1,2 руб./кВт·ч составляет 60,6 руб./кг.

Если же комплекс питается из энергосистемы в стационарном круглосуточном режиме, получает энергию по ценам комбината, то при заявленной мощности 50 МВт, усредненном КПД = 66% и неизменном расходе 50,5 кВт·ч энергии на 1 кг продукции, выходит, что себестоимость 1 кг продукции при стоимости электроэнергии 1,82 руб./кВт·ч составит 91,9 руб./кг.

Рассчитаем годовую производительность G_{H1} (в режиме потребления энергии от ЗС ТЭЦ в внепиковые часы электрической нагрузки) и G_{H2} (из энергосистемы в стационарном круглосуточном режиме):

$$G_{H1} = \frac{50 \cdot 0,66 \cdot 1,2}{50,5 \cdot 1,2} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 0,94 = \sim 5380 \text{ т/год};$$

$$G_{H2} = \frac{50 \cdot 0,66}{50,5} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 0,94 = \sim 5380 \text{ т/год}.$$

Себестоимость 1кг водорода, производимого методом паровой конверсии газа, напрямую зависит от цены на природный газ. По данным на 2018 год [41], стоимость 1000 м³ метана на внутреннем рынке РФ составила 12943,5 руб. Исходя из исследований Аминова Р.З. [42, 43], при аналогичной годовой производительности установки на уровне ~5380 т/год, себестоимость 1 кг производимого водорода находится на уровне 71,2 руб./кг.

Полученные данные представлены на рисунке 4 для наглядного сравнения методов генерации водорода по себестоимости производимого водорода при $G_H \approx 5380$ т/год.

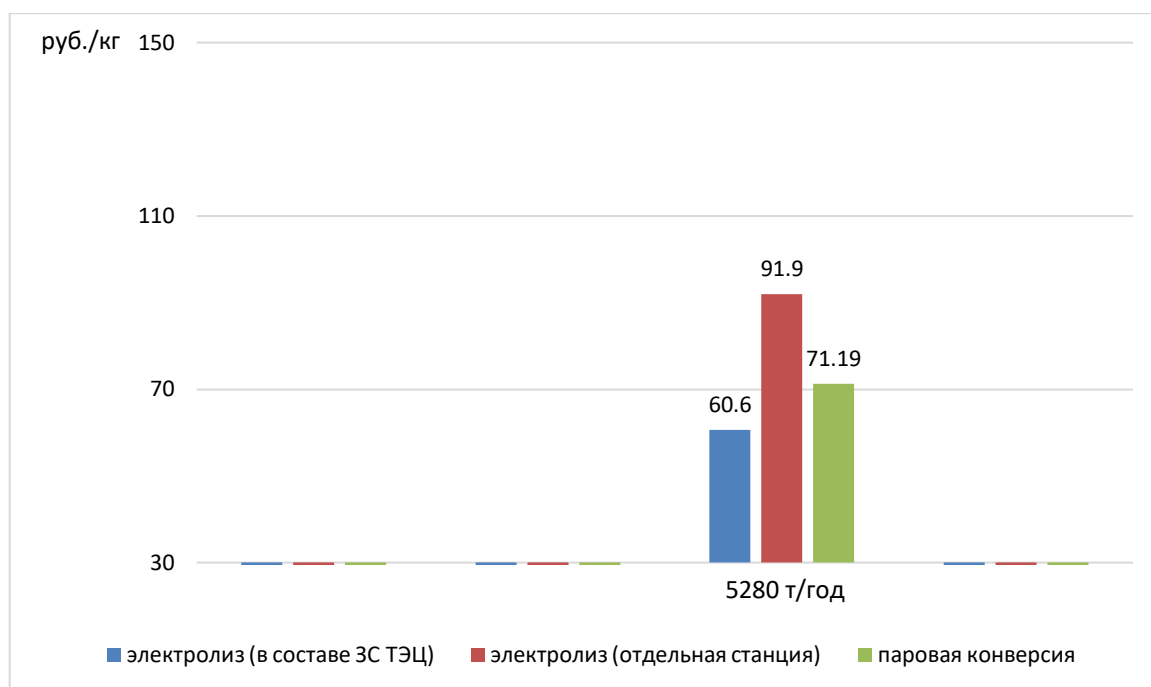


Рисунок 4 – Показатели себестоимости водорода в зависимости от методов его генерации

3.4 Метод производства тепловой и электрической энергии при использовании водородного топлива

Рассмотрим детально парогенератор, работающий на водородном топливе. Данная ПСУ относится к энергетическим установкам, производящим пар высоких параметров, получаемый за счет энергии, выделяемой при сгорании водорода или природного газа в кислороде. Основной объем компонентов топлива поступает в смесительную головку (рисунок 5) по магистралям окислителя и горючего, и затем из форсунок в камеру сгорания, где происходит их воспламенение от запального факела. Одновременно с подачей основного расхода компонентов топлива, начинает поступать вода по магистрали в каналы тракта охлаждения первой части камеры сгорания. При этом компоненты топлива, вытекая из форсунок, образуют линии тока продуктов сгорания, которые плавно касаются внутренней стенки первой части камеры сгорания в районе смесительной головки. В наиболее напряженной, в тепловом отношении, зоне вода поступает из отверстий колец завесы, соединенных

с трактом охлаждения первой части камеры сгорания, и надежно прижимается продуктами сгорания к внутренней стенке второй части камеры сгорания, осуществляя ее защиту.

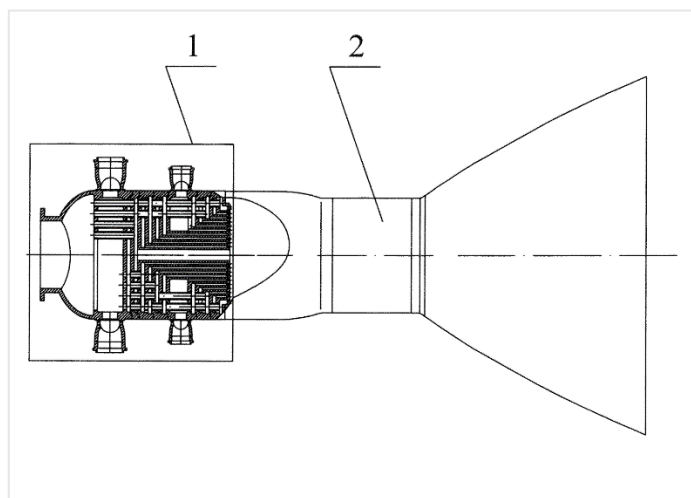


Рисунок 5 – Смесительная головка парогенератора

Компоненты топлива подаются в соответствующие полости смесительной головки, и далее, через кольцевые зазоры в камеру сгорания. В ней компоненты топлива воспламеняются и образуют высокотемпературную газовую смесь. Через пояс подачи парообразующей жидкости в высокотемпературную газовую смесь подается парообразующая жидкость. Под действием высоких температур газовой смеси, парообразующая жидкость испаряется. Образовавшаяся парогазовая смесь поступает к выходу из корпуса и направляется дальше для дальнейшего использования. За счет того, что парообразующая жидкость подается в смесительную головку, ее расход не влияет на охлаждение камеры сгорания, что позволяет изменять расход парообразующей жидкости в широких пределах. На рисунке 6 представлена схема описываемого парогенератора, где: 1 – корпус парогенератора; 2 – камера сгорания; 3 – смесительная головка с полостями подвода компонентов; 4, 5 – пояса подачи компонентов топлива; 6 – обечайки; 7 – кольцевые зазоры; 8 – пояс подачи парообразующей жидкости; 9 – торцевые профилированные днища; 10, 11 – изолированные каналы подачи теплоносителя. Его конструктивные

особенности обеспечивают надежное охлаждение и возможность изменения расхода пара.

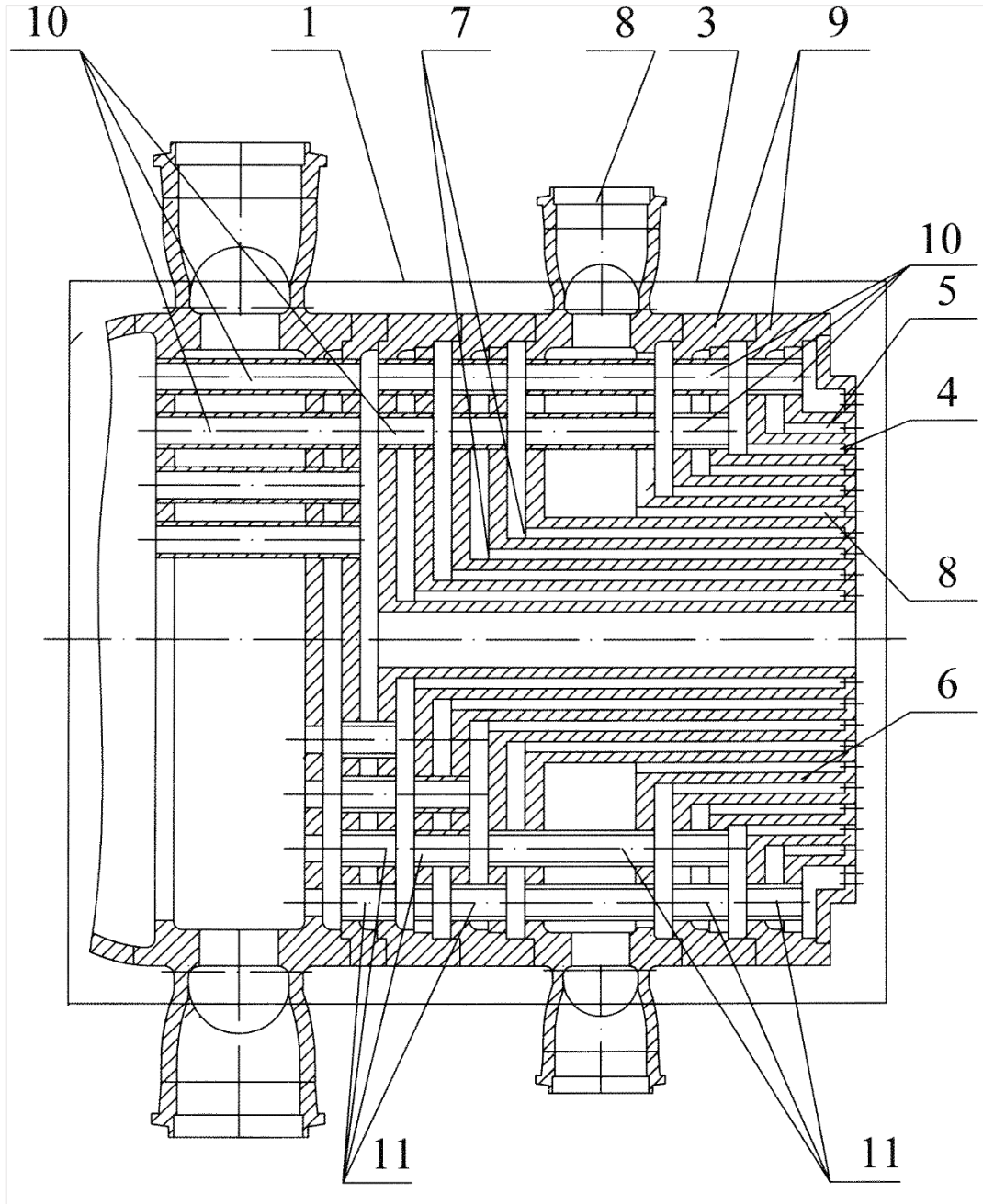


Рисунок 6 – Принципиальная схема парогенератора

3.5 Выводы по главе

Как показали проведенные оценки при использовании электроэнергии от ТЭЦ по ее себестоимости во внепиковые часы электрической нагрузки себестоимость производимого водорода оказывается заметно ниже по сравнению с себестоимостью при потреблении электроэнергии из энергосистемы по внутренним ценам АО ЕВРАЗ ЗСМК.

