

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

«Сибирский государственный индустриальный университет»

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

выпускной квалификационной работы:  
Проблемы и перспективы возможного использования водорода в  
теплоэнергетике Кузбасса  
(тема)

ОБУЧАЮЩИЙСЯ \_\_\_\_\_  
(подпись)

Фадеев Владислав Валерьевич  
(фамилия, имя, отчество)

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

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

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

Директор института  
металлургии и  
материаловедения д.т.н., профессор \_\_\_\_\_ Галевский  
Г.В. \_\_\_\_\_  
(уч. степень, звание) (подпись) (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  
Е.Н. Темлянцева  
(подпись)  
«12» февраля 2020 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выпускную квалификационную работу**  
обучающегося Фадеева Владислава Валерьевича  
(фамилия, имя, отчество)  
группы МТ-16

Тема работы: **Проблемы и перспективы возможного использования водорода в теплоэнергетике Кузбасса**

Утверждена приказом от 12.02.2020 г. № 124-об

Характер работы: аналитическая работа.

Срок 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 котлонадзора.

Цель работы: провести анализ проблем и перспектив возможного использования водорода в теплоэнергетике Кузбасса.

Содержание работы: Введение; Использование альтернативных источников энергии в энергетике; Энергия геотермальных источников; Малая гидроэнергетика; Ветроэнергетика; Солнечная энергетика; Выводы по разделу 1; Способы получения водорода; Производство водорода из природных топлив; Плазмохимический способ получения водорода; Электролитическое разложение воды; Термохимическое разложение воды; Получение водорода из биомассы; Выводы по разделу 2; Способы хранения и транспортировки водорода; Хранение газообразного водорода; Хранение жидкого водорода; Хранение и транспортировка в химически связанном состоянии; Система хранения водорода в гидридах; Криоадсорбционное хранение водорода; Выводы по разделу 3; Использование водорода в энергетике и транспорте; ДВС на водороде; Топливные элементы; История развития; Принцип работы; Классификация ТЭ; Перспективы использования водорода в угольных регионах; Тепловые циклы с применением водорода; Применение пароперегревателей

водородно-кислородного типа; Заключение; список использованной литературы.

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

Перечень графического материала: Тема выпускной квалификационной работы; Цели и задачи выпускной квалификационной работы; Ратификация Парижского соглашения; Альтернативные источники энергии; Способы получения водорода; Структура мирового производства водорода; Способы хранения водорода; Области применения водорода; Тепловые циклы с применением водорода; Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа; Заключение.

Консультанты по работе с указанием относящихся к ним разделов работы

---

Нормоконтроль: Михайличенко Т.А.

---

Руководитель \_\_\_\_\_  
(подпись)

Задание к исполнению принял \_\_\_\_\_

«12» февраля 2020 г.



## АННОТАЦИЯ

Фадеев В.В. Проблемы и перспективы возможного использования водорода в теплоэнергетике Кузбасса: выпускная квалификационная работа по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» – Новокузнецк, 2020. – 69с., табл. 1, ил. 19, источников 29, презентация – 22 слайдов.

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы разбирались способы альтернативного производства электроэнергии. Приводилось описание методов и технологий получения водорода, в целях дальнейшего его использования в промышленности и энергетике. Дана характеристика каждого из методов. Были проанализированы тепловые циклы с применением водорода, сжигание которого осуществляется в специальной камере сгорания. Использование такой камеры сгорания возможно в качестве внешнего пароперегревателя для гибридной ТЭС, что позволяет увеличить начальные параметры пара, а вследствие этого и увеличить КПД цикла. Также рассмотрена работа пара в гибридном цикле в различном диапазоне температур.

В ходе исследования было выявлено, что водородный промежуточный перегрев пара на этапе освоения гибридных энергоблоков является наиболее целесообразным решением, поскольку позволяет увеличить электрическую мощность блока практически вдвое при одновременном увеличении КПД паротурбинной установки до 61 %, что находится на уровне лучших образцов парогазовых установок.

Результаты исследования могут быть использованы на ТЭС для повышения энергоэффективности.

Исполнитель

\_\_\_\_\_

(подпись)

Фадеев В.В.

## ANNOTATION

Fadeev V. V. Problems and prospects of the possible use of hydrogen in the power system of the Kuzbass: final qualifying work in the direction of training 13.03.01 "thermal Engineering" – Novokuznetsk, 2020. – 69 pages, 1 tables, 19 figures, 29 literature source, presentation – 22 pages.

In the process of completing the final qualification work, methods of alternative electricity production were understood. The description of methods and technologies for producing hydrogen, with a view to its further use in industry and energy. The characteristic of each method is given. Thermal cycles using hydrogen were analyzed, the combustion of which is carried out in a special combustion chamber. The use of such a combustion chamber is possible as an external superheater for a hybrid thermal power plant, which allows to increase the initial steam parameters, and consequently increase the efficiency of the cycle. The work of steam in a hybrid cycle in a different temperature range is also considered.

As a result of the study, we found that the hydrogen intermediate steam re-heating at the stage of development of hybrid power units is the most purposeful solution, since it allows to increase the electric power of the unit almost twice while increasing the efficiency of the steam turbine unit to 61 %, which is at the level of the best samples of.

The results of the study can be used at thermal power plants to improve energy efficiency.

The executor

\_\_\_\_\_  
(signature)

Fadeev V.V.

## Список сокращений

### Сокращения:

ВЭУ – Ветроэнергетическая установка

ОС – Окружающая среда

ГТУ – Газотурбинная установка.

КС – Камера сгорания.

ТПЭ – Твёрдополимерный электролит.

ПКМ – Паровая конверсия метана.

ТЭ – Топливный элемент.

КСВД – Камера сгорания высокого давления.

КСНД – Камера сгорания низкого давления.

### Обозначения:

$\eta_{\text{КС}}$  – КПД камеры сгорания.

$V_{\text{H}_2}$  – Расход водорода, кг/с.

$Q$  – Теплота, Дж/кг.

$G_{\text{шт}}$  – Расход пара через пароперегреватель котла, поступающего в камеру сгорания, кг/с.

$Q_{\text{p}}^{\text{B}}$  – высшая теплота сгорания водорода, кДж/кг

$t_{\text{шт}}$  – температура перегрева пара, °С

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	10
1 Использование альтернативных источники энергии в энергетике .....	12
1.1 Энергия геотермальных источников .....	12
1.2 Малая гидроэнергетика .....	14
1.3 Ветроэнергетика .....	16
1.4 Солнечная энергетика .....	18
1.5 Выводы по разделу 1 .....	20
2 Способы получения водорода .....	21
2.1 Производство водорода из природных топлив .....	23
2.1.1 Паровая конверсия метана .....	23
2.1.2 Газификация угля .....	25
2.2 Плазмохимический способ получения водорода .....	26
2.3 Электролитическое разложение воды .....	27
2.4 Термохимическое разложение воды .....	29
2.5 Получение водорода из биомассы .....	29
2.6 Выводы по разделу 2 .....	30
3 Способы хранения и транспортировки водорода .....	32
3.1 Хранение газообразного водорода .....	33
3.2 Хранение жидкого водорода .....	35
3.3 Хранение и транспортировка водорода в химически связанном состоянии ..	36
3.4 Система хранения водорода в гидридах .....	37
3.5 Криоадсорбционное хранение водорода .....	38
3.6 Выводы по разделу 3 .....	39



4	Использование водорода в энергетике и транспорте .....	40
4.1	ДВС на водороде .....	41
4.2	Топливные элементы .....	42
4.2.1	История развития.....	42
4.2.2	Принцип работы .....	42
4.2.3	Классификация ТЭ .....	44
4.2.4	Области применения ТЭ .....	46
5	Перспективы использования водорода в угольных регионах .....	49
5.1	Тепловые циклы с применением водорода.....	49
5.2	Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа.....	53
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	66
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	67

## ВВЕДЕНИЕ

Человечество давно объединилось для совместной борьбы с экологической обстановкой в мире. Для этого 1997 году был подписан Киотский протокол (международное соглашение о сокращении выбросов парниковых газов в атмосферу) для сдерживания глобального потепления. А в декабре 2015 года на смену Киотскому протоколу пришло Парижское соглашение, документ подписали 175 стран, в том числе Россия. В сентябре 2019 года правительство России объявило, что премьер-министр Д.А. Медведев подписал Постановление, в соответствии с которым было принято Парижское соглашение. Это решение имеет важное значение для энергетики Кузбасса поскольку, в области, в основном, преобладает угольная энергетика, а значит, выбросов  $CO_2$  и других парниковых газов не избежать. Следовательно, предприятия будут страдать от больших платежей узаконенных Парижским соглашением, им будет необходимо адаптироваться к такой ситуации. Это, наоборот, подтолкнет промышленное развитие к дальнейшему прогрессу, к наиболее лучшему использованию ресурсов. Таким образом, может решиться глобальная проблема истощаемости запасов ископаемого сырья, а также экологическая опасность, связанная с загрязнением воздушного пространства, загрязнение водного бассейна сточными и замасленными водами, тепловое загрязнение, шумовое загрязнение и электромагнитное загрязнение.

Помимо модернизации придется развивать альтернативные источники энергии (возобновляемые), такие как ветро-, гелио- и гидроэнергетика для обеспечения собственных энергетических нужд. Одной из наиболее перспективных идей является водородная энергетика. Экологическая безопасность водорода, в сравнении с иными традиционными источниками получения энергии, ни у кого не вызывает сомнений: продукт сгорания водорода –  $H_2O$  в виде пара, при этом он совершенно нетоксичен.

**Цель работы:** Проанализировать основные достоинства и ограничения, связанные с внедрением водорода в качестве альтернативного источника энергии.

### **Задачи работы:**

1. Проанализировать достоинства и недостатки альтернативных источников энергии.
2. Описать основные способы получения водорода, которые могут быть использованы в энергетике. Выполнить сравнительный анализ технологий использования водорода и его хранения. Описать основные химические реакции при получении водорода.
3. Рассмотреть схему и принцип работы электрической станции, использующей водород. Определить эффективность работы электростанции.

# **1 Использование альтернативных источники энергии в энергетике**

Альтернативная энергетика – это прежде всего альтернатива энергетике, основанной на сжигании ископаемого топлива на ТЭС. Данная энергетика основывается на использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Представляет интерес из-за выгоды в использования ВИЭ и минимальными экологическими рисками. Из-за того, что ВИЭ не только возобновляемы, но еще экологичны и безопасны, некоторые развитые страны мира взяли курс на ускоренное развитие альтернативной энергетике. Во многих странах к 2020 году долю возобновляемых источников энергии предполагается увеличить до 20% и более. В России установленную мощность планируется увеличить с 2,2 ГВт в 2010 до 22 ГВт в 2020.

Помимо всего этого избыточную энергию, полученную за счет альтернативной генерации можно заряжать в аккумуляторы и направлять эту энергию на получение водорода тем самым водород будет полностью экологически чистым топливом.

К основным видам альтернативных источников энергии относят геотермальную энергию, энергию рек, ветра, солнца [3].

## **1.1 Энергия геотермальных источников**

Геотермальная энергетика – это в первую очередь, направление энергетике, которое основывается на использовании тепловой энергии недр Земли для производства электрической энергии на геотермальных электростанциях или непосредственно для горячего водоснабжения или отопления.

В 1904 году в Италии впервые с помощью пара геотермального происхождения осуществилась выработка электрической энергии на паросиловой установке. На сегодняшний момент ГеоТЭС в Италии имеет мощность около 400

МВт. В начале 21 века по всему миру работало 233 ГеоТЭС с суммарной мощностью 5136 МВт, в добавок к этому ведется строительство еще 117 станций общей мощностью 2017 МВт.

Главное достоинство геотермальной энергии заключается в возможности ее использования в виде выделяющейся из недр Земли воды или пароводяной смеси (в зависимости от их температуры) для нужд горячего водо- и теплоснабжения, а также выработки электроэнергии либо комбинированной выработки электроэнергии, горячего водоснабжения и теплоснабжения. Также к достоинству относится ее практическая неиссякаемость, она не зависит от условий окружающей среды, времени суток и года. А из этого следует, что применение геотермальной энергии с совместным применением других экологически чистых ВИЭ может внести существенный вклад в решение следующих неотложных проблем:

- Обеспечение стабильного теплоснабжения и электроснабжения населения в тех регионах нашей планеты, где централизованное энергоснабжение обходится слишком дорого или отсутствует (например, в России на Камчатке, в районах Крайнего Севера и т.п.).

- Обеспечение гарантированного минимума энергоснабжения населения в зонах неустойчивого централизованного энергоснабжения из-за дефицита электроэнергии в энергосистемах, предотвращение ущерба от аварийных и ограничительных отключений и т.п.

- Уменьшение вредных выбросов от энергоустановок в различных регионах со сложной экологической обстановкой.

Необходимость обратной закачки отработанной воды в подземный водоносный горизонт является главным недостатком геотермальной энергии. Помимо этого, еще одним недостатком этой энергии является высокая минерализация термальных вод большинства месторождений и наличие в воде токсичных соединений и металлов, что в большинстве случаев исключает возможность сброса этих вод в расположенные на поверхности природные водные системы. Приведенные выше недостатки геотермальной энергии приводят к тому, что для практического применения теплоты геотермальных вод необходимы

колоссальные капитальные затраты на обратную закачку отработанной геотермальной воды, бурение скважин, а также на создание коррозионно-стойкого теплотехнического оборудования [4, 5].

## **1.2 Малая гидроэнергетика**

В России к малой гидроэнергетике относят бесплотинные гидроэлектростанции (ГЭС), мощность которых не превышает 30 МВт, а мощность единичного гидроагрегата составляет менее 10 МВт. Такие ГЭС, в свою очередь, делятся на: микро-ГЭС (мощностью от 1,5 до 100 кВт); малые ГЭС (МГЭС) (мощностью от 100 кВт до 30 МВт).

Это достаточно интересная для инвестиций отрасль. С одной стороны, на небольших, микро- или нано-гидроэлектростанциях сочетаются преимущества большой ГЭС, а с другой - возможность децентрализованной подачи энергии. Они имеют меньше недостатков по сравнению с крупными ГЭС, а именно: дорогие передачи, проблемы, связанные с негативным воздействием на окружающую среду. Помимо этого, децентрализованное использование электроэнергии за счет выработки малой гидроэнергетики способствует развитию этого региона, главным образом, на основе самодостаточности и использования местных ресурсов.

Большинство из них не имеют больших водохранилищ. Они вырабатывают электроэнергию, если естественного уровня воды в реке достаточно, но в периоды высыхания реки или снижения расхода ниже определенной величины производство электроэнергии приостанавливается.

Технико-экономический потенциал малой гидроэнергетики в России превышает потенциал возобновляемых источников энергии, таких как ветер, солнце и биомасса в сочетании. В настоящее время он оценивается в 60 миллиардов кВт\*ч в год. Но этот потенциал крайне слабый: всего 1%. Не так давно, в 1950-х и 1960-х годах, работало несколько тысяч МГЭС. Сейчас - всего несколько сотен - результаты искажений в ценовой политике и недостаточного внимания к совершенствованию конструкции оборудования, использованию более

совершенных материалов и технологий [4].

Одним из основных преимуществ малых гидроэнергетических объектов является экологическая безопасность. В процессе их строительства и использования вредные воздействия на ОС минимальны, что не влияет на свойства и качество воды. Вода также может использоваться в рыбном хозяйстве и в качестве источников водоснабжения для населения. Однако, в дополнение к этому, микро- и малые гидроэлектростанции имеют много преимуществ. Современные станции просты в дизайне и полностью автоматизированы, т. е. не требуют присутствия человека во время работы. Произведенный ими электрический ток соответствует требованиям ГОСТ для частоты и напряжения, и станции могут работать как в автономном режиме, так и в составе энергосистемы. И общая продолжительность жизни станции составляет не менее 40 лет (не менее 5 лет до капитального ремонта). И самое главное – небольшие энергетические объекты не требуют организации крупных водохранилищ с соответствующим затоплением территории и колоссальным материальным ущербом.

К факторам, препятствующим развитию малой гидроэнергетики в России, относят, во-первых, потенциальные пользователи мало осведомлены о преимуществах использования малых гидроэнергетических объектов; следующая проблема заключается в недостаточных знаниях гидрологического режима и объема стока малых водотоков; низкое качество существующих методов, рекомендаций и СНиП, что является причиной серьезных ошибок в расчетах; неразработанные методы оценки и прогнозирования возможного воздействия на окружающую среду и хозяйственную деятельность; слабая производственная и ремонтная база предприятий, производящих гидроэнергетическое оборудование для ГЭС, а массовое строительство малых гидроэлектростанций возможно только в случае массового производства оборудования, отказа от индивидуального проектирования и качественно нового подхода к надежности и стоимости оборудования - по сравнению со старыми объектами, выведенными из эксплуатации [5].

Многие из малых ГЭС не всегда обеспечивают гарантированную выработку электроэнергии, являясь сезонными электростанциями. Зимой отпуск энергии резко

падает, снежный покров и льдообразование, а также летняя низкая вода и высыхание рек могут вообще приостановить их работу. Сезонность малых ГЭС требует дублирования источников энергии, многие из них могут привести к потере надежности энергоснабжения. Поэтому во многих областях способность малых ГЭС к выработке рассматривается не как основная, а как дублирующая.

Водохранилища малых ГЭС, особенно горных и предгорных, очень чувствительны к заиливанию и связанными с этими проблемами повышения уровня воды, затопления, снижения гидроэнергетического потенциала рек и выработки электроэнергии. Известно, например, что водохранилище Земонечальской ГЭС на реке Кура за 5 лет засохло на 60%.

На сегодняшний день существует много различных типов малых ГЭС, причём некоторые из них - это практически готовые решения, которые легко адаптировать под различные климатические условия.

### **1.3 Ветроэнергетика**

В последние годы энергия ветра стала действительно быстро развивающейся отраслью современной «чистой» энергетики. Средства преобразования кинетической энергии потока ветра в механическую, тепловую и электрическую формы энергии занимают все большую долю в мировом энергетическом секторе.

Запасы этой энергии неисчерпаемы, поскольку ветер возникает из-за действия солнца, а уровень вредных выбросов с текущим поколением установок практически равен нулю. Энергетические запасы ветра превышают количество гидроресурсов всех рек Земли в 100 раз. На высотах 7-14 км от поверхности земного шара его мощность в 10-15 раз выше, что открывает широкие возможности в области ветроэнергетики. Высотные ветра постоянны и неизменны в течение года.

По данным Всемирного совета по ветроэнергетике, общая установленная мощность ветровых электростанций к началу 2015 года уже составила 369 ГВт. По данным BP Statistical Review of World Energy 2013, выработка электроэнергии за счёт ветра составила 521,3 миллиарда киловатт-часов, что соответствует 2,3%



мирового производства электроэнергии. На данный момент тройка стран - лидеров по установленной мощности ВЭУ выглядит так: Китай, США, Германия.

В пользу развития технологий ВЭУ играет 30-летний путь развития отрасли. В настоящее время используются современные дешевые и эффективные материалы, а также увеличивается мощность ветроэнергетических установок. Все сводится к тому, что издержки производства снижаются, а конкурентоспособность ветроэнергетики возрастает.

Очевидным плюсом ветровой энергии является фактическая бесконечность ресурсов: до тех пор, пока у планеты есть атмосфера и солнечное освещение, будет движение воздушных масс, которые могут быть использованы для выработки энергии.

Еще один несомненный плюс: экологичность. Ветровые фермы не выделяют вредных веществ, не загрязняют окружающую среду. К сожалению, их до сих пор нельзя назвать полностью экологически чистыми, поскольку ветряная электростанция довольно шумная, в связи с чем в Европе законодательно установлена норма шума для дневного и ночного времени, которую не должны превышать ветровые электростанции. Кроме того, работа ветряных электростанций должна быть прекращена во время сезонного полета птиц (в этом случае в Европе также существует законодательное ограничение). В России таких ограничений нет, но ветряные электростанции не располагаются вблизи жилых зданий для того, чтобы население не испытывало дискомфорта.

Наряду с таким плюсом, как неисчерпаемость источника энергии, есть минус: эффективность ветряной электростанции зависит от времени года, времени суток, погодных условий и географического положения. К сожалению, скорость ветра изменяется в зависимости от всех этих параметров. Скорость ветра же, в свою очередь напрямую влияет на количество электроэнергии, вырабатываемой ВЭС. Поэтому ветряные электростанции должны использоваться обычно вместе с другими источниками энергии, а также использовать батареи, которые будут потреблять избыточную энергию в ветреные дни и отдавать во время простоя.

Помимо этого, преимуществом является быстрое возведение ветропарка: даже

для промышленной установки требуется не более двух недель, учитывая время, затрачиваемое на подготовку участка. Если говорить о ветрогенераторе для бытовых нужд, то его установка и вовсе занимает всего пару часов.

К минусам можно отнести высокую стоимость, однако этот фактор в скором времени можно будет исключить. На сегодняшний день цена уже существенно ниже, чем несколько лет назад. Например, в 2017 году компания Siemens Gamesa выиграла тендер на строительство 1 ГВт новых ветровых мощностей в Турции. При этом, по результатам конкурентного отбора цена киловатт - часа снизилась до рекордно низкого уровня. Он составил – 0,0348 доллара. В переводе по текущему курсу, это чуть больше 2 рублей.

Россия обладает внушительным потенциалом ветровых ресурсов, которые, что характерно, расположены как раз в тех районах, где отсутствует централизованное энергоснабжение. К этим районам в первую очередь относятся Арктическое побережье, острова и берега Берингова и Охотского морей. В дополнение к перспективным “ветровым” регионам относятся: Архангельская, Астраханская, Волгоградская, Калининградская, Камчатская, Ленинградская, Магаданская, Мурманская, Новосибирская, Ростовская, Сахалинская, Тюменская области; Пермский Краснодарский, Приморский, Хабаровский края, а также Дагестан, Калмыкия, Карелия, Коми, Таймырский автономный округ, Хакасия, Чукотка, Якутия и др.

В целом, ветроэнергетику можно назвать достаточно перспективной отраслью. В ней есть свои характерные проблемы, однако практически все они на сегодняшний день решаемы [6].

## **1.4 Солнечная энергетика**

Одним из наиболее перспективных направлений развития альтернативной энергетики является солнечная энергия, с ее дальнейшим преобразованием в электричество и тепло, необходимые человеку.

Основным преимуществом солнечного тепла и света является его

доступность. В любой точке мира можно получить эту бесплатную, экологически чистую и возобновляемую энергию. Разность плотности солнечного света в разных климатических зонах и регионах различается не более, чем в два раза. Поэтому такое альтернативное направление энергии набирает популярность не только на уровнях государств, но и среди населения. Общая площадь солнечных установок, расположенных в разных странах, сейчас занимает более 120 миллионов квадратных метров. И объем солнечной энергии будет расширяться с каждым годом.

Энергетический потенциал солнца на нашей планете огромен. Он составляет порядка 700 квадрильонов ( $7 \cdot 10^{17}$ ) кВт·ч в год. В данный момент на мировом рынке продаётся и покупается около 85 триллионов ( $8,5 \cdot 10^{13}$ ) кВт·ч электроэнергии в год. Это означает, что даже одного процента солнечной энергии хватит для того, чтобы с запасом покрыть мировые потребности в электроэнергии. Поэтому необходимо уделять внимание и развивать эту отрасль, ведь в перспективе она позволит получать всю необходимую человечеству электроэнергию практически без эксплуатационных затрат.

По принципу получения энергии гелиоэнергетику можно разделить на два основных вида:

1) Солнечные коллекторы для нагрева воды – самое распространённое оборудование в мире, позволяющее использовать солнечное тепло для теплоносителя. Успешно применяется как в повседневной жизни, так и в промышленности. Такое устройство легко справляется с нагревом воды для бытовых нужд или обеспечивает качественное альтернативное отопление в холодное время года.

2) Фотоэлектрические преобразователи - оборудование для выработки электроэнергии путем поглощения и преобразования солнечной радиации. Первоначально эта технология использовалась в космической отрасли [7,8].

Достоинства солнечной энергетики:

– бесконечность ресурса: до тех пор, пока светит солнца, энергия неисчерпаема;

- экологичность, получение энергии не сопровождается выбросом вредных веществ в атмосферу и грунт;
- бесшумное производство: это позволяет устанавливать станции непосредственно у мест проживания людей;
- возможность установки в любой точке земного шара;
- быстрый монтаж станции: достаточно просто приобрести все необходимые элементы, установка не требует строительных работ и крупных затрат;
- большая степень автоматизации производственного процесса, в связи с чем нет нужды в специалистах для обслуживания.

Недостатки:

- на выработку электроэнергии влияет большое количество факторов, таких, как погодные условия, время суток, время года;
- невозможность получения энергии в ночное время суток;
- определённые сложности с обслуживанием станции;
- высокая стоимость оборудования.

## **1.5 Выводы по разделу 1**

Помимо вышеперечисленных ВИЭ есть и другие менее перспективные, такие как биоэнергетика, волновая и приливная энергетика.

Термин «водородная энергетика» обрел популярность в мире науки и техники относительно недавно. Стали разрабатываться программы по развитию этой отрасли. В 1974 году была основана Международная ассоциация по водородной энергетике (МАВЭ). Эта организация начала издавать международный журнал "The International Journal of Hydrogen Energy", стали проводиться всемирные конференции по водородной энергетике с периодичностью раз в два года [11].

## 2 Способы получения водорода

На данный момент известны несколько способов получения водорода, которые условно делятся на:

- физические;
- электрохимические;
- химические.

К физическим методам относят процессы, в которых первичное сырье (коксовый газ или газ, получаемый при пиролизе бутадиена) уже содержит свободный водород, и требуется только каким-либо другим способом отделить его от остальных компонентов. В основном, этими газами являются нефтезаводские газы, в состав которых входит смесь водорода и углеводородов, извлечение водорода осуществляют за счет глубокого охлаждения, абсорбции или адсорбции, диффузии через мембраны.

В электрохимических методах выделение водорода из его химических соединений осуществляется разложением под действием электрического тока.

Самыми распространенными методами являются химические методы получения водорода. В особенности их применяют в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. В основном применяются методы газификации и конверсии (неполное окисление горючих топлив), а также разложение горючих ископаемых под действием высоких температур.

Для получения водорода в данный момент есть множество различных путей из ряда известных источников, как показано на рисунке 2.1.

В качестве источника для получения  $H_2$  используют природное топливо (уголь, древесина, метан, техногенные горючие газы, нефтепродукты). Далее под действием паров воды или воздуха с топливом образуется синтез-газ, из синтез-газа выделяют водород. Другой источник – биомасса, из которой получают биогаз, а затем – синтез-газ. Итогом является образование  $CO_2$ ,  $H_2$  и  $CO$ .

Следующим этапом осуществляют каталитическую очистку или электрохимическую конверсию. В конце всех преобразований получают чистый водород. Водород можно получать также электролизом воды и плазмохимией. Но на все это необходимо затрачивать электроэнергию. Для получения электрической энергии выгоднее всего использовать энергию возобновляемых источников. К основным методам генерации водорода в промышленности относят: паровую конверсию метана; газификацию угля; плазмохимический способ получения водорода; электролитическое разложение воды; термохимическое разложение воды; получение водорода из биомассы [12-14].

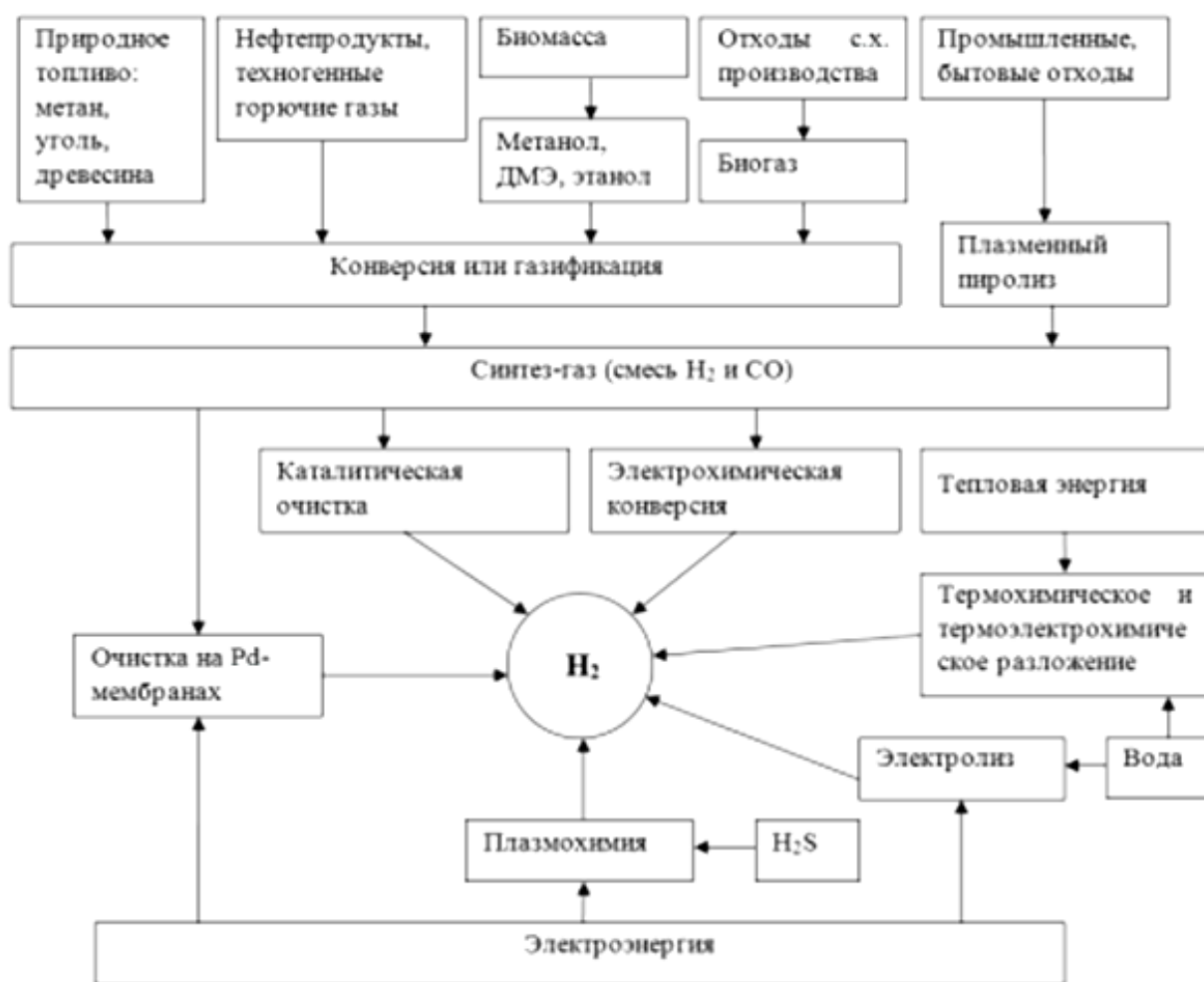


Рисунок 2.1 – Источники и пути получения водорода

## 2.1 Производство водорода из природных топлив

В наши дни наиболее распространенными методы генерации водорода является его производство из природных органических топлив.

По данным рисунка 2.2, из природных топлив получают около 85 % производимого в мире водорода, это связано с хорошей эффективностью процесса, этот способ реализован на уровне крупномасштабного производства, имеет низкую себестоимость по сравнению с другими методами и у этого метода отлажена инфраструктура транспортировки первичного сырья.

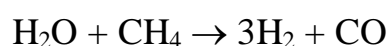


Рисунок 2.2 – Структура мирового производства водорода

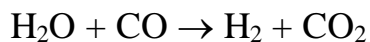
### 2.1.1 Паровая конверсия метана

Конверсией газов называется их рециклинг с целью изменения состава газовой смеси. Конвертируют, как правило метан с целью получения водорода. На сегодняшний день методом ПКМ Получают большую часть водорода чем любыми другими способами.