Расчетным методом, а также на основе данных из открытых источников были проведены исследования конкурентной эффективности получения водорода методом электролиза воды на основе перспективных технологий. Себестоимость водорода, полученного путём электролиза, была сопоставлена с себестоимостью водорода, полученного методом паровой конверсии природного газа. Для наглядности представлена графическая интерпретация показателей.

Разработка эффективных электролизных технологий получения водорода на базе внепиковой электроэнергии ТЭЦ является актуальной, поскольку данное направление показало себя весьма конкурентоспособным и более эффективным по сравнению со стационарным режимом электролиза воды и с широко распространенным в промышленности методом паровой конверсии природного газа.

Поскольку работа носит исследовательский характер, комплексную экономическую эффективность выявить не представляется возможным. По результатам анализа перспективных технических решений были предложены новые технологии, позволяющие производить водород, а затем применить его в качестве топлива для генерации тепла и электрической энергии.

4 Зарубежный опыт генерации тепловой и электрической энергии при использовании водорода

Мировому сообществу уже известны успешные кейсы по запуску и эксплуатации электростанций, работающих исключительно на водородном топливе, а также в комбинированном режиме. Зарубежные корпорации с мировым именем спонсируют поистине колоссальные проекты. Например, компания Enel в 2006 году выделила финансирование в размере 7,4 млрд. евро на проведение исследований в сфере водородной энергетики, а также на реализацию разработанных проектов. В результате, в рамках проекта Hydrogen Park была построена электростанция, работающая на водороде.

Далее речь пойдет о наиболее значимых проектах, которые в настоящее время находятся в эксплуатации.

4.1 Водородная станция Энель Фузина

Fusina hydrogen power station – это электростанция, расположенная в Порто-Маргера, промышленном пригороде Венеции, в Итальянском регионе Венето (рисунок 7). В апреле 2008 года была открыта строительная площадка, после чего в установленные сроки были проведены инфраструктурные и технологические работы. Первоначальные испытания турбины с использованием метанового газа были проведены весной 2009 года, и после завершения строительства специального трубопровода от соседнего предприятия по переработке нефти, в августе того же года станция перешла на потребление водорода.



Рисунок 7 – Панорамный вид на электростанцию

Подача топлива для станции осуществляется нефтехимическим предприятием Eni's Polimeri Europa Cracker, которое использует водород в своем технологическом процессе. Он также использует сырье, получаемое, в свою очередь, в качестве побочного продукта на соседнем нефтеперерабатывающем заводе Eni's в Porto Marghera.

В результате имеется практический опыт эксплуатации электростанции мощностью 12 МВт на чистом водороде, работающей совместно с пылеугольной ТЭС мощностью 320 МВт, которая по сей день не имеет аналогов в мире. Расход топлива составляет 1,3 тонны водорода в час, имеет общий КПД около 42%. Принципиальная тепловая схема исследуемой ПГУ представлена на рисунке 8. Генерируемая станцией электроэнергия позволяет на протяжении более десяти лет удовлетворять нужды свыше 40 тысяч индивидуальных пользователей, а эмиссия углекислого газа за этот период была сокращена на 187 тысяч тонн (в пересчете на твердое топливо) [44].

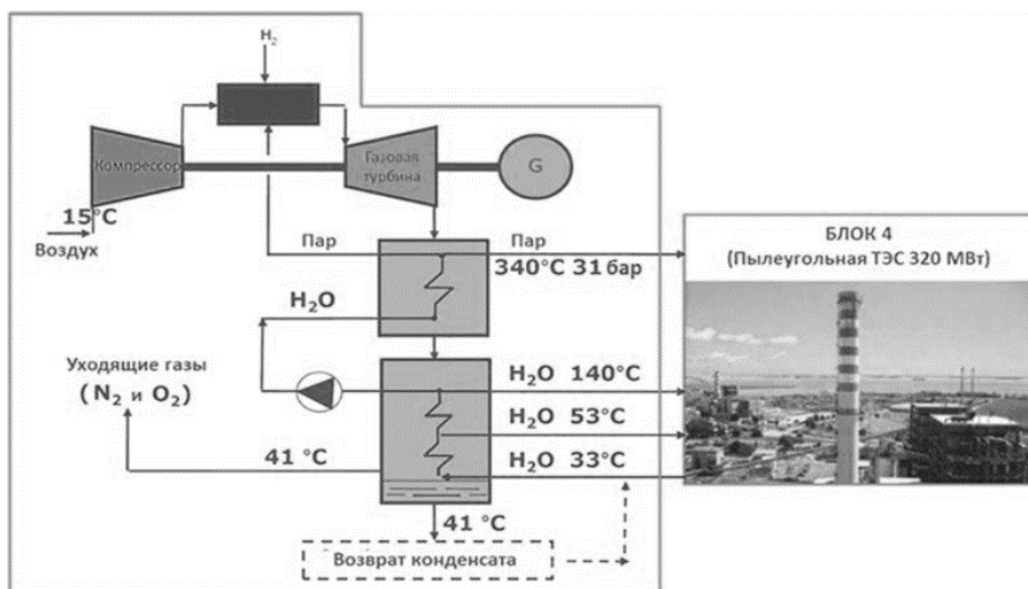


Рисунок 8 – Принципиальная тепловая схема ПГУ на ТЭС

В производственной схеме используется котел-утилизатор конденсационного типа. Представленная компоновка позволяет получать низкую температуру дымовых газов на выходе, что способствует сокращению потерь тепла с уходящими газами, а также конденсировать из них воду, которая повторно возвращается в цикл. Однако, несмотря на положительный эффект с экологической точки зрения, по данным компании-собственника, стоимость такой электроэнергии пятикратно превышает стоимость производства энергии, произведенной путем сжигания органического топлива. При этом сохраняется здоровый оптимизм, а действия компании направлены на совершенствование процессов в освоенном пердеде энергетики и сокращение стоимости электроэнергии. По их мнению, для создания технологии производства водорода с конкурентоспособной ценой потребуются десятилетия [45]. Тем не менее, полученный опыт нельзя назвать отрицательным, поскольку созданные прецеденты всегда становятся подспорьем для следующих энтузиастов.

На текущий момент разработки, аналогичные вышеописанным, проводятся и в России. Не так давно кафедрой Энергетики высокотемпературной технологии НИУ «МЭИ» были предложены способы генерации H₂, которые базируются на

промышленных предприятиях черной металлургии [46, 47]. По мнению самих ученых, предложенный метод не только сопровождается значительными энергосберегающими эффектами в комплексе черной металлургии, но и не требует дополнительного расхода топлива.

4.2 Водородный путь Кавасаки

Кавасаки Хэви Индастриз позиционирует себя как компания, одной из первостепенных задач которой является внедрение в различные сферы человеческой деятельности потребление водородного топлива, полученного на основе безопасных технологий генерации, хранения, транспортировки и применения. В подтверждение этому был запущен глобальный проект, именуемый «Kawasaki Hydrogen road».

В декабре 2019 года на Портовом острове Кобе в Японии была запущена в эксплуатацию в штатном режиме демонстрационная установка водородной когенерационной системы Kawasaki Heavy Industries в рамках своей водородной программы. Установка, представленная на рисунке 9, является водородную газотурбинную электростанцию мощностью 4 МВт.



Рисунок 9 – Тестовая установка водородной КГС Kawasaki

Пробная эксплуатация была проведена в январе 2018, а тепло- и электроснабжение с использованием природного газа в феврале 2018. Базовым испытанием для проверки была подача тепла и электрической энергии на 4 муниципальных объекта: Главный госпиталь Медицинского центра города Кобе, спортивный центр, Международный выставочный зал Кобе и центральное очистное сооружение города.

Представленный на рисунке 10 контрольный экран установки иллюстрирует, что технология сжигания позволяет использовать в качестве топлива исключительно водород (однотопливное сжигание), либо смесь водорода и природного газа в произвольных пропорциях (многотопливное сжигание).

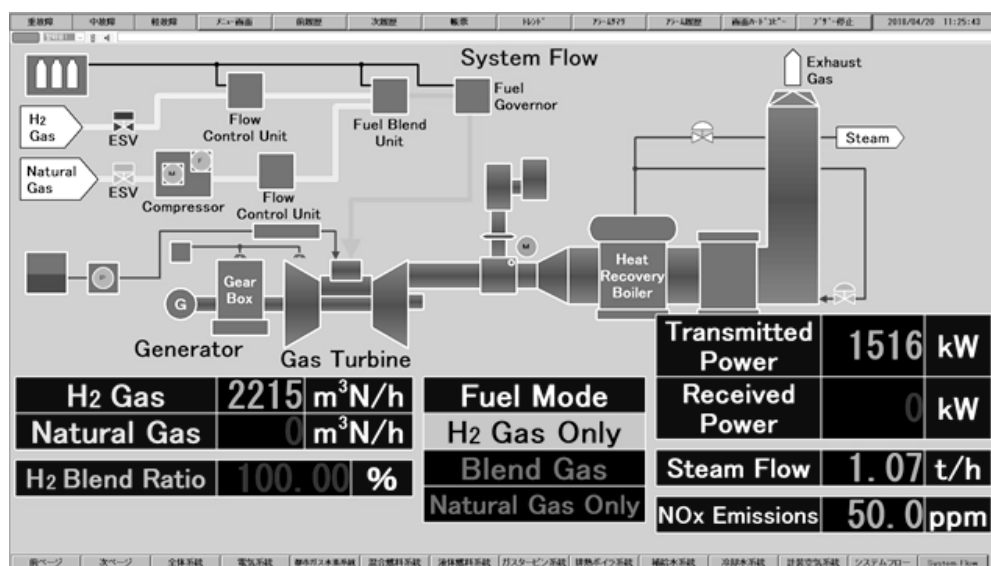


Рисунок 10 – Контрольный экран станции при режиме потребления H₂ = 100%

Тесты показали, что предельная установленная мощность ТЭС составила 4 МВт, из которых 1,2 МВт в виде электроэнергии, а 2,8 МВт – в виде горячего водоснабжения. В данный момент проект завершен, в конце мая 2020 года водородная ТЭС начала снабжать энергией и ГВС весь остров Кобе.