Процесс паровой конверсии метана протекает в печах реформерах при подводе тепла при температуре от 750 до 850 °С, по такой схеме:



В этой реакции окисление метана происходит не полностью. В качестве побочного продукта образуется монооксид углерода, который в последствии можно конвертировать в  $H_2$  и диоксид углерода по средствам паров при температуре 250 °С:



Вторая реакция дает дополнительный выход технологического водорода. С целью экономии топлива для проведения реакции и снижения выбросов в окружающую среду таких веществ как  $CO_2$ , монооксида углерода и не полностью вступившего в реакцию метана, таких странах как Россия, США и Японии набирает обороты разработка технологий ПКМ с подводом тепла от высокотемпературного гелиевого реактора (ВТГР). Модель такого комплекса включает в себя: ядерную часть, суть которой заключается в выработки синтез-газа из которого непосредственно осуществляет выработку водорода [15].

Наряду с природным газом на нефтеперерабатывающих предприятиях для ПКМ можно использовать нефтезаводские газы, любые фракции нефтепродуктов и их остатки.

Помимо паровой конверсии метана есть еще и парокислородная конверсия. Различие заключается в том, что помимо пара в активную зону реактора подают еще и кислород. Минусом является удорожание установки на 10%, а плюсом то, что метан окисляется кислородом.

Парокислородная конверсия имеет преимущество перед ПКМ, которое заключается в отсутствии теплообменника для передачи тепла и использовании более дешёвого реактора.

Подведя итог можно сказать, что основными преимуществами метода ПКМ 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 рубежом.



## 2.1.2 Газификация угля

Газификация угля – старейший способ получения водорода. Первый водород полученный таким способом был в Великобритании в 40-х годах 19-ого века. На сегодняшний день в Российской Федерации водород таким образом получают лишь в черте Ленинградской области на горючих сланцах.

Получение  $H_2$  из угля в какой-то мере связано с термическим разложением воды, отличие заключается в том, что уголь используют как энергоресурс, и еще он выступает в качестве химического реагента. Реакция проходит при высокотемпературном воздействии угля и воды.

Синтез-газ может быть получен из биологической массы и бытовых промышленных отходов предприятий – это в какой-то мере может повлиять на экологическую обстановку. При термохимическом методе биологическую массу или бытовые отходы нагревают до температуры  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  и в конечном итоге получают водород, метан и монооксид углерода.

Применив к синтез-газу методы глубокого охлаждения, электрохимической конверсии, абсорбции и адсорбции, диффузией через мембраны можно выделить водород.

К недостаткам газификации можно отнести следующее: в ходе процесса выделяется большое количество углекислого газа, для утилизации которого необходимо затрачивать большое количество денежных средств, за счет этого повышается себестоимость процесса, а, значит, и конечная цена на водород; этот метод плохо адаптируется на установках, имеющих малую производительность, но хорошо подходит для крупномасштабного производства. Наличие в полученном продукте (водороде) примесей диоксида и монооксида углерода требует денежных затрат на его очистку. Исходя из этих причин, генерация водорода по средствам газификации угля в сложившейся ситуации может стать переходным мостом от сложившейся инфраструктуры энергорынка к водородной экономике будущего. Но в конечном итоге этот метод будет вытеснен другими более перспективными методами. Можно отметить, что генерация водородного топлива из ископаемого

сырья за счет газификации с экологической точки зрения не имеет сильного различия от непосредственного сжигания природного топлива на угольных ТЭС. За счет горения углеродного топлива в камере сгорания начинается выделение летучих и в конечном итоге происходит их выброс через дымовую трубу в атмосферу. В процессе газификации получаются практически те же выбросы при взаимодействии топлива с окислителем.

Поэтому основным направлением такой технологии производства водорода является сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу. В качестве примера можно привести последние разработки по паровой конверсии угля.

## **2.2 Плазмохимический способ получения водорода**

Метод плазмохимии использует химическую активность ионизованного газа – плазмы. Газы разных по составу веществ подводят в плазмотроны, где под действием электромагнитного поля высокой интенсивности создаются электрические разряды, образуя плазму. От энергии электрического поля идет передача энергии ее электронам, затем от электронов к нейтральным молекулам, которые в свою очередь переходят в возбужденное, химически активное состояние.

Перспективными являются плазмохимические системы, где электроны греются электромагнитным полем до температуры около 15000 °С. Они избирательно передают энергию молекулам, а те, в свою очередь, путем распада, образуют нужные химические соединения. При этом, несмотря на такие высокие температуры, температура газа остается равной примерно 300 °С. Объемный характер протекающих в них процессов является главным преимуществом описываемых систем. Высокие скорости химических превращений в газовой фазе позволяют достичь огромной производительности плазмотронов на единицу мощности применяемых плазмотронов.

Было доказано, что метод прямого плазмохимического разложения паров воды на  $O_2$  и  $H_2$  обладает малой эффективностью. Идеальным плазмохимическим объектом оказался диоксид углерода. Коэффициент полезного действия при его

разложении на монооксид углерода и кислород превышает 80 %, т.е. почти вся энергия, которая вкладывается разряд, направляется на осуществление полезной работы. Приняв это во внимание, можно организовать цикл производства  $H_2$  из двух стадий: на первой стадии осуществить плазмохимическое разложение диоксида углерода; на второй – выполнить давно известную реакцию взаимодействия монооксида углерода с водяным паром. В конечном итоге образуется водород и исходное вещество – углекислый газ. Таким образом, углекислый газ будет выступать в роль физического катализатора для получения водорода из воды и, не расходуясь, разрешит проблемы, возникающие при разложении водяного пара. Исходя из этого, будет сформирован плазмохимический цикл, в котором тратится только вода, а углекислый газ циркулирует в замкнутом цикле. Производительность такой плазмохимической установки может превзойти в десятки тысяч раз эффективность электролизеров воды, но себестоимость получаемого водорода будет примерно такой же, что и у электролизеров.

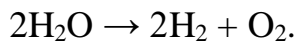
Многие проблемы, связанные с использованием газообразного топлива, сопровождаются выбросами сероводорода или продуктов его переработки в атмосферу. Для избежания выбросов серы сероводород окисляют кислородом воздуха по методу Клауса и получают при этом серу, а водород связывается с кислородом.

Главным недостатком этого процесса является извлечение серы из газа и переход водорода в воду. Однако ведутся работы для получения двух продуктов, таких как водород и конденсированная сера.

### **2.3 Электролитическое разложение воды**

В 1800 году Вильяму Николсону впервые удалось провести электролиз воды. А примерно через 100 лет этот метод стал основным промышленным методом получения  $H_2$ , и на сегодняшний день его КПД достигает 90% и более. По своей сути электролиз воды – это цепочка физико-химических процессов, в результате которых в электролизере электрический ток расщепляет молекулы воды на две

молекулы водорода и молекулу кислорода. Иными словами, электрический ток пропускают через электролит, в котором находятся два электрода (анод и катод), в результате чего кислород концентрируется на положительном аноде, а водород на отрицательно заряженном катоде. Реакция выглядит так:



Из приведенной выше информации можно сделать вывод, что в процессе электролиза водорода по объему получается в два раза больше, чем кислорода.

Одним из самых известных и промышленно освоенных методов является производство водорода электролизом водных растворов с использованием электроэнергии от каких-либо источников. Он имеет ряд следующих достоинств: чистота полученного водорода таким методом достигает интервала от 99,6 % до 99,9 %. Процесс может быть непрерывным и имеет возможность быть полностью автоматизированным, также этот процесс технологически прост, в ходе его можно получать побочные продукты (тяжелая вода и кислород). Тяжелая вода используется в атомных реакторах и может являться сырьем для получения дейтерия, а кислород используется в различных технологических процессах в промышленности. Поскольку запас воды можно считать безграничным, то и запас сырья для получения водорода тоже. И, самое главное, процесс может быть полностью безвредным для окружающей среды при использовании возобновляемых источников энергии: солнечных преобразователей, ветроэнергоустановок, геотермальных подземных источников, гидроэнергетикой и другими видами альтернативной энергетики [16-18].

К недостаткам можно отнести потерю тепла в ходе реакции, а самым главным недостатком является большие затраты электроэнергии для протекания процесса, ведь именно от этого зависит стоимость получаемого топлива. Но уже сейчас ведутся работы по снижению энергоемкости процесса для увеличения конкурентоспособности этого метода.

Окончательно можно сделать вывод, что получение водорода в промышленном масштабе таким методом в недалеком будущем может занять лидирующую позицию среди других методов.

## 2.4 Термохимическое разложение воды

Еще одним способом получения водорода из воды является прямой термолиз, суть которого заключена в разложении воды на  $H_2$  и  $O_2$  при температуре выше  $2500^\circ C$ . Создать такую температуру в технологических агрегатах ученым еще не удалось. Даже агрегаты, работающие на атомной энергии, не могут выдать такую температуру (в высокотемпературных реакторах достигается температура на сегодняшний момент около  $1000^\circ C$ ). Поэтому исследователи стремятся разработать процессы, протекающие в несколько стадий, что позволило бы вырабатывать водород в температурных интервалах ниже  $1000^\circ C$ . Основным нюансом этого метода является трудность предотвратить обратную реакцию рекомбинации паров воды.

Термохимическое разложение воды происходит с использованием термохимических реакций при участии химически активных соединений йода или брома. Циклы состоят из нескольких химических стадий, протекающих с использованием реагентов, которые затем регенерируются и возвращаются в цикл.

Термохимические циклы обычно являются многоступенчатыми, а установки с такими циклами проблемны в эксплуатации. Помимо всего этого, затраты на производства водорода методом прямого термолиза в полтора, а то и в два раза дороже, чем на водород, произведенный посредством электролиза.

Комбинированные термохимические и электрохимические методы, наиболее эффективны и просты в использовании, они включают одну или несколько электрохимических реакций.

## 2.5 Получение водорода из биомассы

Водород из биомассы можно получить термохимическим или биохимическим способом.

При термохимическом методе биологическую массу (древесные отходы) нагревают до температуры  $800^\circ C$  без подвода кислорода. Следует отметить, что

газификация угля протекает при более высокой температуре. В результате процесса выделяется водород, монооксид углерода и метан. Себестоимость процесса за килограмм продукта (водорода) составляет примерно 370 руб./кг. В будущем прогнозируется снижение себестоимости до 122 руб./кг.

Водород в биохимическом процессе вырабатывается за счет различных бактерий, например, *Rhodobacter sphaeroides* [19-21].

С помощью применения различных ферментов возможно ускорить производство водорода из целлюлозы и крахмала, которые содержатся в биологической массе. Процесс проходит при температуре порядка 30 °С и атмосферном давлении. Себестоимость такого производства водорода составляет примерно 122 руб./кг.

## **2.6 Выводы по разделу 2**

Почему же такое перспективное направление как водородная энергетика до сих пор не распространена и повсеместно не используется? Это связано со множеством факторов, связанных с разработкой эффективных, экономически выгодных и безопасных процессов и оборудования, обеспечивающих производство водорода и его применение в промышленности. Соответственно, работы в области водородных технологий развиваются преимущественно по трем направлениям: производство водорода, хранение и транспортировка водорода, использование водорода [13].

Если мы используем электроэнергию, мы сначала ее откуда-то получаем. Электроэнергия сегодня получается самыми разными способами. В малоразвитых странах электроэнергия в основном получается за счет сжигания угля на различного рода ТЭС. Тем самым полученной электроэнергией мы загрязняем окружающую среду. То же самое и с водородом: чтобы получить водород, надо затратить электроэнергию. Если мы затрачиваем «грязную» электроэнергию, то получаем «грязный» водород. Он чистый там, где мы его используем, но грязный там, где мы его получаем. Если основная часть энергии экологически чистая, например, с

гидроэлектростанций и СЭС – то и при производстве и электроэнергии, и водорода окружающая среда не страдает.

Несовершенства технологий получения водорода накладывает свои ограничения. Дешевые способы производства, такие как паровая конверсия, создают дополнительную проблему очистки водорода от «грязных» компонентов. Водород не должен загрязнять окружающую среду оксидами азота, но и способами его получения. Говоря об экологичности применения водорода, имеется в виду не только прямое загрязнение химическими веществами, но и загрязнение парниковыми газами – углекислым газом или метаном. Если мы производим конверсию из углерода, углерод все равно выбросится в виде углекислого газа.

Другие способы, такие как электролиз, очень дороги, так как требуют колоссальных затрат электроэнергии. Но и это ограничение можно обойти, если иметь много дешевой излишней электроэнергии. Такую электроэнергию можно получить, например, используя ВИЭ или же на атомных электростанциях (АЭС).

Альтернативная энергетика в настоящее время имеет небольшую долю в общемировом производстве электроэнергии и имеет множество проблем, которые также предстоит решить. Атомные электростанции работают при постоянной мощности, и как правило их мощность оказывается выше чем нужна потребителям, поскольку мощность АЭС рассчитана на максимальные нагрузки. Как правило днем электроэнергии потребляется больше чем ночью, а станция продолжает вырабатывать то же количество электроэнергии, эти избытки можно не заряжать в аккумуляторы, а использовать для генерации водорода. Особенно это актуально для атомных электростанций, изменить мощность которых сложно, а мощность сама по себе огромна.

Использование водорода как источника энергии сопряжено и с традиционной проблемой выбросов в атмосферу загрязняющих веществ. Водород – чистый источник энергии? Это зависит от того, в каком устройстве перерабатывается водород. Если водород сжигать, то получится не только вода. Потому что воздух содержит в себе азот. При высокой температуре (от 600 °С) молекулы азота и кислорода воздуха образуют токсичные вещества – оксиды азота [22].

### 3 Способы хранения и транспортировки водорода

При промышленном использовании водорода ему необходимо организовать безопасные и эффективные системы его централизованного хранения. Методы хранения водородного топлива можно разделить на две группы [17, 18].

Первая группа включает физические методы, которые используют физические процессы (компрессирование или ожижение) для преобразования газообразного водорода в компактное состояние. На сегодня реализованы следующие физические методы хранения водорода. Сжатый газообразный водород:

- газовые баллоны;
- стационарные массивные системы хранения, включая подземные резервуары.

Жидкий водород:

- стационарные и транспортные криогенные контейнеры.

Во вторую группу входят химические методы, суть которых заключается в химическом или физическом взаимодействии с некоторыми веществами. Эти методы характеризует взаимодействие молекулярного либо атомарного водорода с материалом среды хранения и являются следующими. Адсорбционный водород:

- активированный уголь,
- углеводородные наноматериалы.

Химическое взаимодействие:

- органические гидриды,
- аммиак.

В таблице 1 показаны удельные показатели некоторых способов хранения водорода.

Таблица 1 – Удельные показатели способов хранения водорода

Способ хранения	Удельное потребление энергии, кВт·ч/кг H <sub>2</sub>	Удельный объем хранения, дм <sup>3</sup> /кг H <sub>2</sub>	Удельная масса хранения, кг/кг H <sub>2</sub>
Газообразный водород при высоком давлении	0,93	81	16



*Продолжение таблицы 1*

Способы хранения	Удельное потребление энергии, кВт·ч/кг H <sub>2</sub>	Удельный объем хранения, дм <sup>3</sup> /кг H <sub>2</sub>	Удельная масса хранения, кг/кг H <sub>2</sub>
Водород в гидридах	1,16	22	77
Жидкий водород	10,50	14	7
Криогенная адсорбция	3,20	59	20

### **3.1 Хранение газообразного водорода**

Хранение газообразного водорода не является более сложной проблемой, чем хранение природного газа. На практике для этого применяют газгольдеры, естественные подземные резервуары (водоносные породы, выработанные месторождения нефти и газа), хранилища, созданные в ходе подземных атомных взрывов. Подтверждена принципиальная способность хранения водорода в газообразном состоянии в соляных полостях, которые были образованы путем расщепления соли водой через пробуренные скважины. Хранилища газообразного водорода при давлении до 100 МПа, как правило, имеют сварные многослойные стенки, внутренняя стенка хранилища изготавливается из нержавеющей стали или другого материала, который может быть совмещен с водородом для его хранения под высоким давлением. Внешние слои выполняют из высокопрочных сталей. Для этих целей применяют и бесшовные толстостенные сосуды из низкоуглеродистых сталей, рассчитанных на давление от 40 до 70 МПа

Широкомасштабное применение получило хранение газообразного водорода в газгольдерах (резервуар для хранения водорода) с водяным бассейном (мокрые газгольдеры), поршневых газгольдерах постоянного давления (сухие газгольдеры), газгольдерах постоянного объёма (ёмкости высокого давления). Для небольшого хранения водорода используют баллоны. Мокрые и сухие газгольдеры недостаточно герметичны, чтобы хранить водород без каких-либо потерь. Согласно техническим нормам можно допустить утечку водорода при нормальной эксплуатации мокрых

газгольдеров вместимостью до 3000 м<sup>3</sup> – около 1,65 %, а вместимостью от 3000 м<sup>3</sup> и более - около 1,1 % в сутки.