Однако путь Кавасаки примечателен не только этим. В 2013 году на международном экономическом форуме в Санкт-Петербурге компанией было подписано предварительное соглашение с ОАО «РусГидро» о строительстве в

Магаданской области промышленного крупнотоннажного комплекса по производству сжиженного водорода [48–50]. Предполагается, что мощность пилотного комплекса составит 11,3 тонн водорода в сутки. Промышленный же комплекс мощностью 200 тонн водорода в сутки и энергопотреблением до 510 МВт должен быть введен в эксплуатацию в 2026 году.

5 Безопасность жизнедеятельности при эксплуатации объектов теплоэнергетики

При хранении водорода и его использовании в технологических процессах утечка и перемешивание с окружающей средой приводят к опасности возникновения горения и взрыва в загромождённых объёмах и замкнутых пространствах. В свою очередь, масштаб ущерба и характер разрушений в зависимости от конкретных условий при одинаковом объеме сдетонировавшего водорода может меняться в десятки раз. Чтобы произвести корректную оценку степени опасности тех или иных технологических процессов в энергосистемах, использующих или допускающих образование водородосодержащих воздушных смесей, необходимы комплексные исследования в каждом конкретном случае. Однако общие сведения, касающиеся особенностей эксплуатации водорода и обеспечения промышленной безопасности в целом, будут представлены ниже.

5.1 Социальные и правовые нормы трудового законодательства

Основным принципом деятельности любого предприятия в области охраны труда и промышленной безопасности является признание приоритета жизни и здоровья работников.

В связи с этим, к работам по эксплуатации оборудования могут быть допущены лица не моложе 18 лет, имеющие соответствующее профессионально-техническое образование, прошедшие производственное обучение и медицинское освидетельствование, а также инструктажи и аттестацию знаний правил охраны труда и промышленной безопасности.

Обучение, а также проверка знаний работников предприятий в сфере охраны труда и промышленной безопасности, эксплуатирующих установки по производству и переработке водорода, должны проводиться в соответствии с ГОСТ 12.0.004.2015 [51]. Подготовка и проверка знаний (или аттестация) работников по вопросам

промышленной безопасности должны проводиться в соответствии с документом «Положение о порядке подготовки и аттестации работников организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты, подконтрольные Госгортехнадзору России».

Персонал подразделений, осуществляющих контроль за работой фонда скважин, должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты, спецодеждой, спецпитанием и другими предусмотренными средствами согласно установленным в организации перечнем и нормам.

В соответствии с федеральным законом от 28.12.13 № 426 – ФЗ «О специальной оценке условий труда», ст. 147 ТК РФ и ст. 117 ТК РФ, работодатель обязан начислить оперативному персоналу станции надбавку к заработной плате в размере не менее 4% от оклада, а также дополнительный оплачиваемый отпуск в размере 7 календарных дней.

Для наиболее безопасного и эффективного ведения работ рабочее место должно быть организовано с наиболее удобным и быстрым доступом к оборудованию. Также необходимо обеспечить рациональное размещение зданий и сооружений станций, учитывая стороны света, рельеф местности и розу ветров. Это напрямую связано с потребностью в обеспечении благоприятных условий для естественного освещения, проветривании помещений, минимизации последствий снежных заносов, а также во избежание скопления газа в низинах при возникновении аварийной ситуации, связанной с утечкой.

5.2 Промышленная санитария

Согласно санитарным правилам и нормам, при организации производственной деятельности необходимо обеспечить соответствие микроклимата рабочего пространства по ряду показателей, а именно: температура воздуха; относительная влажность воздуха; скорость движения воздуха; степень освещенности; интенсивность теплового излучения. Допустимые значения по каждому показателю

можно найти в документе СанПиН «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [52].

Если удовлетворить требованиям СанПиН не представляется возможным (как, например, при эксплуатации котлоагрегатов), производство считается вредным и ему причисляется класс опасности.

5.3 Пожарная безопасность

Водородное топливо, а также оборудование в котлотурбинном цехе при взрыве или воспламенении может нести высокую опасность здоровью и жизни работника. В этой связи необходима разработка мероприятий по предупреждению и ликвидации аварий, которые должны включать в себя типовой набор инструментов. К ним относятся:

- выбор ответственных, за пожарную безопасность в организации;
- разработка противопожарного режима; организация хранения взрывчатых и горючих веществ в соответствии с требованиями безопасности;
- квалифицированное обучение работников правилам пожарной безопасности; разработка производственно-технических инструкций о мерах противопожарной безопасности для каждого взрывопожарного и пожарного участка;
- недопущение посторонних лиц на объекты, где хранятся, используются, либо транспортируются взрывчатые вещества;
- организация пожарной охраны; наличие первичных средств пожаротушения и выработка навыков владения ими.

Для обеспечения пожарной безопасности применяются пассивные и активные способы пожаротушения. При активном способе процесс горения подавляют при помощи огнегасительных средств, воздействующих на горючее вещество охлаждением очага пожара посредством разбавления реагирующих веществ. Также возможно химическое торможение введением в зону горения антикатализаторов – (ингибиторов). При пассивном способе тушения горение прекращается путем

изоляции горючего от окислителя или инертзации среды, в которой находится очаг горения. Для тушения пожаров используются жидкие пенообразные, аэрозольные, газообразные и твердые вещества, вода, химическая и воздушно–механическая пена, водяной пар, гидроаэрозоли, галоидированные углеводороды, инертные газы и порошковые составы.

При работе с пожароопасными и взрывопожароопасными веществами и материалами соблюдаются требования маркировки и предупредительных надписей [53]. Первичные средства пожаротушения представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Первичные средства пожаротушения

Наименование		ГОСТ	Количество, шт.
Огнетушитель пенный ОХП–10		ГОСТ 16005–70	2
Ящики с песком	0,5 м ³	–	4
	1 м ³		2
Лопаты		ГОСТ 3620–70	5
Лом пожарный легкий		ГОСТ 16714–71	2
Топор пожарный поясной		ГОСТ 16714–71	2
Багор пожарный		ГОСТ 16714–71	2
Ведро пожарное		ТУ 220	4

5.4 Предотвращение вредного воздействия шумов и вибраций на человека

Одним из вредных факторов, который систематически воздействует на персонал работников ПСХ, является вибрация и шум.

Значительную часть времени оперативный персонал находится в отдельных помещениях за плотными дверьми. При обходе и подготовке к сдаче смены порядок

определяется по времени и по очередности. Также обязательно используются СИЗ (беруши, защитные очки и наушники) для предотвращения пагубного воздействия вредных условий на сотрудника.

Результатом неблагоприятного воздействия на рабочий персонал вибрации и шума являются:

- снижение устойчивости ясного видения и остроты зрения;
- нарушение нормального функционирования вестибулярного аппарата;
- нарушение нормального функционирования желудочно-кишечного тракта;
- повышение внутричерепного давления.

В результате нарушается восприятие информации, правильность выполняемых работ падает и увеличивается риск травматизма на рабочем месте.

Устранение вредного воздействия шума на человека в производственных условиях достигается соблюдением ряда мер, в соответствии с ГОСТ 12.1.003 (ССБТ) [54]. Ниже перечислены общие требования безопасности, в числе которых:

- рациональное размещение оборудования;
- строительно-акустические мероприятия;
- экранирование площадок обслуживания оборудования;
- дистанционное управление шумным оборудованием;
- звукоизоляция рабочего места и оборудования;
- применение средств индивидуальной защиты.

5.5 Предотвращение инцидентов, связанных с поражением электрическим током

Взаимодействие человека с неизолированным источником электрического тока всегда имеет неблагоприятные последствия. Требования электробезопасности в первую очередь нацелены на сохранение здоровья и жизни работника, и в меньшей степени на долговечное и исправное функционирование оборудования.

Персонал, обслуживающий системы КИПиА должен быть снабжен специальными средствами индивидуальной защиты, а именно:

- спецодежда из материала, не проводящего электроток (перчатки диэлектрические, боты, галоши, ковры, изолирующие костюмы);
- изолированный инструмент;
- изолирующие штанги;
- указатели напряжения всех видов и классов;
- бесконтактные указатели наличия напряжения;
- предупреждающие таблички всех видов.

Электротравмы классифицируются по степени интенсивности воздействия источника тока на человека:

- слабовыраженные судорожные сокращения мышц;
- судорожные сокращения мышц и/или потеря сознания;
- потеря сознания и/или нарушение сердечной и дыхательной деятельности;
- клиническая смерть, а именно отсутствие дыхания и кровообращения.

Поражение человека электрическим током возможно лишь при замыкании электрической цепи через тело человека, т. е. при прикосновении человека к сети не менее чем в двух точках. При этом повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека, является опасным фактором.

В зависимости от условий производственной среды рассматриваются следующие вопросы: требования к электрооборудованию, анализ соответствия реального положения на производстве перечисленным требованиям, выбор и обоснование категории помещения по степени опасности поражения электрическим током, мероприятия по устранению обнаруженных несоответствий, обоснование мероприятий и средств защиты работающих от поражения электрическим током. При работе вблизи воспламеняющихся материалов, взрывоопасных паров или пыли разрешается использовать только специальные электроинструменты (во

взрывобезопасном исполнении или не создающие искр). Запрещается работать с электрооборудованием в дождь.

В случае поражения электрическим током, пострадавшего необходимо изолировать от источника, оказать первую медицинскую помощь, доложить начальнику смены о случившемся и вызвать бригаду скорой медицинской помощи.

Индивидуальные основные изолирующие электрозащитные средства способны длительно выдерживать рабочее напряжение электроустановок, поэтому ими разрешается касаться токоведущих частей под напряжением. В установках до 1000 В – это диэлектрические перчатки, инструмент с изолированными рукоятками, указатели напряжения [55].

Индивидуальные дополнительные электрозащитные средства обладают недостаточной электрической прочностью и не могут самостоятельно защитить человека от поражения током. Их назначение – усилить защитное действие основных изолирующих средств, с которыми они должны применяться. В установках до 1000 В – диэлектрические боты, диэлектрические резиновые коврики, изолирующие подставки.

5.6 Особенности работы с водородным топливом

Иногда внедрение инноваций безотносительно требует значительных изменений в области безопасности эксплуатации тех или иных энергетических установок. Основным фактором непредсказуемости при работе с водородом является его детонирующее свойство. Несмотря на то, что общие сведения по работе с газом под давлением уже давно принимаются во внимание, работа с H_2 имеет ряд нюансов. Поскольку прогнозировать взрывоопасность работы в загазованном помещении можно только располагая данными о возможных вариантах возникновения внештатных ситуаций. Процесс распространения взрывных волн в объемах с непостоянным сечением (вне лабораторных условий) априори является нестационарным и малопредсказуемым. На сегодняшний день недостаточно

эмпирических данных для того, чтобы выработать четкий алгоритм предупреждения и ликвидации последствий аварий, связанных с детонацией или утечкой водорода. Однако лабораторные исследования могут дать некоторое представление о характере и степени повреждений в очаге взрыва.

Дефекты оборудования и трубопроводов систем охлаждения ГТУ могут привести к аварийной разгерметизации технологических контуров [56, 57]. В этом случае первостепенным механизмом повреждения будет коррозионное растрескивание материала под напряжением. Процесс обусловливается воздействием скачков градиентов температур и давления, вызываемых микровзрывами в агрессивной среде системы.

Современные методы борьбы с вышеописанным, как правило, сводятся к оперативному определению места и масштаба аварии; стандартному вихретоковому контролю теплообменных труб (проводится в период планово-предупредительного ремонта с выявлением и устранением дефектов); внедрению системы автоматизированного контроля остаточного ресурса оборудования и трубопроводов систем [58–61].

Однако, несмотря на определенные успехи в предупреждении и устранении разгерметизации контура вышеописанными методами на ТЭС и связанными с коррозионным растрескиванием систем трубопроводов, поставить точку в вопросе предупреждения аварий пока не представляется возможным, поскольку вышеупомянутые меры не учитывают ряд крайне важных физико-химических процессов, которые могут приводить к нежелательным, а главное непредсказуемым последствиям. Отшелушивание материала трубопроводов на молекулярном уровне в циркулирующую по ним среду; образование водной наносuspension из отшелушенных наночастиц материала трубопроводов в воде; образование в контуре трубопроводов пузырьков «гремучей смеси»; микроскопические локальные отложения в местах нарушения ламинарного течения воды, а также их микровзрывы – все это должно быть учтено и проработано с целью организации мероприятий, связанных со своевременной диагностикой и ликвидацией.

Описанную проблему сложно решить еще и в связи с негативным влиянием на электрохимические процессы ряда неучтенных ранее факторов, среди которых наличия в воде пузырьков, заполненных парами H_2O (мелкодисперсной твердой и газовой фазы). Также свой отпечаток накладывает специфика пристеночной гидродинамики потока, несущего взвесь с различными вариантами поведения в ламинарном подслое [62, 63].

Наиболее интенсивному старению материалов трубопроводов [64] подвергаются те из них, которые относятся к элементам, находящимся под постоянным воздействием нейтронов. Сюда же можно отнести и материалы трубопроводов топливного тракта. Особенно сильно процессы старения сказываются на различных сплавах, поскольку под нейтронным воздействием меняется их элементный состав на некоторую величину. Сама кристаллическая структура, от которой зависят их прочностные характеристики так же может подвергнуться разрушению.

5.7 Меры безопасности при работе с водородом

При конструировании объектов, производящих или потребляющих водород, в обязательном порядке необходимо предусмотреть меры, соблюдение которых обеспечит максимальную безопасность самого процесса, а также жизни и здоровья работников. Основной мерой предосторожности при работе с описываемым энергоносителем является исключение вероятности его воспламенения. В результате взрыва смеси водорода с кислородом воздуха происходит выброс большого количества энергии. Помимо того, что скорость распространения водородного пламени велика, опасные концентрации H_2 в воздухе варьируются от 4 до 74%. Немаловажным фактором является и то, что требуемая для воспламенения водорода энергия составляет 0,1 часть энергии воспламенения углеводородов.

Жидкий водород, в свою очередь, опасен тем, что имеет свойство конденсировать воздух. Аварийный разлив такого энергоносителя из-за малой

теплоты парообразования и низкой температуры способен крайне быстро испаряться.

Исходя из вышесказанного, существует три вида потенциальных опасностей, связанных с водородом – разгерметизация аппаратов под давлением, пожар и взрыв. Последние два могут являться следствием разгерметизации. Несмотря на многолетний опыт исследования данного химического элемента, точный характер протекания процесса при взаимодействии с кислородом воздуха трудно предсказать. Наибольшую склонность к взрыву в открытом пространстве при инициации имеет смесь с концентрацией водорода от 30 до 40%.

Превышение максимального допустимого давления, отказ или выход из строя регулирующих и предохранительных клапанов являются основными причинами разгерметизации системы в процессе работы. Эксплуатация аппаратов, работающих под давлением, производится в соответствии с нормативной документацией.

Объем контроля определяется по ГОСТ [65], в зависимости от группы сосуда (аппарата), который работает под давлением, от температуры стенки, расчетного давления и характера рабочей среды (таблица 5).

Для коллективной защиты аппараты под высоким давлением должны оснащаться системами взрывозащиты, которые предполагают наличие различных огнепреградителей и гидрозатворов. Также используются устройства аварийного сброса давления (обратные и предохранительные клапаны). Оперативный персонал при эксплуатации энергоустановок, работающих под давлением обязан использовать следующие СИЗ: костюм хлопчатобумажный, рукавицы комбинированные, сапоги резиновые.

Для коллективной защиты аппараты под высоким давлением должны оснащаться системами взрывозащиты, которые предполагают наличие различных огнепреградителей и гидрозатворов. Также используются устройства аварийного сброса давления (обратные и предохранительные клапаны). Оперативный персонал при эксплуатации энергоустановок, работающих под давлением обязан

использовать следующие СИЗ: костюм хлопчатобумажный, рукавицы комбинированные, сапоги резиновые.

Таблица 5 – Определение группы сосуда

Группа сосуда	Расчетное давление, Мпа	Температура стенки, °С	Характер рабочей среды
1	Свыше 0,07	–	1, 2 класс опасности по ГОСТ 12.1.007
2	До 2,50	Ниже минус 70, выше 400	Любая, за исключением указанной для 1-й группы 3 сосудов
	Свыше 2,50 до 4,00	Ниже минус 70, выше 200	
	Свыше 4,00 до 5,00	Ниже минус 40, выше 200	
	Свыше 5,00	–	
3	До 1,60	От минус 70 до минус 20	
	Свыше 1,60 до 2,50	От минус 700 до 400	
	Свыше 2,50 до 4,00	От минус 70 до 200	
	Свыше 4,00 до 5,00	От минус 40 до 200	
4	До 1,60	От минус 20 до 200	–

Для коллективной защиты аппараты под высоким давлением должны оснащаться системами взрывозащиты, которые предполагают наличие различных

огнепреградителей и гидрозатворов. Также используются устройства аварийного сброса давления (обратные и предохранительные клапаны). Оперативный персонал при эксплуатации энергоустановок, работающих под давлением обязан использовать следующие СИЗ: костюм хлопчатобумажный, рукавицы комбинированные, сапоги резиновые.

Основной причиной воспламенения или взрыва является смешение водорода с кислородом воздуха, поэтому ее исключение является одной из первостепенных задач. Попадание воздуха внутрь трубопроводов может быть вызвано присутствием остаточного воздуха перед заполнением системы H_2 или же подсосом из атмосферы вследствие понижения давления в системе. Заполнению должна предшествовать откачка вакуум-насосом с последующим заполнением N_2 . Только после этого возможна подача водорода в контур. Для удаления остатков воздуха после заполнения следует при помощи компрессора осуществить циркуляцию водорода через блок адсорбционной очистки в течение нескольких часов. Этот же способ следует применять и при очистке системы.

Другим источником смешения водорода с кислородом воздуха может быть аварийная разгерметизация или постоянная утечка коммуникаций. В этом случае взрывоопасная смесь образуется в помещениях. Тщательная герметизация системы – основное условие для безопасной работы.

Также при конструировании станции необходимо сводить к минимуму число фланцевых соединений, заменяя их сварными. Особое внимание следует уделить качеству пайки и сварки. Необходимо устанавливать предохранительные клапаны на коммуникациях и в емкостях с водородом. На трубопроводах должны быть установлены компенсаторы, предотвращающие возникновение низкотемпературных напряжений [66]. Поскольку проникновение водорода в помещение полностью не может быть исключено, всегда предусматривают усиленную вентиляцию станций. Необходимо обеспечить полный обмен воздушной смеси каждые 2 минуты. Непрерывный анализ содержания водорода в воздухе является не менее важным средством, позволяющим избежать потенциально опасных ситуаций. Конструкция

станции должна быть спроектирована так, что в случае обрушения части здания была возможность эвакуации остального персонала.

Еще одной причиной опасности возникновения аварийной ситуации является наличие источников ее инициации. Как известно, смесь водорода с кислородом воздуха не имеет свойство детонировать самопроизвольно. Чтобы возник взрыв или горение, системе необходимо сообщить некоторое количество энергии. К возможным источникам инициирования относятся:

- открытое пламя или искры;
- ударные волны в газах, жидкостях или твердых телах;
- тепло химических реакций;
- введение механической энергии путем трения или удара.

Во избежание возникновения аварийных ситуаций запрещаются работы, связанные с наличием открытого пламени в помещениях станции, не допускается применение искрящего электрического оборудования и наличие источников статического электричества. Электродвигатели, стартеры и прочие элементы электрооборудования не должны допускать возможность искрообразования. Все потенциально опасное с этой точки зрения оборудование также необходимо заземлить. Пол помещения должен быть выполнен из электропроводного материала для снятия электростатических зарядов. В противном случае, данное оборудование необходимо вынести за пределы опасной зоны. Оперативный персонал следует обеспечить инструментом, исключающим возникновение искр. Перед входом в котлотурбинный цех и цех электролиза следует разместить таблички согласно ГОСТ [67].

Опыт работы с водородом показывает, что выполнение всех вышеуказанных рекомендаций вкупе с соблюдением общих требований охраны труда обеспечивает безопасную эксплуатацию водородных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вероятно, в обозримом будущем энергетическую промышленность ждут серьезные изменения, поскольку запасы органического топлива постепенно иссякают. С потребительской точки зрения это означает, что человечеству следует заранее позаботиться о том, чтобы найти достойную альтернативу существующим методам генерации электрической и тепловой энергии во избежание техногенной и экономической катастрофы мирового масштаба. С экологической точки зрения – это сигнал к тому, чтобы перестать опрометчиво расходовать природные ресурсы и взять курс на осознанное потребление. Культура использования водорода в качестве топлива, получаемого из возобновляемых источников, может стать достойным преемником генерации энергии из органического топлива и внести существенный вклад в глобальную кампанию по предотвращению усугубления проблемы парникового эффекта.

Одной из главных целей данной работы являлось всестороннее представление состояния водородной энергетики в мире. В числе приоритетных стояла задача наиболее полно отразить тенденции, связанные с производством водорода и генерацией энергии на его основе.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ существующих методов генерации водородного топлива, из которых наиболее перспективным показал себя метод электролиза воды. На примере уже существующей модели электролизера были проведены расчеты, подтверждающие превосходство предлагаемого метода над методом паровой конверсии метана. С технической точки зрения положительным эффектом можно считать увеличение мощности с 3 до 50 МВт посредством монтажа станций блочного типа. С экономической точки зрения положительный эффект заключается в снижении удельной себестоимости производимого водорода на 10,59 руб. за счет использования внепиковой энергии ЗС ТЭЦ.

Патентные изыскания на предмет наличия новых, более совершенных полезных моделей электролизеров и парогенераторов, также дали положительный результат. Были предложены две модели электролизеров и три модели парогенераторов, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки.

В работе были представлены существующие промышленные объекты генерации электрической и тепловой энергии, а также их технические характеристики.

Была освещена специфика безопасности жизнедеятельности при работе с водородным топливом.