Одним из наиболее перспективных способов хранения больших количеств водорода является хранение его в водоносных горизонтах. Годовые потери составляют при таком способе хранения от 1 % до 3 %. Такое же количество потерь подтверждено на опыте хранения природного газа. Газообразный водород обычно хранят и перевозят в стальных емкостях под давлением до 20 МПа. Такие сосуды разрешается подвозить к месту потребления на автомобильных или железнодорожных платформах, как в стандартной таре, так и в специально сконструированных контейнерах. Для хранения и перевозки небольших количеств сжатого водорода при температурах от минус 50 °С до плюс 60 °С используют стальные баллоны вместимостью до 12 дм<sup>3</sup>, а также могут использоваться баллоны вместимостью от 20 до 50 дм<sup>3</sup> с рабочим давлением до 20 МПа. Эти баллоны по своему существу просты и компактны. Для хранения 2 кг водорода требуются баллоны массой 33 кг. Прогресс в материаловедении не стоит на месте, и в скором времени удастся снизить массу материала баллона до 10 кг на 1 кг водорода. Сейчас масса водорода в баллоне составляет порядка 3 % от веса баллона. Большие количества водорода, как правило, хранят в крупных газгольдерах под давлением. Газгольдеры обычно изготавливают из углеродистой стали, рассчитанные на рабочее давление до 10 МПа. В таких газгольдерах выгодно хранить небольшие объемы водорода из-за его малой плотности. Повышение давления сверх указанного, например, до сотен МПа, приводит к водородной коррозии углеродистых сталей и к существенному удорожанию этих газгольдеров. Перспективное хранение огромнейших запасов водорода наиболее экономически выгодно в истощённых газовых и водоносных пластах. Газообразный водород в очень больших количествах хранится в соляных пустотах глубиной порядка 365 м при давлении водорода 5 МПа, в пористых водонаполненных структурах, вмещающих до  $20 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> водорода. Опыт продолжительного хранения (более 10 лет) в подземных газохранилищах газа с содержанием 50 % водорода показал полную возможность его хранения без заметных утечек.

### 3.2 Хранение жидкого водорода

Водороду присущи различные уникальные свойства и среди них всех есть наиболее важное, которое, безусловно, учитывается при его хранении в жидкой форме. В жидкой форме водород находится в очень коротком интервале температур от 253 °С до 256 °С. Первая точка – точка кипения, а вторая является точкой замерзания при его переходе в твердое агрегатное состояние. Как только температура заходит за точку кипения, водород начинает переходить из одного агрегатного состояния в другое (из жидкого в газообразное). Для предотвращения перегревов сосуды предварительно охлаждают до температуры порядка 253 °С перед закачкой в них водорода. Охлаждение осуществляют пропусканием через систему охлаждающего газа, что связано с большими расходами водорода на захлаживание ёмкости. Переход водорода из жидкого состояния в газообразное несет в себе неизбежные потери энергии от испарения. Стоимость и энергосодержание испаряющегося газа значительны. С точки зрения экономики необходимо организовать использования этого газа.

Для безопасного использования криогенного сосуда необходимо, чтобы по достижении максимального рабочего давления газовое пространство емкости было не менее 5 %. К резервуарам для хранения жидкого водорода присваивается ряд требований:

- конструкция резервуара должна быть достаточно проста, безопасна и надежна при его эксплуатации;
- расход жидкого водорода на заблаговременное охлаждение резервуара перед его заполнением жидким водородом должен стремиться к минимуму;
- хранилище водорода в обязательном порядке должно быть снабжено средствами для быстрой закачки жидкого водорода и для быстрого слития этого продукта.

Теплоизолированные сосуды являются основой криогенной системы хранения водорода, их масса примерно в 4, а то и в 5 раз меньше на 1 кг хранимого водорода, чем при баллонном хранении под высоким давлением. В криогенных системах

хранения жидкого водорода на 1 кг водорода приходится 6 – 8 кг массы криогенного сосуда, а по объёмным характеристикам криогенные сосуды соответствуют хранению газообразного водорода под давлением 40 МПа. Жидкий водород в больших количествах хранят в специальных хранилищах объёмом до 5000 м<sup>3</sup>. Крупное шарообразное хранилище для жидкого водорода объёмом 2850 м<sup>3</sup> имеет внутренний диаметр алюминиевой сферы 17,4 м.

### **3.3 Хранение и транспортировка водорода в химически связанном состоянии**

Преимущества хранения и транспортирование водорода в форме аммиака, метанола, этанола на дальние расстояния состоят в высокой плотности объёмного содержания водорода. Однако в этих формах хранения водорода среда хранения используется однократно. Температура сжижения аммиака минус 34 °С, критическая температура 132 °С, так что при нормальной температуре аммиак сжижается при давлении 1 МПа, и его можно транспортировать по трубам и хранить в жидком виде.

Для разложения аммиака в диссоциаторах, которое протекает при температуре примерно 850 °С и нормальном атмосферном давлении, используется отработанный железный катализатор для синтеза аммиака. Для получения одного кг водорода затрачивается 5,65 кг аммиака. Что касается затрат тепла на диссоциацию аммиака при использовании этого тепла со стороны, то теплота сгорания полученного водорода может до 20% превосходить теплоту сгорания использованного в процессе разложения аммиака. Если же для процесса диссоциации используется водород, полученный в процессе, то КПД такого процесса (отношение теплоты полученного газа к теплоте сгорания затраченного аммиака) не превышает 70%.

Обычно для процесса используют цинк-хромовый катализатор синтеза метанола. Процесс протекает при температуре порядка 300 °С. Метанол можно использовать как горючее для процессов конверсии. В этом случае КПД процесса получения водорода составляет примерно 70 % (отношение теплоты полученного

водорода к теплоте сгорания затраченного метанола); если теплота для процесса получения водорода подводится извне, теплота сгорания водорода, полученного методом каталитического разложения, на 22 %, превосходят теплоту сгорания, затраченного метанола, а водород, полученный методом паровой конверсии, на 15 % превосходит теплоту сгорания затраченного метанола. К сказанному следует добавить, что при создании энерго-технологической схемы с использованием отходящего тепла и применения водорода, полученного из метанола, аммиака или этанола, можно получить КПД процесса более высокий, чем при использовании указанных продуктов как синтетических жидких горючих.

### **3.4 Система хранения водорода в гидридах**

Необходимые баллоны для хранения газообразного водорода в сжатом состоянии, или сложные в изготовлении и дорогие емкости для хранения водорода в жидком виде отпадают, при хранении водорода в гидридной форме

При хранении водорода в гидридной форме объём системы уменьшается примерно в 3 раза по сравнению с объёмом хранения в баллонах. Это значит громоздкие баллоны для его газообразного хранения не нужны, не нужно затрачивать денежные средства на создание дорогих сосудов для хранения жидкого водорода. Исходя из этого, плюсами такого хранения являются: упрощение транспортировки водорода; отсутствие расходов на сжижение и конверсию водорода [24].

Методом гидролиза можно получать вдвое больше водорода, чем его находится в гидриде. Однако этот процесс практически необратим. Метод получения водорода термической диссоциацией гидрида даёт возможность создать аккумуляторы водорода, для которых незначительное изменение температуры и давления в системе вызывает существенное изменение равновесия реакции образования гидрида. Стационарные устройства для хранения водорода в форме гидридов не имеют строгих ограничений по массе и объёму, поэтому лимитирующим фактором выбора того или иного гидрида будет, по всей

вероятности, его стоимость. Для некоторых направлений использования может оказаться полезным гидрид ванадия, так как он неплохо диссоциирует при температуре, близкой к 0 °С. Гидрид магния является относительно недорогим, но имеет сравнительно высокую температуру диссоциации 300 °С и высокую теплоту образования. Железо-титановый сплав сравнительно недорог, а гидрид его диссоциирует при температурах от 50 до 100 °С с низкой теплотой образования. Применение гидридов для хранения водорода имеет значительные преимущества в отношении техники безопасности.

### **3.5 Криoadсорбционное хранение водорода**

Основным достоинством хранения водорода в криогенно охлаждаемых резервуарах, в которых содержится адсорбирующий водород, по сравнению с хранением водорода в гидридной форме заключается в том, что количество хранимого водорода на единицу массы адсорбента в случае криoadсорбции больше, чем в случае гидридного хранения. К тому же стоимость единицы массы материала адсорбента ниже, чем стоимость единицы массы металлических сплавов, используемых для гидридного хранения водорода. Чем ниже температура криoadсорбции, тем выше емкость адсорбент, что покрывает более высокие расходы на охлаждение водорода. Температуры при которых работает криoadсорбер находятся в интервале от минус 208 °С и до минус 195 °С. При адсорбции избыточное давление равняется 4,2 МПа, а при десорбции порядка 0,2 МПа. Активированный уголь с низкой плотностью и хорошей пористостью является наилучшим адсорбентом. Емкость хранения криогенного охлажденного активированного угля достигает 68 г/кг адсорбента при температуре минус 195 °С и возрастает до 82 г/кг при минус 208 °С. По массовым характеристикам эта система хранения превосходит систему хранения водорода под давлением в баллонах, но уступает жидководородным системам по объемным характеристикам.

### 3.6 Выводы по разделу 3

Проблемы возникают при хранении и транспортировке водорода. При повсеместном использовании водорода потребуются безопасные, а главное эффективные системы его централизованного хранения [22]. Водород – это самый легкий и плохо сжижаемый газ. Сейчас приходится перевозить водород либо в химически связанном виде, либо в баллонах высокого давления, либо в жидком состоянии.

Первый и самый простой способ – это перевозка в баллоне высокого давления. Но газ нужно сжать, а это дополнительные затраты энергии. Зато водород в таких баллонах храниться длительное время и довольно таки легок в использовании.

Второй способ – хранение и транспортировка в жидком состоянии. В жидком состоянии ненамного больше водорода в баллоне, чем в газообразном, но возникают другие проблемы. Температура сжижения водорода всего на несколько градусов отличается от абсолютного нуля. Водород испаряется при этих температурах. По технологии это похоже на перевозку сжиженного природного газа: температура отличается на несколько десятков градусов, но технология одна и та же. Необходимо учитывать, что на сжижение водорода затрачивается больше энергии, чем на сжижение природного газа.

Третий способ – перевозить водород сразу химически связанным, сжиженный природный газ – это химически связанный водород. В месте, где употребляется сжиженный природный газ, необходим конвертор, который этот природный газ будет переводить в водород. Это не очень эффективное решение, поскольку в локальном производстве трудно будет поставить очищающее от примесей сооружение.

Хочется отметить, что вышеизложенный перечень проблем использования водорода в качестве топлива, не является неосуществимой задачей для человечества, а это значит, что, возможно, в ближайшем будущем мы сможем увидеть расцвет водородной энергетики, ведь водород можно использовать без загрязнений и водород можно производить достаточно дешевым.

## 4 Использование водорода в энергетике и транспорте

Водород – химически элемент периодической системы с обозначением  $H_2$  и атомным номером 1, считается самым легким элементом периодической таблицы. Выделяется из вулканических извержений совместно с иными газами, либо с нефтяных скважин. Водород трудно встретить в природе в чистой форме, для его получения обычно применяют различные химические методы. Выбор имеющихся методов для получения или извлечения водорода зависит только от сырья, из которого получают водород.

Водород – это крайне действенное и чистое в плане экологии топливо. В наши дни водород в крупных масштабах применяется в качестве ракетного топлива, также он задействован в промышленных химических процессах. Производство водорода в мире неукоснительно растет. Дальнейшее развитие водородной энергетики – это применение его в качестве топлива для локального производства электроэнергии и тепла, бытового энергоснабжения, аккумулирования энергии, для транспорта, в том числе для заправки автомобилей. При масштабном производстве водорода из воды, затрачивая на процесс энергию возобновляемых или ядерных ресурсов, водород становится наиболее чистым и дешевым топливом, такой водород может способствовать развитию мировой экономики.

Водород имеет возможность прямого преобразования энергии химической реакции его соединений с кислородом в электрический ток в так называемых топливных элементах.

Водородные источники тока, на первый, взгляд кажутся идеальным решением глобальных проблем энергетики, ведь при их использовании отсутствуют какие-либо вредные выбросы, загрязняющие окружающую среду. Топливные элементы можно применять для транспортировки и хранения энергии, получаемой из возобновляемых источников, и «водородная экономика» представляет собой, казалось бы, оптимальный путь развития цивилизации. Однако существующие технологии (как производства самого водорода, так и получения из него



электроэнергии) еще очень далеки от совершенства. Но это не значит, что от водородной энергетики следует отказаться [25].

#### **4.1 ДВС на водороде**

Помимо объектов топливно-энергетической промышленности источником загрязнения окружающей среды является и автомобильный транспорт. Как ни странно, именно транспорт занимает львиную долю выбросов в окружающую среду.

Использование водорода в качестве топлива может помочь в решении экологической проблемы, связанной с загрязнением окружающей среды автотранспортом. На сегодняшний день водород имеет большой потенциал в качестве топлива для ДВС, поскольку имеет большую эффективность, чем другое топливо (бензин или дизель). При использовании водорода в качестве топлива мощность двигателя составляет от 70 % до 80 % традиционного бензинового двигателя. При изменении системы зажигания повышается температура в камере сгорания возрастает вероятность поломки двигателя, но КПД растет до 117% по отношению к бензиновому двигателю [26].

Наиболее перспективным направлением в развитии автотранспорта является транспорт на топливных элементах (ТЭ), которые могут полностью заменить ДВС за счет выработки электроэнергии для электродвигателя. В качестве примера можно привести разработку Японской компании «Toyota» автомобиль Toyota Mirai. Этот автомобиль оснащен электродвигателем, работающим за счет выработки электричества в ТЭ, его КПД достигает 83% (средний показатель КПД двигателей «Toyota» равен 23%). Основными плюсами являются: быстрая заправка, нет никаких выбросов вредных веществ в атмосферу и, самое главное, запас хода составляет порядка 600 км.

Недостатки такого транспорта заключаются только в слабо развитой водородной инфраструктуре, в способах получения дешевого водорода в больших количествах, а также способах его хранения и транспортировки.

Появление автомобилей на водородном топливе может ускорить развитие водородной инфраструктуры, как и в сфере транспорта так и в промышленных масштабах.

## **4.2 Топливные элементы**

### **4.2.1 История развития**

В 1839 году с помощью ГЭ получили первую электрическую энергию. Однако большую популярность водородная энергетика начала набирать, когда людям захотелось начать освоение космоса. В 1971 Уральским электрохимическим комбинатом для советской лунной программы был создан электрохимический генератор «Волна» его мощность составляла порядка 1,2 кВт, за основу был взят щелочной топливный элемент.

В 1960-е годы 20-ого века зарубежными компаниями создавались топливные элементы для освоения космоса мощностью до 1 кВт для программ «Джемин» и «Аполлон», в 70 – 80-е годы мощность топливных элементов доходила до 10 кВт, и они использовались для программы «Шатл». У нас такие установки разрабатывались для программы «Буран» в НПО «Энергия», которое выступало координатором всей программы, но само производство топливных элементов было в городе Новоуральск на электрохимическом комбинате. В те же годы началось строительство электростанций, мощность которых доходила до 100 кВт, эти электростанции работали на фосфорнокислотных топливных элементах. В Японии и США имеются опытные 10-мегаваттные электростанции.