Настоящая работа может представлять интерес для разработки проектных решений по реконструкции и модернизации ТЭС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. BBC News: Прошло три года, и Россия присоединилась к Парижскому соглашению по климату [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://www.bbc.com/russian/news-49798617>, свободный (дата обращения 13.03.2020).
2. Коваленко Е.Г. Модернизация механизма устойчивого развития сельских территорий. — М.: Издательство Академия Естествознания, 2014. — 166 с.
3. Гамбург Д.Ю. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение : справочник / Д.Ю. Гамбург, Н.Ф. Дубовкин . — Москва : Химия, 1989. — 671 с.
4. Шпильрайн Э.Э. Введение в водородную энергетику. — Москва : Энергоатомиздат, 1984. — 264 с.
5. Коробцев С.В. Современные методы производства водорода // Международный химический саммит. — М.: 2004.
6. Holladay J.D. An overview of hydrogen production technologies // Catalysis Today. — 2019. — №4. — С. 244.
7. Гурьянов А.И. Теплофизика водород-кислородных камер сгорания высокотемпературных турбин комбинированных ПГУ // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. - Самара: СГАУ, 2011. — С. 137.
8. Зарянкин А.Е. Гибридные АЭС с внешним по отношению к реактору перегревом пара // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии». – Иваново: 2011. – С. 79–82.
9. Смердова С.Г. Разработка и получение катализатора для водородных топлив элементов в институте инноваций топливных элементов // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – №10. – С. 71.
10. Дресвянников А.Ф., Ситников С.Ю. Материалы–аккумуляторы водорода. — Казань: КГЭУ, 2005. — 172 с.

11. ГОСТ Р ИСО 22734-1-2013. Генераторы водородные на основе процесса электролиза воды. Часть 1. Генераторы промышленного и коммерческого назначения. [Электронный ресурс]: сайт – Режим доступа: <http://gostpdf.ru/gost-22734-1-2013>, свободный (дата обращения 11.04.2020).
12. Grigoriev A.S., Ramenskiy A.Y., Ramenskaya E.A. Technical regulation issues concerning fuel cell technologies in the Russian Federation, countries of the Eurasian economic Union and CIS countries // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – №1. – P. 13.
13. Hiroshige M., Seiichiro K., Kenshi I., Kato Y. Hydrogen Production. Energy Technology Roadmaps of Japan, Springer International Publishing. Japan. – 2016. P. 147-165.
14. Postnauka: Водородная энергетика [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://postnauka.ru/video/41197>, свободный (дата обращения 16.03.2020).
15. Ramana K.P. A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Aerospace Engineering, Arizona State University. Arizona. – 2015. 62 p.
16. С.В. Коробцев. Междун. Химич. Саммит (Москва, 1-2 июля, 2004), Москва, 2004.
17. Ohlmann J., Sanchez J.M., Lackner D. 12th Int. Conf. on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-12). AIP Publishing. – 2016. 32 p.
18. Dincer I., Joshi A.S. Solar Based Hydrogen Production Systems. Chapter 2. Springer Briefs in Energy. – 2013. 13 p.
19. Chen W.Y., Wang Q. Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation, Springer International Publishing, Switzerland. – 2017. P. 2997
20. Яндекс. Патенты [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://yandex.ru/patents>, свободный (дата обращения 25.05.2020).
21. Lin M., Hourng L., Hsu J. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 39. – 2017. P. 352.

22. Mefford J.T., Rong X., Abakumov A.M., Hardin W.G. Nat. Commun 1. – 2016. P. 11.
23. Tymoczko J., Calle-Vallejo F., Schuhmann W. Nat. Commun 2. – 2016. – P. 1.
24. Liu Y., Wu J., Hackenberg K.P. Nat. Energy 2. – 2017. p. 7.
25. Kim Y., Lopes P.P., Park S. Nat. Commun 8. – 2018. P. 1449.
26. Ohlmann J., Sanchez J.M., Lackner D. 12th Int. Conf. on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-12). AIP Publishing. – 2016. 16 p.
27. Сияк Ю.В., Петров В.Ю. Прогнозные оценки стоимости водорода в условиях его централизованного производства // Проблемы прогнозирования. – 2008. - №3. – С. 35–47.
28. Forsberg C.W. Production of Hydrogen Using Nuclear Energy // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2004. – № 2. – P. 5–9.
29. European Commission. Sustainable Energy Systems. Work Programme. SPI-Priority. – 2004. 70 p.
30. Пономарев-Степной Н.Н. Атомно-водородная энергетика // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2004. № 3. P. 5.
31. Радченко Р.В. Общая энергетика: водород в энергетике / учебное пособие для вузов / Р.В. Радченко [и др.]. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 230 с.
32. Postnauka: Проблемы водородной энергетики [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://postnauka.ru/video/95574>, свободный (дата обращения 16.03.2020).
33. Материалы для хранения водорода: анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках / В.М. Ажажа и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2006. – № 1. – С. 145–152.
34. Письмен М.К. Производство водорода в нефтеперерабатывающей промышленности. Москва : Химия, 1976. – 208 с.
35. Якименко Л.М., Модылевская И.Д., Ткачек З.А. Электролиз воды. Москва : Химия, 1970. – 263 с.

36. Водородные перспективы [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://plus.rbc.ru/news/5dfc2e607a8aa9fb3e34dbf3>, свободный (дата обращения 26.05.2020).

37. Марченко О.В., Соломин С.В. Анализ эффективности производства водорода с использованием ветроэнергетических установок и его использование в автономной энергосистеме // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2007. № 3. Р. 112–118.

38. Радченко Р.В. Водород в энергетике : учеб. пособие / Р.В. Радченко, А.С. Мокрушин, В.В. Тюльпа. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2014. – 229 с.

39. Байрамов А.Н. Техничко-экономические аспекты подземного расположения металлических емкостей хранения водорода и кислорода в составе водородного энергетического комплекса // Труды академэнерго. 2014. № 2. С. 79–86.

40. Байрамов А.Н. Разработка и обоснование схемы подземного расположения металлических емкостей хранения водорода и кислорода в составе водородного энергетического комплекса // Сб. научн. тр. “Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса”. – Вып. 7. – 2012. – С. 18–27.

41. Российский рынок газа [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://www.gazprom.ru/about/marketing/russia/>, свободный (дата обращения 26.05.2020).

42. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Системная эффективность водородных циклов на основе внепиковой электроэнергии АЭС // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2011. – № 4. – С. 52–61.

43. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Оценка конкурентной эффективности получения водорода методом электролиза воды на основе внепиковой электроэнергии // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. – №4. – С. 84–90.

44. В Италии запустили водородную электростанцию [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://alternenergy.wordpress.com/2009/08/17/>, свободный (дата обращения 10.06.2020).

45. Fusina project presentation, Enel [Электронный ресурс] сайт. – Режим доступа: <http://www.zeroco2.no/projects/fusina>, свободный (дата обращения 26.05.2020).

46. Ключников А.Д., Петин С.Н. Повышение энергетической и экологической эффективности производства водорода на базе комплексного использования природного газа на предприятиях черной металлургии // Вестник Московского энергетического института, 2008, – №3. – С. 18–23.

47. Петин С.Н. Разработка перспективной модели энерго- и экологически эффективного производства водорода на базе природного газа и комбинирования процессов в черной металлургии: автореф. дис. к. т. н. М.: ГОУ ВПО МЭИ (ТУ), 2009. – 20 с.

48. О строительстве завода по производству жидкого водорода в Магаданской области [Электронный ресурс] сайт. – Режим доступа: <http://council.gov.ru/press-center/news/35110/>, свободный (дата обращения 26.05.2020).

49. О строительстве завода по производству жидкого водорода в Магаданской области [Электронный ресурс] сайт. – Режим доступа: <http://council.gov.ru/press-center/news/49461/>, свободный (дата обращения 26.05.2020).

50. О строительстве завода по производству жидкого водорода в Магаданской области [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: http://www.49gov.ru/press/press_releases/index.php?id_4=7059/, свободный (дата обращения 10.06.2020).

51. ГОСТ 12.0.004–2015. Организация обучения безопасности труда. Общие положения. [Электронный ресурс] сайт. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200136072>, свободный (дата обращения 11.06.2020).

52. СанПиН 2.2.4.548.96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [Электронный ресурс] сайт. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901704046>, свободный (дата обращения 11.06.2020).
53. ГОСТ 12.4.011–89 Средства защиты работающих. Общие требования и классификация [Электронный ресурс] сайт. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200000277>, свободный (дата обращения 12.06.2020).
54. ГОСТ 12.1.003–2014 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности [Электронный ресурс] сайт. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118606>, свободный (дата обращения 12.06.2020).
55. Bosh S. A review of Nuclear Piping Failures at their use in establishing the reliability of Piping Systems // Service Experience in Fossil and Nuclear Power Plant, 1999. – № 392. – P. 137–155.
56. Gosselin S., Fleming K. Evaluation of Pipe Failure Potential via Degradation Mechanism Assessment // Proceedings of ICONS 5th International Conference of Nuclear Engineering. 1997. – 10 p.
57. Кулаков А.В., Матвеев А.Л., Овчинников В.А. Определение расхода течи теплоносителя под системой контроля влажности при разгерметизации контура охлаждения реактора // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2013. – № 5. – С. 82–85.
58. Матвеев Е.Л., Кулаков А.В., Зубченко А.С. Акустико-эмиссионный контроль течи в трубопроводах // Тяжелое машиностроение. – 2015, – № 8. – С. 1–8.
59. Тесленко М.В. Расположение дефектов на теплообменных трубах парогенераторов. Прогнозирование количества заглушенных труб. // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 8. – С. 35–39.
60. Богачев А.В., Галиев Р.С. Внедрение на энергоблоке №1 Ростовской АЭС системы автоматизированного контроля остаточного ресурса оборудования и трубопроводов реакторной установки // Теплоэнергетика. – 2003. – № 5. – С. 16–18.
61. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. – М. : Наука, – 1987. – 464 с.

62. Safe Long Term Operation of Nuclear Power Plants, Safety Reports Series – Vienna: International Atomic Energy Agency [Электронный ресурс] сайт. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/publications/10886/safety-of-nuclear-power-plants-commissioning-and-operation>, свободный (дата обращения 12.06.2020).

63. ГОСТ Р 12.4.026-2001. Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения [Электронный ресурс] сайт. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200026571>, свободный (дата обращения 15.06.2020).

64. Lenkey G.B. Determination of Mechanical Properties of Aged Components Using Instrumented Hardness Testing and other Miniature Specimen Testing Techniques // Strength of Materials. – 2013. – № 4. – P. 433–441.

65. ГОСТ Р 52630–2012. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия [Электронный ресурс] сайт. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200097422>, свободный (дата обращения 11.06.2020).

66. Компенсаторы, фланцевые соединения. [Электронный ресурс] сайт. – Режим доступа: <https://www.chem21.info/info/404114/>, (дата обращения 15.06.2020).

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Кафедра Теплоэнергетики и экологии

ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

выпускной квалификационной работы:

Исследование возможности использования водорода как технологического
энергоносителя в теплоэнергетике Кузбасса
(тема)

ОБУЧАЮЩИЙСЯ _____
(подпись)

Коньшев Л.А.
(фамилия, имя, отчество)

допущен к защите в государственной экзаменационной комиссии «30» июня 2020 г.

Руководитель _____
к.т.н., доцент (уч. степень, звание) _____ (подпись) Михайличенко Т.А.
(фамилия, имя, отчество)

И.о. заведующего
кафедрой _____
к.т.н., доцент (уч. степень, звание) _____ (подпись) Темлянцева Е.Н.
(фамилия, имя, отчество)

Директор института
МиМ
(наименование института) _____
д.т.н., профессор (уч. степень, звание) _____ (подпись) Галевский Г.В.
(фамилия, имя, отчество)

Нормоконтроль _____
к.т.н., доцент (уч. степень, звание) _____ (подпись) Михайличенко Т.А.
(фамилия, имя, отчество)

Новокузнецк
2020 г.

Исследование возможности использования водорода как технологического энергоносителя в теплоэнергетике Кузбасса

Выполнил обучающийся гр. МТ-16
Конышев Л.А.

Руководитель к.т.н., доцент
Михайличенко Т.А.

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						
Разраб.		Конышев Л.А.			Тема выпускной квалификационной работы		Лит.	Лист	Листов	
Руковод.		Михайличенко Т.А.					У	3	18	
Консульт.							Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16			
Н. контр.		Михайличенко Т.А.								
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.								

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Цель ВКР

Проведение анализа методов производства водорода и его использования в качестве топлива для генерации тепловой и электрической энергии в различных установках.

Задачи ВКР

- Представление основных способов получения водорода, которые могут быть использованы в энергетике;
- Проведение сравнительного анализа технологий производства водорода;
- Патентная проработка;
- Выбор устройства для производства тепловой и электроэнергии посредством сжигания водородного топлива.

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Коньшев Л.А.			Цель и задачи выпускной квалификационной работы	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайличенко Т.А.				У	4	18
Консульт.						Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайличенко Т.А.						
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.						

СТРУКТУРА МИРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА В 2019 ГОДУ

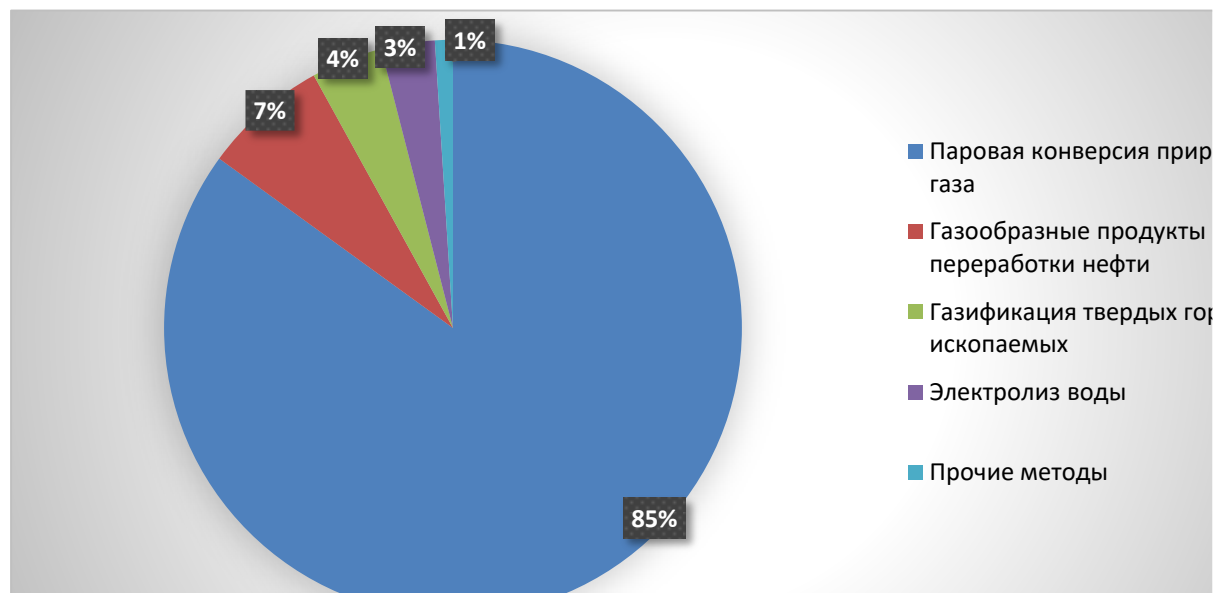


Рисунок 1 – Структура мирового производства водорода

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Структура мирового производства водорода в 2019 году					
Разраб.		Коньшев Л.А.						Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайличенко Т.А.						У	5	18
Консульт.								Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайличенко Т.А.								
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.								

МЕТОДЫ ГЕНЕРАЦИИ ВОДОРОДА

Таблица 1 – Характеристика методов получения водорода

Метод	Характеристика
Преобразование биологической массы	При термохимическом методе исходную биологическую массу в форме древесины подвергают нагреву до 800°C в отсутствие O ₂ . Указанная температура ниже температуры газификации продуктов угледобычи, что приводит к эмиссии водорода, монооксида углерода и метана. Стоимость процесса на килограмм произведенной продукции составляет примерно 360 руб./кг. Согласно оптимистичному сценарию, в течение 5 лет прогнозируется снижение себестоимости до 130 руб./кг.
Термохимическое разложение воды	Как правило, данный процесс производят в термохимических установках пиролизного или газогенераторного типа. Синтез-газ является составной частью продуктов частичного сгорания биомассы. Весомым недостатком данной технологии при воздушном и паровоздушном дутье является плохое качество получаемого продукта и низкий выход синтез-газа из-за большого количества примесей азота, попадающего в продукт вместе с воздушным дутьем, а также присутствие значительных количеств смолы, органических кислот и углистого остатка веществ в продуктах неполного сгорания биомассы. Получаемые попутно продукты не могут служить самостоятельным сырьем для получения жидких топлив высокого качества, а также применяться в химической отрасли промышленности.
Плазмохимическая генерация водорода из газообразного топлива	Предполагает использование плазмы или ионизированного газа. Пары разных по составу веществ подводят в плазмотроны, где под действием электромагнитного поля высокой интенсивности генерируют электроразряды, образуя плазму. Электронам передается энергия электрического поля, а они, в свою очередь, передают ее нейтронам, которые переходят в химически активное, возбужденное состояние. Исследования показали, что на момент написания настоящей работы метод прямого плазмохимического разложения паров воды является крайне малоэффективным. Идеальным объектом плазмохимических преобразований является CO ₂ . При его разложении на кислород и оксид углерода коэффициент полезного действия превышает 80%. Почти вся энергия, вкладываемая в разряд, направляется на осуществление полезной работы.
Паровая конверсия метана	Паровую конверсию метана проводят в печах при температуре от до 900°C. Конвертируют метан и его гомологи с целью получения водорода или его смеси. Такие смеси используются для синтеза органических продуктов, а также в качестве газов-восстановителей в металлургической промышленности. Нередко конверсия метана производится для получения водорода. Основными преимуществами метода паровой конверсии метана для производства водорода являются надежность, безопасность и простота в эксплуатации. В связи с этим, данный метод получил наибольшее распространение в промышленности, как в России, так и за ее пределами.
Электролиз воды	Цепочка физико-химических процессов, в результате которых в установке-электролизере электрический ток инициирует расщепление молекулы H ₂ O на две молекулы водорода и молекулу кислорода. Электроток пропускается между двумя электродами, разделенными проводящим электролитом, или так называемой «средой переноса ионов». Водород концентрируется на отрицательном катоде, а кислород на положительном аноде. Технологический процесс прост относительно конкурентных решений, процесс непрерывен, возможна его полная автоматизация и отсутствие сложных механических частей.
	Данный метод имеет высокий КПД около 98% и позволяет переводить энергию угля в тепловую

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР							
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата								
Разраб.	Коньшев Л.А.				Методы генерации водорода		Лит.	Лист	Листов			
Руковод.	Михайличенко Т.А.						У	6	18			
Консульт.							Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16					
Н. контр.	Михайличенко Т.А.											
И.о. зав. каф.	Темлянцева Е.Н.											

ПАТЕНТНАЯ ПРОРАБОТКА

Таблица 2 – Результаты патентного поиска полезных моделей электролизеров

Страна	Индекс МПК	Номера просмотренных патентов	Выявленные аналоги
Россия	C25B 1/12	№ 174582 – 179209	№174582 «ЭЛЕКТРОЛИЗЕР ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ»
			№179209 «ЭЛЕКТРОЛИЗЕР ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ»

Таблица 3 – Результаты патентного поиска полезных моделей парогенераторов

Страна	Индекс МПК	Номера просмотренных патентов	Выявленные аналоги
Россия	F22B 37/00	№ 2309325 – 2705925	№ 2309325 «ПАРОГЕНЕРАТОР»
			№ 2623017 «ПАРОГЕНЕРАТОР»
			№ 2705925 «ПАРОГЕНЕРАТОР»

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Коньшев Л.А.			Патентная проработка	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайличенко Т.А.				У	7	18
Консульт.						Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайличенко Т.А.						
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.						

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОТОТИПОВ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ

Таблица 4 – Описание особенностей полезных моделей электролизеров

Выявленные аналоги	Описание полезной модели
№174582 «ЭЛЕКТРОЛИЗЕР ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ»	<p>Техническим результатом электролизера высокого давления по патенту № 174582 является улучшение эксплуатационных характеристик, заключающееся в увеличении ресурса непрерывной работы, высокой ремонтоспособности и простоты эксплуатации. Полезная модель состоит из корпуса со съемным фланцем с прикрепленными к нему анодом, катодом, мембраной, электродными рамками, патрубками подвода и отвода реагентов, герметичным токоподводом и штуцером для создания давления внутри корпуса. Установка отличается от аналогов тем, что корпус электролизера снабжен съемной крышкой с патрубками подвода и отвода реагентов и токопроводами, к крышке прикреплены с помощью выступов электролизные ячейки, выполненные независимыми друг от друга с отдельными патрубками подвода и отвода реагентов и токопроводами. Заявлено, что в предлагаемом техническом решении электролизные ячейки работают независимо друг от друга, за счет чего достигается заявленный технический результат по улучшению эксплуатационных характеристик электролизера высокого давления, заключающемуся в увеличении ресурса непрерывной работы, высокой ремонтоспособности и простоты эксплуатации.</p>
№179209 «ЭЛЕКТРОЛИЗЕР ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ»	<p>Электролизер высокого давления по патенту № 179209 состоит, аналогично предыдущему, из жесткого корпуса со съемным фланцем со штуцером для создания критического давления внутри корпуса и съемной крышкой, с электролизными ячейками дискообразной формы с анодом, катодом, мембраной, электродными рамками, патрубками подвода и отвода реагентов и герметичными токоподводами, с опорами для электролизных ячеек. Техническим результатом заявленной полезной модели является улучшение эксплуатационных характеристик электролизера высокого давления, заключающееся в увеличении допустимого рабочего давления и снижения стоимости продуктов электролиза. В предлагаемом электролизере реализована более высокая прочность корпуса и снижение балластного объема ячеек, что позволяет повысить эксплуатационные характеристики.</p>

СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Коньшев Л.А.		
Руковод.		Михайличенко Т.А.		
Консульт.				
Н. контр.		Михайличенко Т.А.		
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.		
Сравнительная характеристика прототипов электролизеров				
		Лит.	Лист	Листов
		У	8	18
Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16				