### **4.2.2 Принцип работы**

Топливный элемент – электрохимический генератор, который вырабатывает электроэнергию за счет электрохимических реакций реагентов, поступающих извне. При его работе с электролитом и электродами нет никаких изменений,

следовательно, он может работать без перезарядки. Проще говоря, в нем химическая энергия топлива (водорода) превращается в электроэнергию в ходе химической реакции, рисунок 4.1.

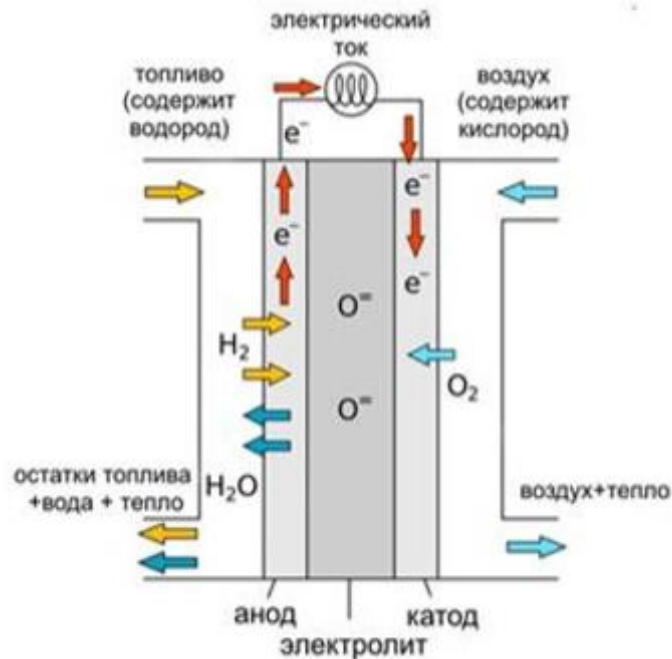
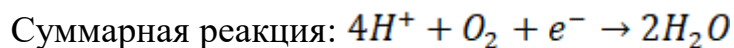
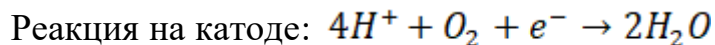
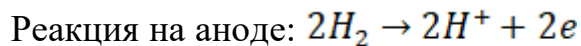


Рисунок 4.1 – Схема топливного элемента

Топливо и окислитель непрерывно подводятся к двум электродам (аноду и катоду), разделенным электролитом. К аноду подводят водород, следовательно, к катоду идет подача кислорода. За счет катализатора на аноде водород диссоциирует в положительно заряженные ионы водорода и электроны. Кислород, проходя через электролит в сторону анода, соединяется с водородом.



Энергия, полученная по принципу работы ТЭ в 2 раза эффективнее сжигания углеродного топлива на ТЭС. В качестве топлива для ТЭ помимо водорода могут использоваться и другие виды сырья, которое содержит в себе водород в химически

связанных соединениях. Единственное отличие будет заключаться в выбросах в атмосферу помимо паров воды еще и других компонентов, находящихся в этом газе.

Некоторые ТЭ чувствительны к примесям, которые содержатся в подаваемом топливе, к примесям относят  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ . Они «отравляют» электролит и электроды и в конечном итоге приводят к сокращению срока службы ТЭ.

### 4.2.3 Классификация ТЭ

Щелочной ТЭ (ЩТЭ, AFC). Электролитом такого топливного элемента является 35% или 50 % водный раствор щелочи:  $\text{KOH}$ , либо  $\text{NaOH}$ . При таком процентном содержании щелочи его эксплуатация возможна при температуре до  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , если же процентное содержание щелочи увеличить до 85 %, то его можно использовать при температуре до  $250\text{ }^\circ\text{C}$ . ТЭ такого типа наиболее разработаны. Широкое применение получили в автономных энергосистемах пилотируемых космических кораблей и на водоплавающих судах. К недостатку относят категорическую недопустимость содержания  $\text{CO}_2$  в топливе и в окислителе.

ТЭ на протонообменной мембране (ТПТЭ, PEMFC). Электролитом этого топливного элемента выступает тонкая пластмассовая пленка, или твердая полимерная мембрана, которая служит для прохода через нее водородных ионов с анода на катод. В связи с тем, что такие ТЭ могут обеспечить высокую плотность тока, есть возможность уменьшить их вес, себестоимость, сделать их более компактными и улучшить качество работы. Эти ТЭ легко герметизировать в процессе производства, поскольку в них используется мембрана, а не жидкий электролит. За счет использования мембраны снижается возможность коррозии металла, а, значит, срок службы у таких ТЭ будет значительно дольше.

ТЭ на фосфорной кислоте (ФКТЭ, PAFC). В качестве электролита используется бумажная матрица, насыщаемая фосфорной кислотой, через нее положительно заряженные ионы проходят от анода к катоду. Максимальная температура, при которой работает этот ТЭ, составляет  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . Из всех других известных видов топливных элементов ФКТЭ являются самыми подходящими для

коммерческого использования. Их устанавливают в качестве стационарных электрогенераторных устройствах в зданиях и других помещениях, бывали случаи, когда их использовали на грузовых автомобилях и автобусах. Электрический КПД ФКТЭ уже превышает 40 %, а если его использовать для комбинированной выработки электроэнергии и тепла, то КПД возрастает до 85 %. В Японии на фосфорно-кислотных ТЭ работает самая большая электростанция мощностью в 11 МВт.

ТЭ на расплаве карбоната (РКТЭ, MCFC). Электролитом выступает расплавленная смесь лития и калия (или лития и натрия), которая проводит водородные ионы (протоны) с анода на катод. Рабочая температура приблизительно равна 650 °С, это является, с одной стороны плюсом, так как топливо не требует какой-либо подготовки для его использования, но из-за этой же температуры и такого электролита детали покрываются ржавчиной, и у них ускоряется износ. Из-за высокой рабочей температуры у них усложняется конструкция. Наилучшее применение для них нашли в местах, где требуется постоянная подача электроэнергии – это связано с тем, что ТЭ такого типа довольно долго достигают свою рабочую температуру. В США на РКТЭ работает демонстрационная опытная электростанция мощностью в 1,8 МВт.

ТЭ на твердых оксидах (ТОТЭ, SOFC). Электролитом выступает твердый керамический материал, в которых переход атомов кислорода от катода к аноду протекает при чрезвычайно высокой температуре – свыше 1000 °С. ТОТЭ неприхотливы к топливу, им может служить практически любое топливо, даже самое загрязненное, в топливном процессоре оно подвергается газификации, в результате этот газ попадает в батарею генератора. Так как в них используют твердый электролит и абсолютно любое топливо, они имеют самую простую конструкцию среди других ТЭ. КПД электрохимического генератора составляет 60 %. Так как продуктом сгорания является вода, и нет никакого вреда окружающей среде, их лучше всего применять на больших стационарных электрогенераторных установках и электростанциях.

#### 4.2.4 Области применения ТЭ

С начала 1970-х годов ТЭ элементов было произведено порядка 11 тысяч, за последние 10 лет от общего числа их было произведено порядка 10 тысяч, то есть с каждым годом рынок прогрессировал. На рынке ТЭ выделяется четыре крупномасштабных сектора: транспорт, небольшие и крупные стационарные установки, портативные устройства.

В большей степени распространены стационарные ТЭ. Уже сейчас в мире действует в районе 600 энергоустановок, мощность которых более 10 кВт. Топливом большинства из них является природный газ. В последние годы был замечен спад рынка крупномасштабных стационарных энергоустановок на базе ТЭ, но вырос объем продаж малых стационарных установок, мощность которых меньше 10 кВт.

Рынок топливных элементов расширяется, в основном, за счет наиболее перспективной области, а именно источников питания для портативных устройств (видеокамер, телефонов и т.д.), однако, поскольку крупные системы более совершенны, их производство вновь может начать расти.

Каждый год на исследования ТЭ и сопутствующих технологий страны запада инвестируют около 1 млрд. долларов государственных средств. Половина этой суммы направляется на разработки ТЭ, остальные средства – на создание систем получения, хранения и транспортировки водорода.

Малые стационарные установки. Домашние энергетические установки мощностью 0,75–10 кВт предназначены для обогрева помещений и производства электроэнергии и горячей воды 24 ч. в сутки. Установки, мощность которых равна 5 кВт, могут обслуживать несколько загородных домов. Такие установки легко встраиваются в существующую инфраструктуру, имеют высокий КПД, почти не загрязняют окружающую среду вредными выбросами CO<sub>2</sub>, их размер соизмерим с размерами домашних бойлеров и, самое главное, топливом может служить природный газ.

Более 900 новых малых стационарных водородных энергетических установок насчитывалось во всем мире в 2005 году, в 2006 году их стало 1500, в 2007 году в эксплуатацию ввели порядка 3000 установок мощностью до 10кВт.

В малых энергетических установках, в основном, используют две технологии ТЭ: протонообменные (PEMFC, ТПТЭ) и твердооксидные (SOFC, ТОТЭ). В 2005 г. около 75 % установок было изготовлено по PEMFC-технологии, около 25 % — по SOFC.

В 2005–2006 гг. основная часть малых установок была изготовлена Японской фирмой NEF (New Energy Foundation). Так же она объявила о начале многолетнего демонстрационного проекта по применению таких установок. Будет субсидирован выпуск 6400 топливных элементов. В 2005 г. стоимость 1 кВт водородной промышленной станции в Японии составляла около 87 тыс. долларов, монтажные работы составили такую же сумму.

Крупные стационарные установки. К концу 2006 г. во всем мире действовало более 800 стационарных энергетических установок на ТЭ мощностью более 10 кВт. Их суммарная мощность — около 100 МВт. За 2006 г. построено более 50 установок общей мощностью более 18 МВт. В 2005 году среди новых установок преобладали ТЭ на расплавах карбонатов (MCFC) и фосфорнокислотные ТЭ (PAFC). Несмотря на то, что большая часть стационарных ТЭ в настоящее время работает на природном газе, все большее количество установок предназначается для использования альтернативных видов топлива. В 2005 году начала усиливаться тенденция применения синтез-газа и биогаза. По объему потребления в качестве сырья природный газ занимал первое место, а биогаз второе. В 2005 г. в Японии и Германии были введены в эксплуатацию электростанции, топливом которых был биогаз, получаемый из древесных отходов, пластика, муниципальных сточных вод. В будущем значительно увеличится доля водорода и керосина.

Гибридные установки: топливный элемент/газовая турбина. Совмещение топливного элемента и газовой турбины ведет к повышению эффективности такой системы в целом, такая установка может утилизировать тепловую энергию, и за счет этого снижается себестоимость энергии. Компания FuelCell Energy (США)

разработала гибридную установку на основе ТЭ типа SOFC и газовой турбины. В этой схеме топливный элемент обеспечивает 4/5 энергии, а оставшая часть производится на газовой турбине. КПД данной схемы приближается к 70 %. Испытывается электростанция мощностью 40 МВт, состоящая из 10 топливных элементов и одной турбины мощностью 10 МВт.

В США и Японии планируют строительство крупных теплоэлектростанций мощностью 40–700 МВт двойного и тройного цикла с общим КПД более 80 %. Выбросы CO<sub>2</sub> от такой системы должны быть на 30 % меньше, чем на традиционных угольных ТЭС.

В 2005 г. в США был принят Закон по энергетике, предусматривающий 30 %-ые инвестиционные налоговые скидки до уровня 1000 долларов/кВт установленной мощности. Налоговые скидки предоставлялись с 1 января 2006 г. по 1 января 2008 г. Стоимость электроэнергии, произведенной топливными элементами, составляет 0,015–0,02 долларов/(кВт · ч).



## **5 Перспективы использования водорода в угольных регионах**

Перспективно использовать водород в угольных регионах можно для существенного увеличения КПД электростанции, за счет повышения начальных параметров пара паротурбинного цикла. Введение дополнительного водородного перегрева непосредственно перед паровой турбиной в специальных камерах сгорания, где сжигание водорода осуществляется в парокислородной среде, является одним из перспективных решений. Такой подход, с одной стороны, позволит существенно увеличить начальную температуру пара, а с другой стороны, сведет к минимуму область конструктивных элементов, работающих в зоне сверхвысоких температур, тем самым сократив применение дорогостоящих жаропрочных материалов.

### **5.1 Тепловые циклы с применением водорода**

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке тепловых циклов с применением водорода. Этому вопросу посвящены работы [27, 28, 29]. Особый научный интерес представляет вариант, в котором единственным применяемым топливом будет служить водород. Опишем основной принцип устройства такой тепловой машины. На рисунке 5.1 приведена тепловая схема и термодинамический цикл в T-s диаграмме представлен на рисунке 5.2.

Теплота в цикле подводится в двух камерах сгорания – HPCB (high pressure combustion burner, камера сгорания высоко давления) и LPCB (low pressure combustion burner, камера сгорания низкого давления), где происходит сгорание водорода в парокислородной среде. Затем пар расширяется в отсеках паровой турбины - ННТ (high temperature steam turbine, высокотемпературная паровая турбина) и НИТ (intermediate high temperature steam turbine, среднетемпературная паровая турбина).

В силу того, что горение водорода значительно проще организовать в паровой среде, а не в среде жидкости, и учитывая, что теплота в цикле подводится только в камере сгорания, питательную воду необходимо предварительно испарить за счет внутренней теплоты цикла. Для этого в схеме используются специальные узлы – HRBL (high pressure recovery boiler, испарительрекуператор высокого давления). Остальной тепловой процесс и узлы тепловой схемы аналогичны существующим тепловым паросиловым станциям.

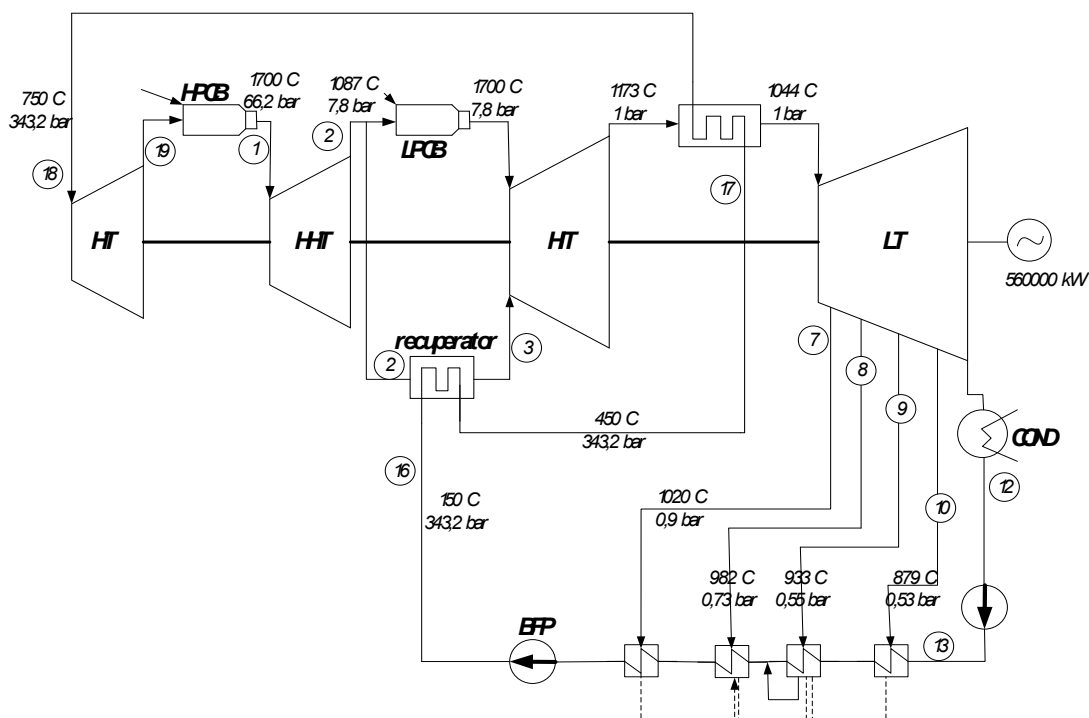


Рисунок 5.1 – Тепловая схема водородного энергоблока [27]

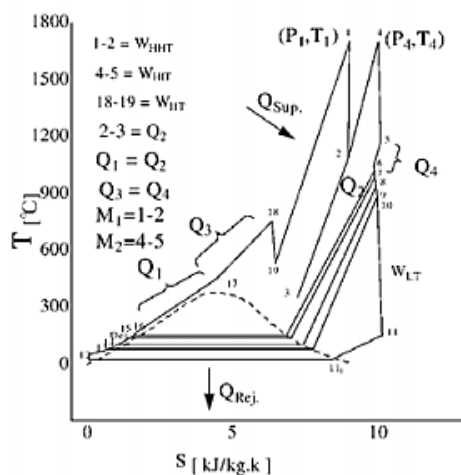


Рисунок 5.2 – Термодинамический цикл водородного энергоблока [27]

Получаемая термодинамическая эффективность в результате организации цикла обозначенным способом показана на рисунке 5.3 [27]. Видно, что термодинамический КПД таких циклов может достигать 65 - 69%, что превышает значения характерные для современных парогазовых установок.