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОТОТИПОВ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

Таблица 5 – Описание особенностей полезных моделей парогенераторов

Выявленные аналоги	Описание полезной модели
<p>№ 2309325 «ПАРОГЕНЕРАТОР»</p>	<p>Парогенератор по патенту № 2309325 содержит запальное устройство с электросвечой и магистралями подвода горючего и окислителя, смесительную головку с огневым днищем, коллекторами окислителя и горючего и соответствующими магистралями, камеры сгорания и смешения, промежуточное сопло с профилированными стенками, вкладыш подачи балластировочного компонента с магистралью подвода балластировочного компонента. Смесительная головка содержит триплетные смесительные элементы с обеспечением соударения струй. Техническим результатом является обеспечение улучшения характеристик смесеобразования между балластировочным компонентом и факелом продуктов сгорания, а также снижение массы и габаритов агрегата.</p>
<p>№ 2623017 «ПАРОГЕНЕРАТОР»</p>	<p>Парогенератор по патенту № 2623017 содержит запальное устройство с электросвечой, смесительную головку с магистралями подвода окислителя и горючего, камеру смешения с отверстиями, при этом камера сгорания с каналами тракта охлаждения выполнена выпуклой формы с центром вращения образующей вокруг оси камеры сгорания и состоит из двух частей, жестко и герметично соединенных между собой, с уступом, выполненным на внутренней стенке первой части, в котором имеются отверстия под углом к продольной оси камеры сгорания, соединенные с трактом охлаждения. Техническим результатом является повышение эффективности процесса горения в районе головки у внутренней стенки камеры сгорания и увеличение ресурса работы парогенератора.</p>
<p>№ 2705925 «ПАРОГЕНЕРАТОР»</p>	<p>Парогенератор по патенту № 2705925 содержит корпус с камерой сгорания, смесительную головку с полостями подвода компонентов топлива, пояса подачи компонентов топлива, соединенные с соответствующими полостями компонентов топлива при помощи каналов, при этом пояса подачи компонентов топлива выполнены в виде нескольких коаксиально установленных обечаек, расположенных по отношению друг к другу с кольцевыми зазорами и образующих замкнутые кольцевые полости, открывающиеся в камеру сгорания, причем кольце-вые полости компонентов топлива равномерно чередуются между собой, при этом в центральной части головки, между поясами подачи компонентов, установлен пояс подачи парообразующей жидкости, полость которого открывается в полость камеры сгорания, при этом на торцах обечаек со стороны входа установлены торцевые профилированные днища, скрепленные между собой и с корпусом и образующие последовательно расположенные торцевые кольцевые полости, причем в указанных днищах и полостях выполнены изолированные каналы, соединяющие упомянутые торцевые полости подачи компонентов топлива через одну между собой, при этом указанные кольцевые полости компонентов топлива со-единены с соответствующими полостями подвода компонентов через упомянутые торцевые полости, образованные профилированными днищами. Техническим результатом является обеспечение возможности создания системы с надежным охлаждением и возможностью изменения расхода пара.</p>

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.	Коньшев Л.А.				Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Михайличенко Т.А.				У	9	18
Консульт.					Сравнительная характеристика прототипов парогенераторов Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Н. контр.	Михайличенко Т.А.						
И.о. зав. каф.	Темлянцева Е.Н.						

ПРОГНОЗ РАЗМЕРОВ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ УСТАНОВКИ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Таблица 6 – Удельные капиталовложения в электролизные установки

№ п/п	Тип установки (производитель)	Мощность установки, кВт	Удельные капиталовложения, тыс. руб./кВт, (тыс. долл./кВт)
1	HOGEN (США)	2–3	1422 (23,7)
2	СЭУ-40 (РФ)	200–250	55,9
3	HGM-2000 (США)	300	73,8 (1,2)
4	ФВ-500 (РФ)	3000	13,7

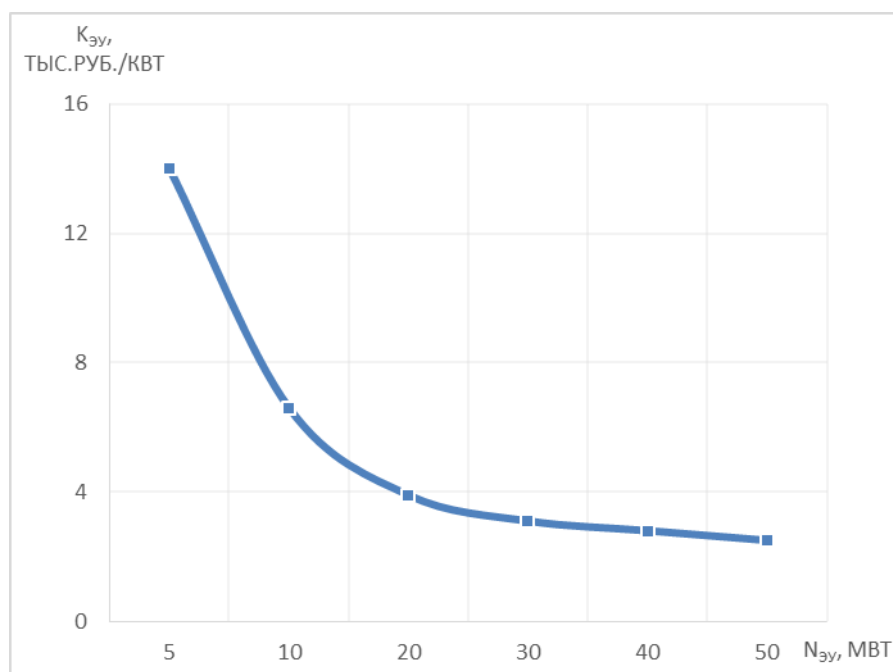


Рисунок 2 – Прогнозные капиталовложения в электролизные установки при повышении мощности от 3 до 50 МВт

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.	Коньшев Л.А.				Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Михайличенко Т.А.				У	10	18
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Н. контр.	Михайличенко Т.А.						
И.о. зав. каф.	Темлянцева Е.Н.						
					Прогноз размеров капиталовложений в установки высокой производительности		

СРАВНЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ ВОДОРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ПОСРЕДСТВОМ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ (В СОСТАВЕ ЗС ТЭЦ/ОТДЕЛЬНАЯ СТАНЦИЯ) И ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА

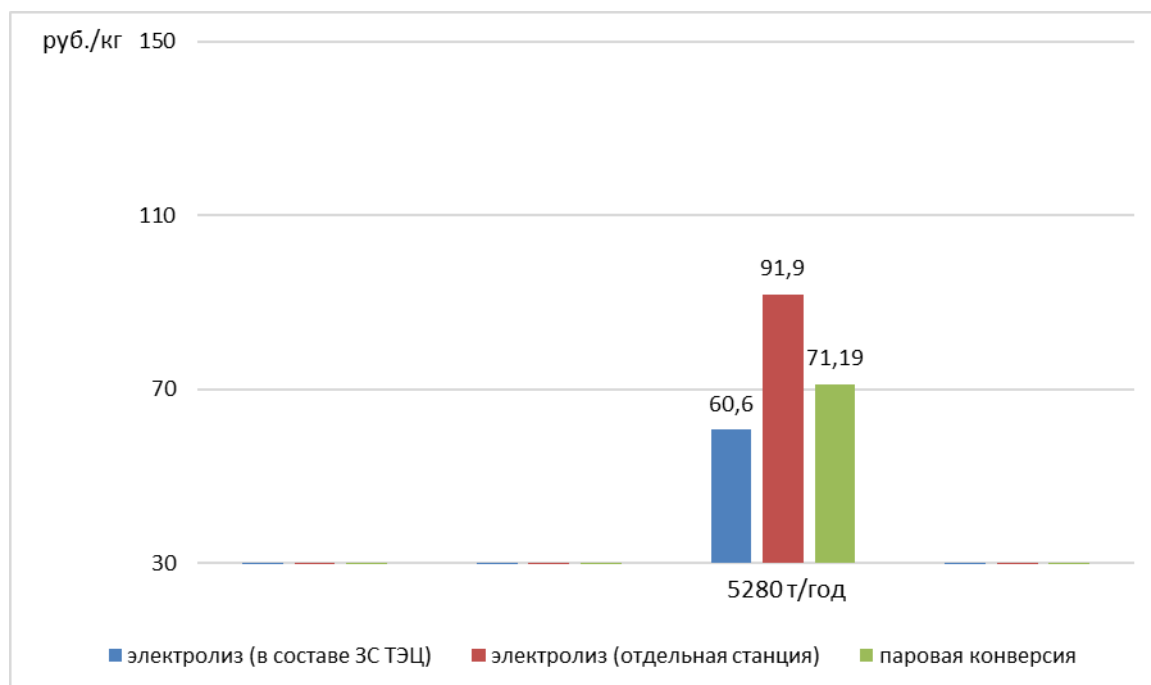
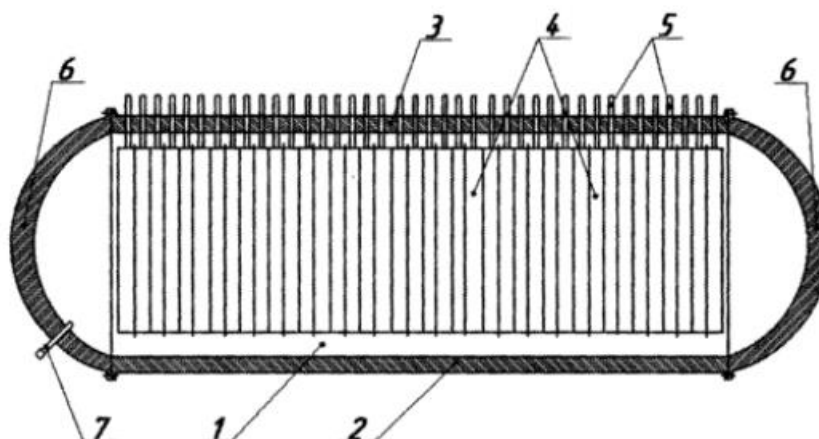


Рисунок 3 – Показатели себестоимости водорода в зависимости от методов его генерации

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Сравнение себестоимости водорода, полученного посредством электролиза воды (в составе ЗС ТЭЦ/отдельная станция) и паровой конверсией метана	Лит.	Лист	Листов
Разраб.	Коньшев Л.А.					У	11	18
Руковод.	Михайличенко Т.А.					Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Консульт.								
Н. контр.	Михайличенко Т.А.							
И.о. зав. каф.	Темлянцева Е.Н.							

ВОДОРОДНЫЙ ЭЛЕКТРОЛИЗЕР ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

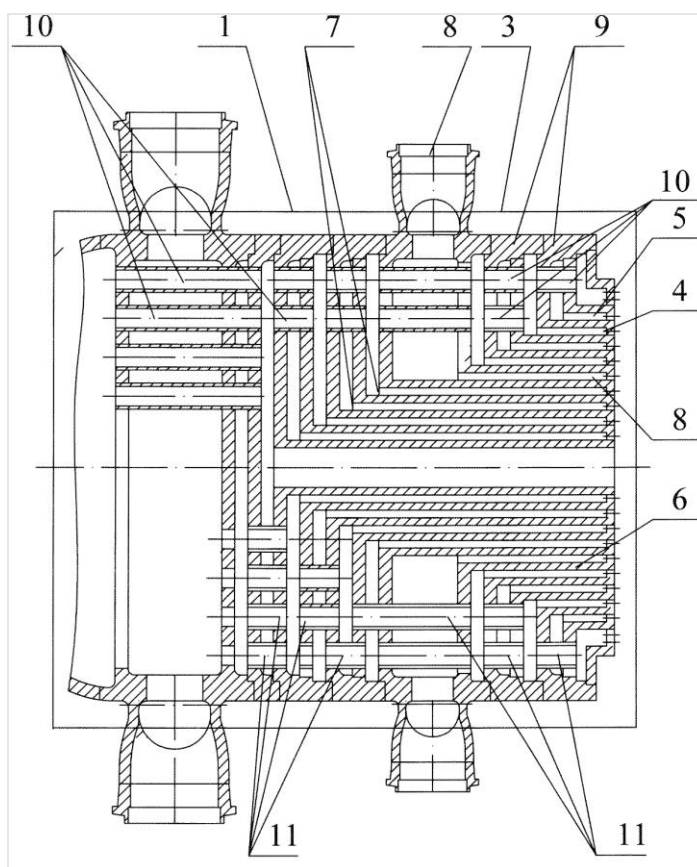


1 – электролизер; 2 – корпус; 3 – торцевая крышка; 4 – ячейки электролизера; 5 – токопроводящие отводы и отводы патрубков торцевой крышки; 6 – фланцевая часть корпуса; 7 - штуцер для подвода высокого давления.

Рисунок 4 – Схема электролизера высокого давления

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.	Коньшев Л.А.				Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Михайличенко Т.А.				У	12	18
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Н. контр.	Михайличенко Т.А.						
И.о. зав. каф.	Темлянцева Е.Н.						
					Водородный электролизер высокого давления		

УСТРОЙСТВО ВОДОРОДНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА



1 – корпус парогенератора; 2 – камера сгорания; 3 – смесительная головка с полостями подвода компонентов; 4, 5 – пояса подачи компонентов топлива; 6 – обечайки; 7 – кольцевые зазоры; 8 – пояс подачи парообразующей жидкости; 9 – торцевые профилированные днища; 10, 11 – изолированные каналы подачи теплоносителя.

Рисунок 4 – Принципиальная схема парогенератора

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Устройство водородного парогенератора					
Разраб.	Коньшев Л.А.							Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Михайличенко Т.А.							У	13	18
Консульт.								Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Н. контр.	Михайличенко Т.А.									
И.о. зав. каф.	Темлянцева Е.Н.									

ВОДОРОДНАЯ СТАНЦИЯ ЭНЕЛЬ ФУЗИНА



Рисунок 5 – Панорамный вид на электростанцию

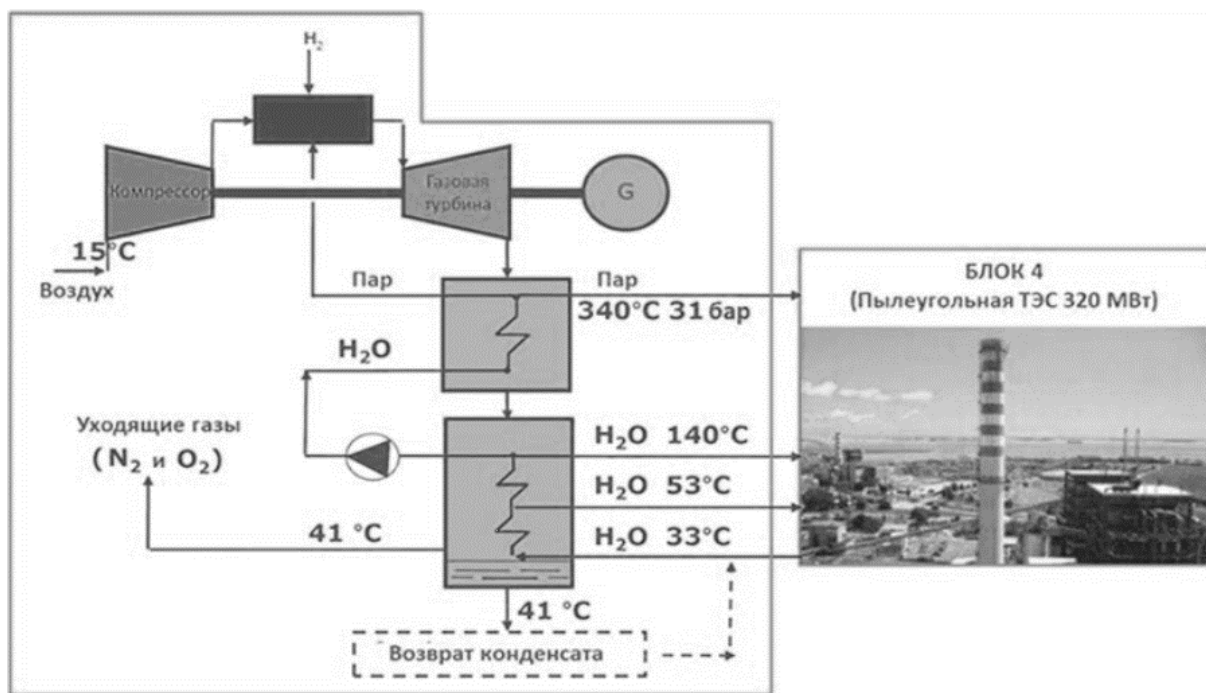


Рисунок 6 – Принципиальная тепловая схема ПГУ

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.		Коньшев Л.А.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайличенко Т.А.			У	14	18
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайличенко Т.А.					
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.					
					Водородная станция Энель Фузина		

ВОДОРОДНАЯ СТАНЦИЯ КАВАСАКИ



Рисунок – 7 Тестовая установка водородной когенерационной системы

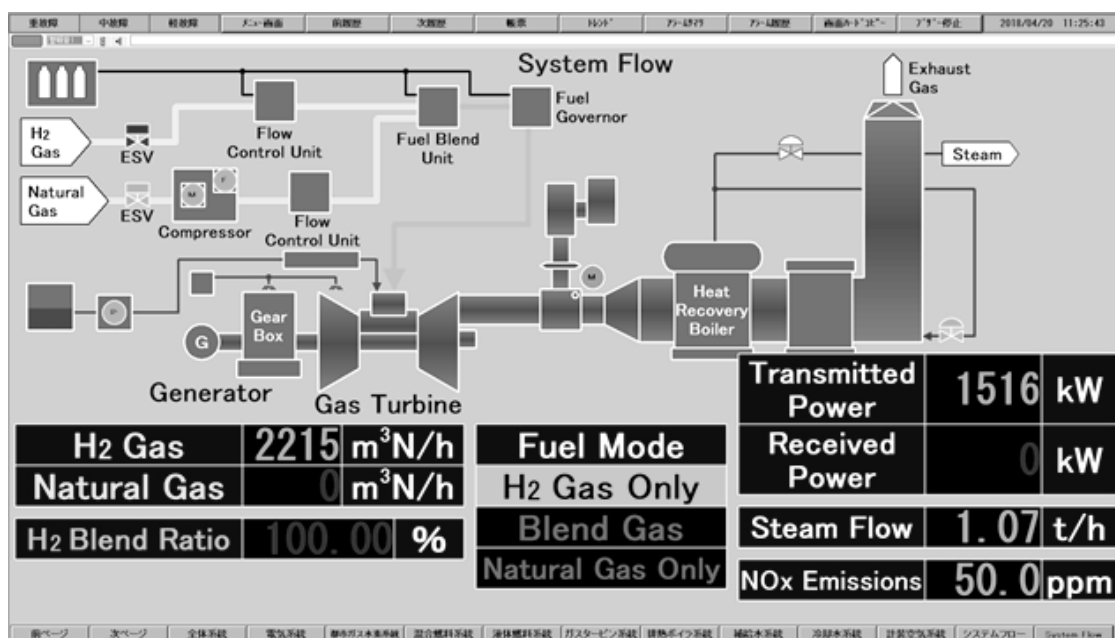


Рисунок 8 – Контрольный экран станции в режиме потребления водорода

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.		Коньшев Л.А.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайличенко Т.А.			У	15	18
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайличенко Т.А.					
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.					
Водородная станция Kawasaki							

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ВОДОРОДНЫМ ТОПЛИВОМ

Таблица 7 – Первичные средства пожаротушения

Наименование		ГОСТ	Количество, шт.
Огнетушитель пенный ОПП-10		ГОСТ 16005-70	2
Ящики с песком	0,5 м ³	–	4
	1 м ³		2
Лопаты		ГОСТ 3620-70	5
Лом пожарный легкий		ГОСТ 16714-71	2
Топор пожарный поясной		ГОСТ 16714-71	2
Багор пожарный		ГОСТ 16714-71	2
Ведро пожарное		ТУ 220	4

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Коньшев Л.А.			Обеспечение пожарной безопасности при работе с водородным топливом	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайличенко Т.А.				У	16	18
Консульт.						Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайличенко Т.А.						
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.						

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУППЫ УСТРОЙСТВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Таблица 8 – Характеристики сосудов (аппаратов) и их группы

Группа сосуда	Расчетное давление, МПа	Температура стенки, °С	Характер рабочей среды
1	Свыше 0,07	–	1, 2 класс опасности по ГОСТ 12.1.007
2	До 2,50	Ниже минус 70, выше 400	Любая, за исключением указанной для 1–й группы 3 сосудов
	Свыше 2,50 до 4,00	Ниже минус 70, выше 200	
	Свыше 4,00 до 5,00	Ниже минус 40, выше 200	
	Свыше 5,00	–	
3	До 1,60	От минус 70 до минус 20	
	Свыше 1,60 до 2,50	От минус 700 до 400	
	Свыше 2,50 до 4,00	От минус 70 до 200	
	Свыше 4,00 до 5,00	От минус 40 до 200	
4	До 1,60	От минус 20 до 200	

СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Коньшев Л.А.		
Руковод.		Михайличенко Т.А.		
Консульт.				
Н. контр.		Михайличенко Т.А.		
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.		
Определение группы устройств, работающих под давлением				
		Лит.	Лист	Листов
		У	17	18
Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16				

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Отражены тенденции, связанные с производством водорода и генерацией энергии на его основе.
- Проведен сравнительный анализ существующих методов генерации водородного топлива, из которых наиболее перспективным показал себя метод электролиза воды.
- Проведены расчеты, подтверждающие превосходство метода электролиза воды над методом паровой конверсии метана.
- Предложены две модели электролизеров и три модели парогенераторов, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки.
- Представлены существующие промышленные объекты генерации электрической и тепловой энергии, а также их технические характеристики.
- Освещена специфика безопасности жизнедеятельности при работе с водородным топливом.

					СибГИУ 2020.13.03.01.16003.ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Коньшев Л.А.			Заключение	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайличенко Т.А.				У	18	18
Консульт.						Кафедра теплоэнергетики и экологии гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайличенко Т.А.						
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.						