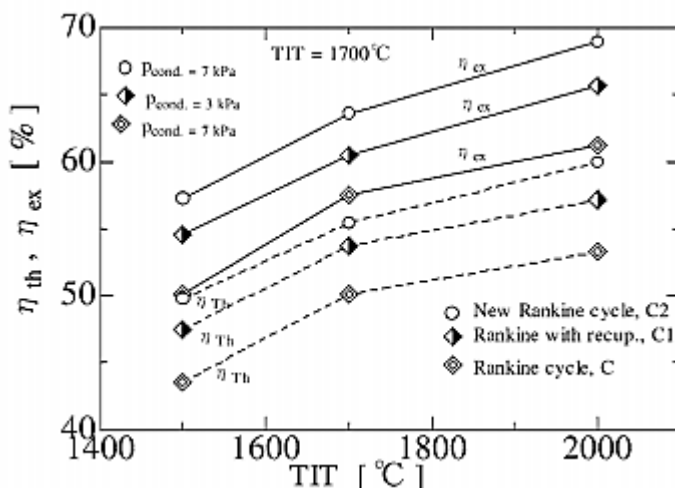


Рисунок 5.3 – Показатели термодинамической эффективности водородного энергоблока в зависимости от начальной температуры [16]

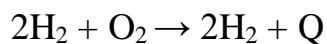
Несмотря на высокую перспективность водородных циклов, их практическая реализация возможна только в долгосрочной перспективе. Данный цикл дает значительные преимущества только при сверхвысоких температурах. При уровне температур, реально применяемых в настоящий момент, КПД цикла будет ниже, чем у традиционных блоков.

Во всех приведенных случаях только при использовании гибридных тепловых схем удастся существенно увеличить термический КПД. Причем, это происходит либо при переходе на более высокий уровень начальных температур теплоносителей, либо за счет глубокой утилизации теплоты уходящих газов.

На основании вышесказанного можно сделать заключение, что, во-первых, существует острая проблема, связанная с необходимостью повышения эффективности производства электроэнергии. Во-вторых, основным источником электроэнергии в настоящий момент являются ТЭС. Единственный путь, позволяющий существенно повысить эффективность ТЭС, – это рост начальных параметров. Увеличение начальной температуры неизбежно приводит к

необходимости пересмотра сортамента применяемых сталей и сплавов. При переходе на уровень начальных температур около 720°C для обеспечения надежной работы пароперегревателя и паропроводы требуется изготавливать из сплавов на никелевой основе, которые почти в 25 раз дороже применяемых в настоящей момент материалов для обозначенных конструктивных элементов.

С этой точки зрения перспективным решением становится введение дополнительного перегрева сверх освоенных 540°C непосредственно перед паровой турбиной в специальных камерах сгорания, где водород будет взаимодействовать с кислородом. В результате такого взаимодействия происходит образование водяного пара и выделения теплоты (120 МДж/кг H<sub>2</sub>):



Принципиальная простейшая тепловая схема такого процесса будет иметь вид (рисунок 5.4)

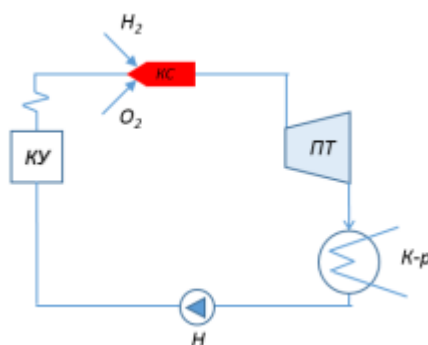


Рисунок 5.4 – Принципиальная простейшая тепловая схема с водородным перегревом пара

Такой подход, с одной стороны, позволит увеличить начальную температуру и, с другой стороны, ограничит область конструктивных элементов, работающих в зоне сверхвысоких температур к минимуму. Тем самым сократится область применения дорогостоящих жаропрочных материалов. Также следует отметить, что сжигание водорода будет сопровождаться существенным ростом полезной мощности, которая будет производиться без негативного воздействия на воздушный бассейн, что характеризует высокую экологическую перспективность данной концепции.

## 5.2 Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа

Применение водородного перегрева пара в первую очередь дает возможность существенного повышения тепловой экономичности за счет увеличения начальной температуры цикла при сохранении уже отработанных конструктивных решений, применяемых в котельной технике.

Компактные размеры водородно-кислородных камер сгорания теоретически позволяют осуществлять повышение температуры пара в необходимых точках тепловых схем гибридных энергоустановок, что практически нереализуемо при осуществлении перегрева пара в котле.

Таким образом, создание гибридного энергоблока позволит сократить длину высокотемпературных паропроводов острого пара за счет осуществления его перегрева в непосредственной близости от паровой турбины в водородно-кислородном пароперегревателе при сохранении традиционной конструкции котла, что положительно скажется на изменении стоимости энергоблока.

Первым шагом при проектировании любого энергоблока, в том числе и гибридного, является выбор начальных параметров пара, а также параметров промежуточного перегрева, и разработка тепловой схемы энергоблока. Именно этим вопросам и посвящен настоящий раздел диссертации, где были исследованы различные варианты тепловых схем гибридных энергоблоков с водородным перегревом, предполагающие различные схемы применения водорода для перегрева и различные уровни параметров острого пара и пара промежуточного перегрева.

Применение водородного перегрева пара дает возможность исключить передачу теплоты через стенку, что позволяет получить практически любую температуру свежего пара вплоть до температуры горения водорода с кислородом, не ограничиваясь возможностями работы металла теплопередающей поверхности, тем самым достигнув уровня начальных температур ГТУ в паротурбинных установках и существенно увеличив их тепловую экономичность.

Сжигание водородного топлива в смеси с кислородом производится в специальной водородно-кислородной камере сгорания. Использование такой

камеры сгорания возможно в качестве внешнего пароперегревателя для гибридной ТЭС. Ее установка осуществляется после пароперегревателя традиционного энергетического котельного агрегата. Для получения необходимой температуры перегретого пара высокотемпературный водяной пар, образовавшийся в результате реакции водорода и кислорода, смешивается с насыщенным паром, генерируемым в котле.

В связи с тем, что продукты сгорания являются не только теплоносителем, как это происходит при сжигании топлив в паровых котлах, но и рабочим телом, оценка экономичности энергоустановок с водородным перегревом пара имеет определенные особенности.

Тепловой баланс водородно-кислородной камеры сгорания, из которого определяется расход водорода, выглядит следующим образом:

$$G_{\text{ПГ}} \cdot h''_{\text{ПГ}} + B_{\text{H}_2} \cdot Q_P^{\text{В}} \cdot \eta_{\text{КС}} = G_{\text{ПГ}} \cdot h_0 + 9 \cdot B_{\text{H}_2\text{O}} \cdot h_0 \quad (5.1)$$

где  $G_{\text{ПГ}}$  – расход пара через пароперегреватель котла, поступающего в камеру сгорания, кг/с;

$h''_{\text{ПГ}}$  – энтальпия пара на выходе из котла, кДж/кг;

$B_{\text{H}_2}$  – расход водорода, кг/с;

$Q_P^{\text{В}}$  – высшая теплота сгорания водорода, кДж/кг;

$\eta_{\text{КС}}$  – КПД камеры сгорания;

$h_0$  – энтальпия на выходе из камеры сгорания;

$9 \cdot B_{\text{H}_2\text{O}}$  – количество водяного пара, образующегося при сжигании  $B_{\text{H}_2}$

водорода с кислородом, кг/с;

Использование для определения расхода водорода высшей теплоты сгорания объясняется тем, что водяной пар, образовавшийся в результате реакции водорода и

кислорода, используется в цикле в качестве рабочего тела и выводится из него в виде конденсата, т.е. теплота конденсации используется в цикле.

Очевидно, что наибольший эффект от любого способа перегрева пара может быть получен в случае увеличения начальной температуры цикла (температуры острого пара), а при наличии промежуточного перегрева – и температуры пара после промежуточного перегревателя.

Рассмотрим гибридный энергоблок с двукратным водородным перегревом пара как после первичного пароперегревателя, так и после промежуточного. Принципиальная тепловая схема такого гибридного энергоблока представлена на рисунке 5.5.

В данном случае генерация пара осуществляется в прямоточном угольном котельном агрегате с суперсверхкритическими параметрами пара. После пароперегревателя пар направляется для перегрева в водородную камеру сгорания, где осуществляется сжигание водорода с кислородом, в результате чего образуется водяной высокотемпературный водяной пар, который, смешиваясь с основным потоком пара, поступающим из котельной установки, повышает общую температуру пара на входе в турбину до заданной величины. Затем перегретый в водородной камере сгорания пар поступает в высокотемпературную часть высокого давления, после расширения в которой до давления 6 МПа направляется в котел для промежуточного перегрева до 620 °С и с этой температурой поступает во второй водородно-кислородный пароперегреватель, где его температура вновь повышается до уровня температуры острого пара, после чего пар поступает в часть среднего давления, а затем в часть низкого давления, совершив работу в которых, направляется в конденсатор. Из конденсатора конденсат забирается конденсатным насосом первого подъема и направляется в систему регенерации низкого давления, которая состоит из пяти регенеративных подогревателей низкого давления.

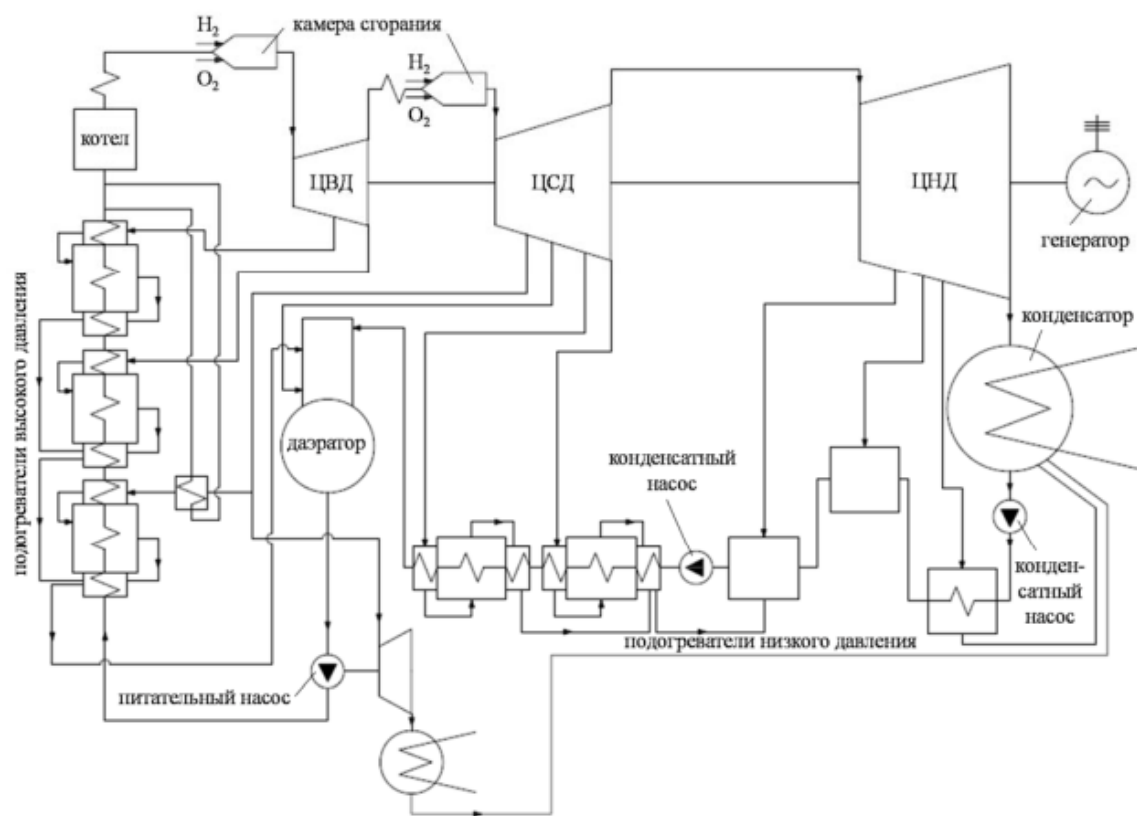


Рисунок 5.5 – Принципиальная тепловая схема гибридного энергоблока с двукратным водородным перегревом пара

Пройдя первый по ходу конденсата подогреватель поверхностного типа, конденсат проходит два смешивающих подогревателя, включенных по гравитационной схеме, после чего забирается из второго смешивающего подогревателя конденсатным насосом второго подъема и пройдя два поверхностных подогревателя, поступает в деаэрагор питательной воды. После деаэратора питательная вода питательным насосом прокачивается через три регенеративных подогревателя высокого давления, где подогревается до 320 °С и с указанной температурой поступает в экономайзер котельной установки. Рабочее давление в деаэрагоре составляет 1,2 МПа. Привод питательного насоса осуществляется приводной паровой турбиной с собственным конденсатором.

Рассмотрим, как изменяются показатели работы энергоустановки в зависимости от степени перегрева пара в водородно-кислородном пароперегревателе для рассматриваемой тепловой схемы.



На рисунке 5.6 приведены кривые, характеризующие изменение КПД энергоблока брутто  $\eta_{\text{брутто}}$  в зависимости от температуры промежуточного перегрева пара  $t_{\text{пп}}$  при различных уровнях температуры свежего пара  $t_0$ . Диапазон изменения температур как свежего пара, так и пара промежуточного перегрева был принят от температуры за котельным агрегатом, равной 620 °С, до температуры 1200 °С.

Наибольший эффект достигается при максимальных температурах пара и при температуре пара промперегрева, равной температуре свежего пара в 1200 °С, когда КПД энергоблока брутто превышает 71 %, что существенно (на 10 %) превосходит КПД лучших образцов ПГУ с начальной температурой газов перед газовой турбиной, равной 1500 °С.

Зависимость изменения электрической мощности энергоблока  $N_e$  от температуры перегрева  $t_{\text{пп}}$  приведена на рисунке 5.7. Приведенные зависимости показывают, что в случае реализации максимального в рассматриваемом случае перегрева пара до температуры 1200 °С возможно увеличение электрической мощности энергоблока от 660 до 1665 МВт, т.е. в 2,5 раза.

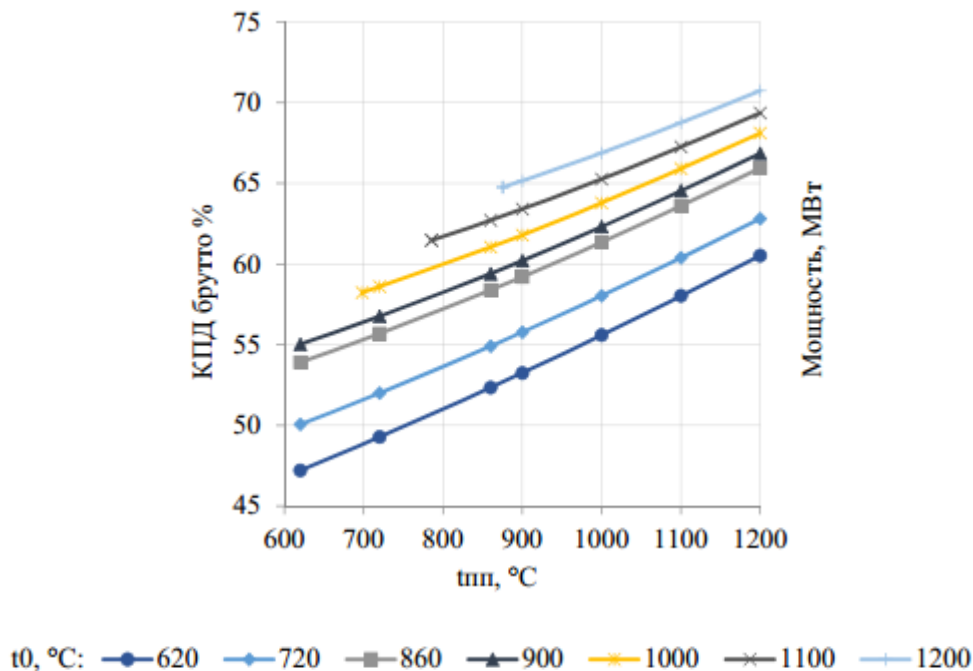


Рисунок 5.6 – КПД гибридного энергоблока с двукратным водородным перегревом пара [28]

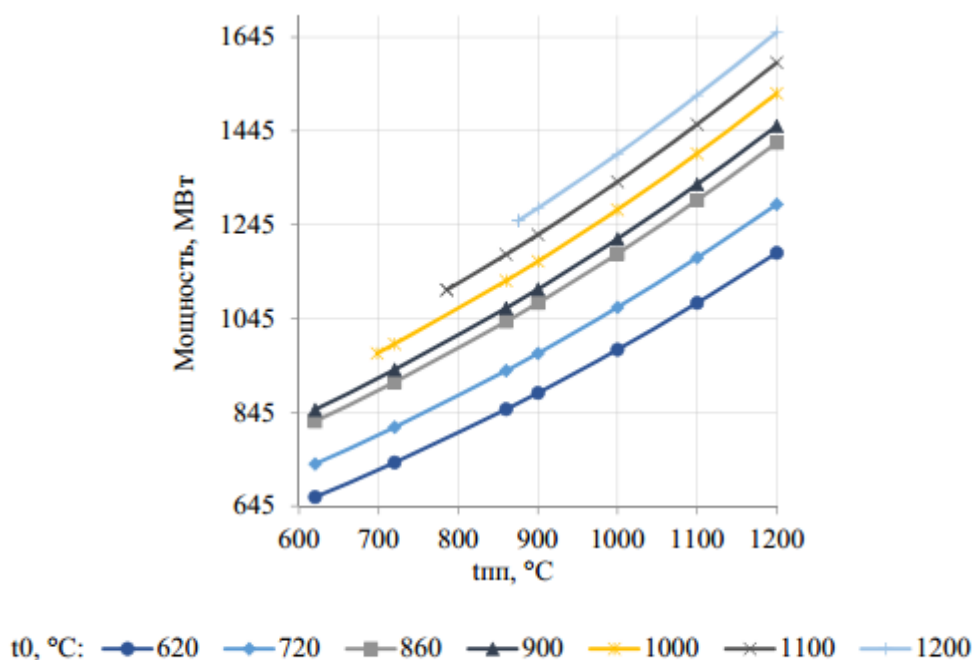


Рисунок 5.7 – Электрическая мощность гибридного энергоблока с двукратным водородным перегревом пара [28]

Столь высокие температуры свежего пара хотя и позволяют существенно увеличить мощность и КПД энергоблока, однако создают дополнительные трудности при проектировании оборудования, в частности его узлов, работающих при высоких температурах. Одной из проблем для столь высокого повышения температуры пара является то, что в конденсатор начинает поступать перегретый пар. Это хорошо видно из приведенного на рисунке 5.8 процесса расширения пара в турбине.

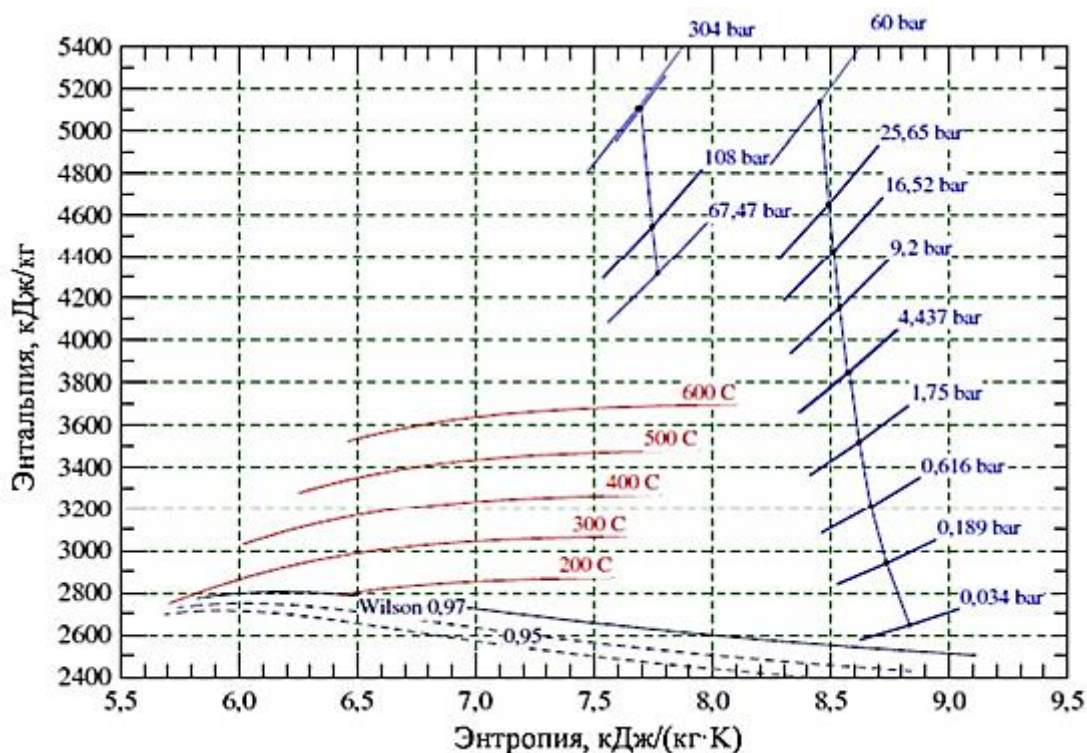


Рисунок 5.8 – Процесс расширения пара в турбине гибридного энергоблока с двукратным водородным перегревом пара [16]

Указанное обстоятельство приводит к росту потерь теплоты в конденсаторе, а также создает трудности при проектировании цилиндров низкого давления турбины, поскольку при переходе пара из насыщенного состояния в перегретое происходит резкий рост его удельного объема, что требует столь же резкого увеличения выходной площади цилиндров низкого давления.

Существует два решения указанной проблемы: либо снижение температуры пара перед цилиндром низкого давления путем установки промежуточного охладителя пара, либо ограничение температуры пара промежуточного перегрева до той величины, при которой степень сухости пара за последней ступенью турбины не превышает 100 %.

На рисунке 5.9 представлена принципиальная тепловая схема гибридного энергоблока с высокотемпературной турбиной и промежуточным пароохладителем. Пароохладитель служит, как уже было отмечено, для снижения температуры пара перед цилиндром низкого давления до уровня, обеспечивающего степень сухости за последней ступенью турбины не более 100 %.

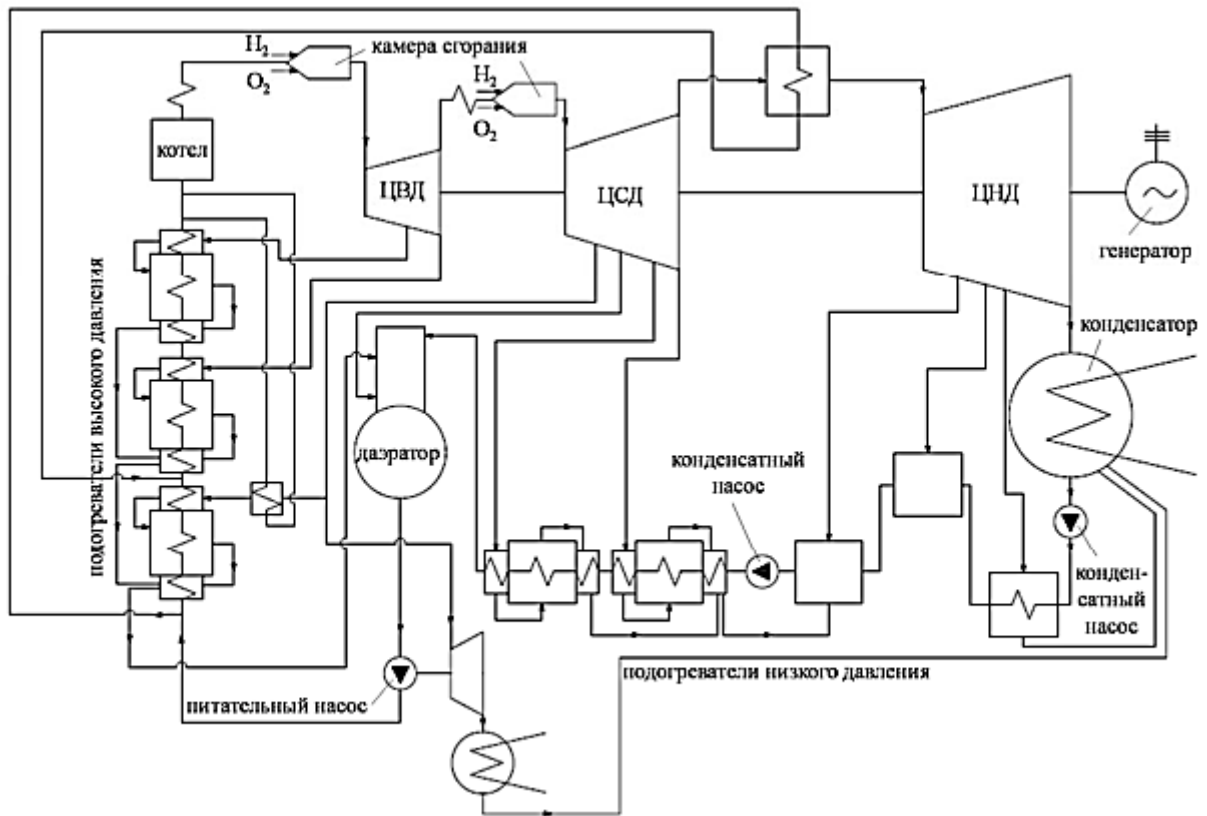


Рисунок 5.9 – Тепловая схема гибридного энергоблока с двукратным водородным перегревом пара и промежуточным пароохладителем [28]

Охлаждение пара в промежуточном пароохладителе осуществляется потоком части питательной воды, которая в обход первого по ходу воды подогревателя высокого давления поступает в пароохладитель, где нагревается, охлаждая пар, после чего смешивается с основным потоком перед вторым подогревателем высокого давления.

Процесс расширения пара в турбине с двойным водородным перегревом пара и промежуточным охладителем в  $h$ - $S$  координатах представлен на рисунке 5.10.

На рисунках 5.11 и 5.12 показаны графики зависимости КПД  $\eta_{\text{брутто}}$  и электрической мощности  $N_e$  гибридного энергоблока с двумя водородными перегревами пара и пароохладителем в зависимости от температуры перегрева острого пара  $t_0$  и температуры пара промежуточного перегрева  $t_{\text{пп}}$  соответственно.

Проведенные исследования тепловых схем гибридных энергоблоков с двукратным водородным перегревом пара и их варианты расчеты продемонстрировали, что указанные схемы имеют огромный потенциал в плане

повышения тепловой экономичности и единичной мощности энергоустановок, однако достаточно сложны в практическом исполнении. Поэтому в качестве первого шага в освоении гибридных энергоблоков предложено исследовать варианты с однократным водородным промежуточным перегревом пара.

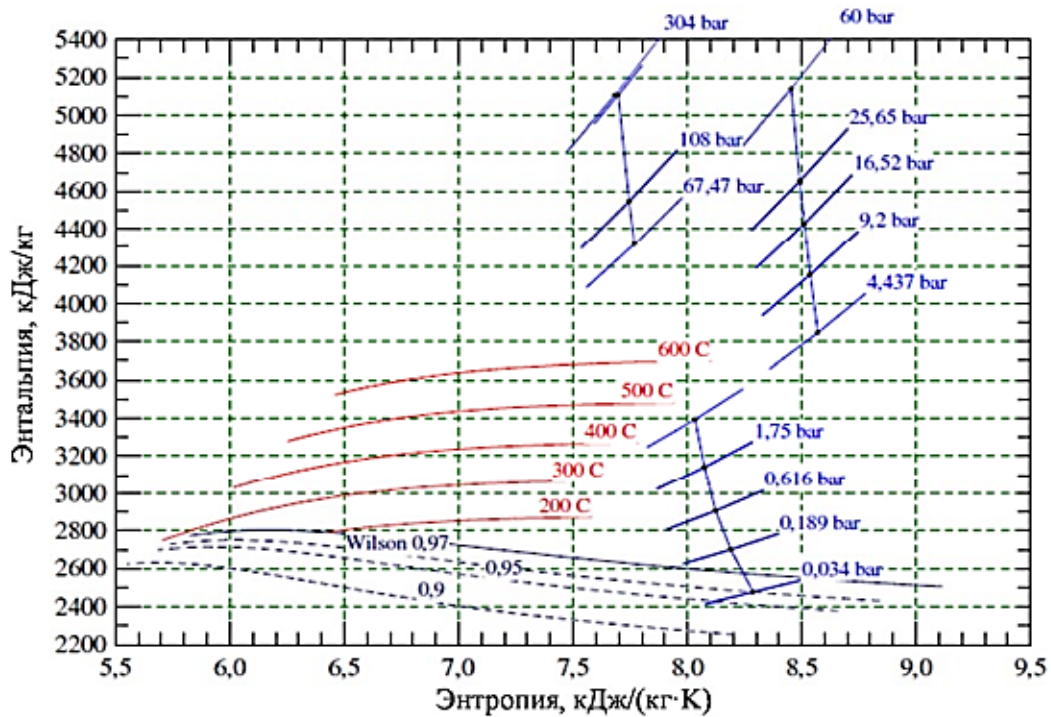


Рисунок 5.10 – Процесс расширения пара в турбине с двойным водородным перегревом и промежуточным охладителем [28]

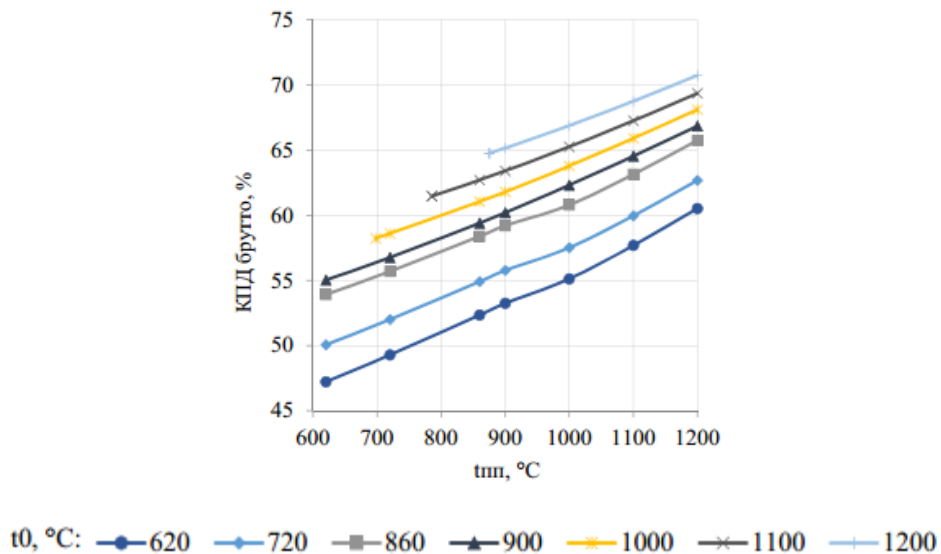


Рисунок 5.11 – КПД гибридного энергоблока с двумя водородными пароперегревателями и промежуточным охладителем пара [28]

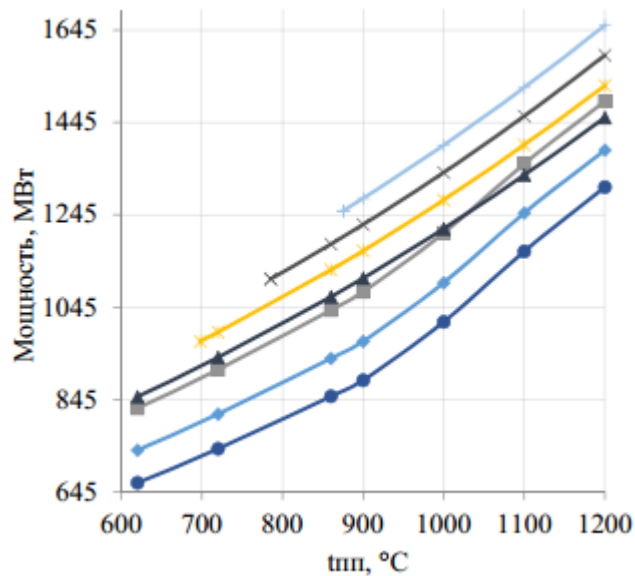


Рисунок 5.12 – Электрическая мощность гибридного энергоблока с двумя водородными пароперегревателями [28]

Схема гибридного энергоблока с однократным водородным промежуточным перегревом пара представлена на рисунке 5.13. Турбоустановка может быть выполнена как с промежуточным охладителем пара, так и без него. Наличие или отсутствие охладителя определяется температурой промежуточного перегрева пара, а также давлением в конденсаторе паротурбинной установки. В представленной схеме водородный пароперегреватель устанавливается после промежуточного пароперегревателя котельной установки. Охладитель же пара устанавливается в случае необходимости так же, как и в ранее рассмотренных схемах, перед цилиндром низкого давления.

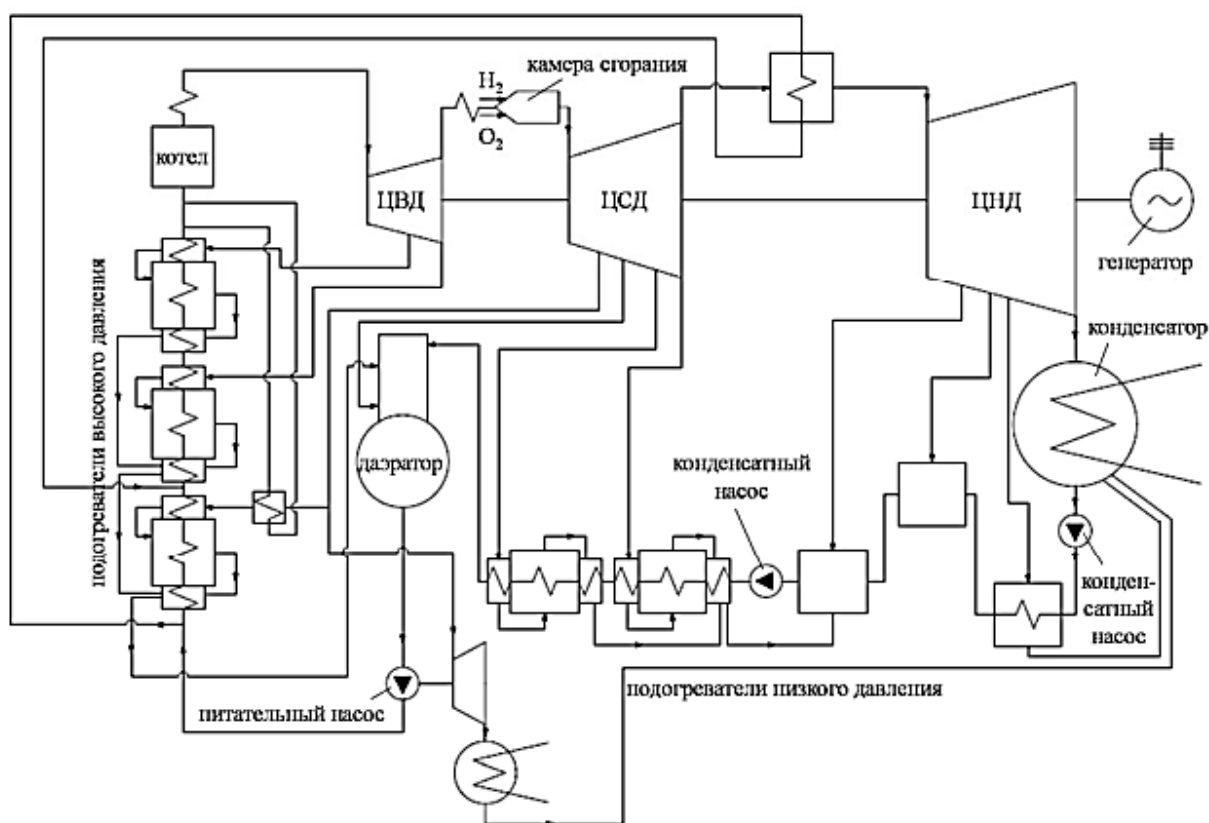


Рисунок 5.13 – Принципиальная тепловая схема гибридного энергоблока с однократным промежуточным водородным перегревом пара

В результате проведенных расчетных исследований были получены характеристики тепловой экономичности гибридного энергоблока для трех уровней давления промежуточного перегрева – 5, 6 и 7 МПа и различного уровня температур перегрева, а также определена электрическая мощность гибридного энергоблока.

Зависимость КПД энергоблока  $\eta_{\text{брутто}}$  от температуры промежуточного перегрева для трех указанных уровней давления представлена на рисунке 5.14. Эффективность блока в области сравнительно низких температур очень слабо зависит от давления рабочей среды, однако с ростом температуры влияние давления существенно возрастает и при температурах свыше 900 °С давление уже оказывает достаточно большое влияние на КПД установки.

В данном случае рассматривался такой же диапазон изменения температуры, как и в случае с двукратным водородным перегревом, и оказалось, что перегрев пара до 1200 °С позволяет достигнуть КПД блока от 60 до 61 %, что равно КПД ПГУ с начальной температурой газов, равной 1500 °С.

Изменение мощности гибридного блока  $N_3$  показано на рисунке 5.15. Промежуточный водородный перегрев пара  $t_{пн}$  в выбранном диапазоне изменения температур позволяет увеличить электрическую мощность энергоблока от 660 до 1300 МВт.

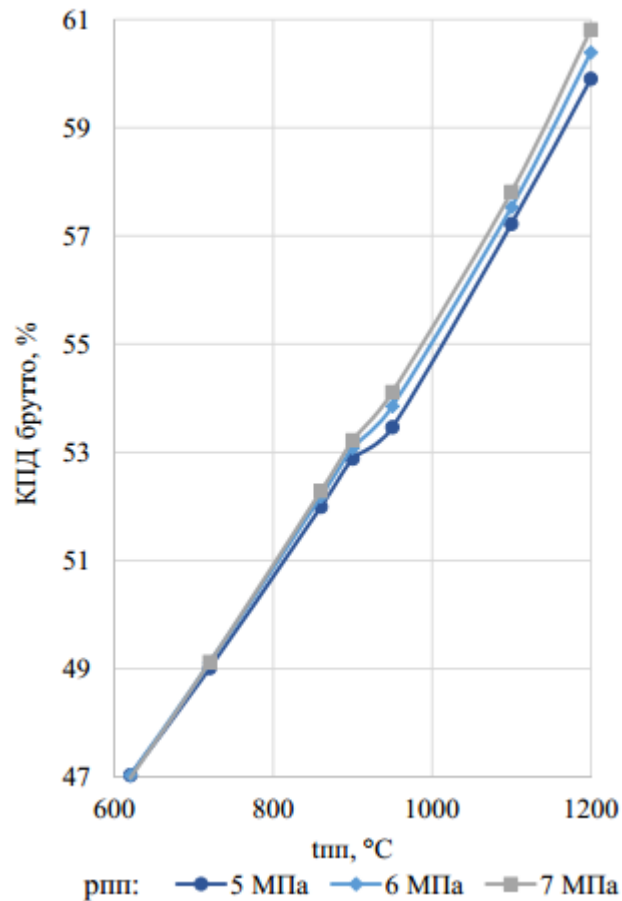


Рисунок 5.14 – КПД гибридного энергоблока с однократным водородным перегревом пара [30]



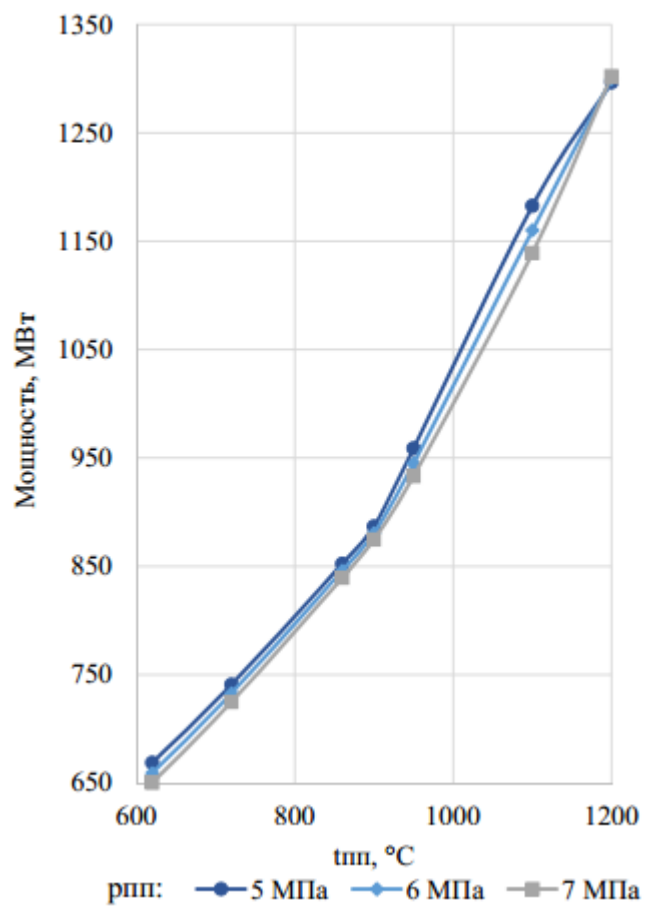


Рисунок 5.15– Электрическая мощность гибридного энергоблока с однократным водородным перегревом пара [30]

## 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. Водород, по сути являющийся «топливом будущего», служит источником энергии не только в транспорте, но и в энергетике, в частности, в тепловых электрических станциях. На этапе освоения гибридных энергоблоков применение водородного промежуточного перегрева пара является наиболее целесообразным решением, поскольку позволяет увеличить электрическую мощность блока практически вдвое при одновременном увеличении КПД паротурбинной установки до 61 %, что находится на уровне лучших образцов парогазовых установок, имеющих гораздо более высокую начальную температуру рабочего тела. Такое решение является более оправданным не только с термодинамической, но и с практической точки зрения, поскольку одним из основных узлов является водородно-кислородный пароперегреватель, конструкция которого достаточно хорошо отработана для рассматриваемого уровня давлений.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. РИА новости: Парижское соглашение по климату [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://ria.ru/20190923/1559007871.html>, свободный (дата обращения 17.04.2020).
2. Planetary project serving humanity: Ресурсы [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: [http://ru.planetaryproject.com/global\\_problems/resource/](http://ru.planetaryproject.com/global_problems/resource/), свободный (дата обращения 17.04.2020).
3. Безруких П.П. Состояние, перспективы и проблемы развития возобновляемых источников энергии / Безруких П.П., Стребков Д.С. // Малая энергетика. – 2013. – №1-2. – С. 6-9.
4. Гончар В.И. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии в Энергетической программе СССР – География в школе. 4/90 – Москва : Педагогика, 1990 г.
5. О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности Российской экономики: указ Президента РФ от 04.06. 2008 №889
6. Осадчий Г.Б. Совместное использование солнечной и ветровой энергии / Осадчий Г.Б. // Академия энергетики. – 2013. – №4 (54). – С. 36-43.
7. Николаев В.Г. Об эффективности использования возобновляемых источников энергии для производства электроэнергии в базовом и полупиковом режиме / Николаев В.Г., Ганага С.В. // Малая энергетика. – 2005. – №1-2. – С. 20-25.
8. Ганага С.В. Сравнительный анализ экономических показателей возобновляемых и традиционных источников энергии/ Ганага С.В., Кудряшов Ю.И., Николаев В.Г. // Малая энергетика. – 2005. – №1-2. – С. 13-19.
9. Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П., Кулешов Г.Г. Введение в водородную энергетику. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. - 264 с.
10. Курс лекций по водородной энергетике [Электронный ресурс]: сайт. – режим доступа: [http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1468/5/1334893\\_lectures.pdf](http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1468/5/1334893_lectures.pdf), свободный (дата обращения 21.04.2020).

11. Гамбург Д.Ю. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение : справочник / Д.Ю. Гамбург, Н.Ф. Дубовкин. – Москва : Химия, 1989. – 671 с.
12. Радченко Р.В. Водород в энергетике : учеб. пособие / Р.В. Радченко, А.С. Мокрушин, В.В. Тюльпа. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2014. – 229 с.
13. Коробцев С.В. Современные методы производства водорода. Москва : Институт водородной энергетики и плазменных технологий РНЦ “Курчатовский институт”. Междунар. химический саммит. – 1-2 июля, 2004.
14. Смердова С.Г. В. Небурчилов, О.Ю. Каргина Разработка и получение катализатора для водородных топлив элементов в институте инноваций топливных элементов. //Вестник Казан.технол. университета – 2012. – №10. – С. 71-73.
15. 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 23.05.2020).
16. A.Yu. Ramenskiy, A. Grigoriev, E.A. Ramenskaya, A.S. Grigoriev. International Journal of Hydrogen Energy, XXX, 1-13 (2017).
17. Hiroshige M., Seiichiro K., Kenshi I., Kato Y. Hydrogen Production. Energy Technology Roadmaps of Japan, Springer International Publishing. Japan. – 2016. P. 147-165.
18. Holladay J.D. An overview of hydrogen production technologies // Catalysis Today. – 2009. – №4. – С. 244
19. Гурьянов А.И. Теплофизика водород-кислородных камер сгорания высокотемпературных турбин, комбинированных ПГУ [Текст]/ А.И. Гурьянов, Г.Ш. Пиралишвили, И.М. Верещагин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3 (27). – С. 137-144.
20. Postnauka: Проблемы водородной энергетики [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://postnauka.ru/video/95574>, свободный (дата обращения 27.04.2020).

21. Зарянкин А.Е. Гибридные АЭС с внешним по отношению к реактору перегревом пара [Текст] / А.Е. Зарянкин, А.Н. Рогалев // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии». – Иваново, 2011. – С. 79-82.

22. Zaryankin A. Hybrid electric power installations with high temperature steam turbines and hydrogen steam superheating [Текст] / A. Zaryankin, A. Sedlov, S. Arianov, A. Rogalev // Archiwum Energetyki. – 2010. – № 40. – pp. 207-221.

23. Ефремов И. В. На пути к термоядерному реактору / И. В. Ефремов. – Москва, 1993.

24. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия: Ааронова-Бома эффект – Длинные линии [Текст] / А.М. Прохоров [и др.]. – Москва: Советская энциклопедия, 1988. – 704 с.

25. Ситдикова А.А., Святова Н.В., Царева И.В. Анализ влияния выбросов автотранспорта в крупном промышленном городе на состояние загрязнения атмосферного воздуха // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 3.

26. Аминов Р.З. Оценка термодинамической эффективности водородных циклов [Текст]/ Р.З. Аминов, А.Н. Егоров // Теплоэнергетика. – 2013. – № 4. – С. 27-33.

27. Аминов Р.З. Оценка эффективности водородных циклов на базе внепиковой электроэнергии АЭС [Текст] / Р.З. Аминов, А.Н. Байрамов, О.В. Шацкова // Теплоэнергетика. – 2009 – №11. – С. 41.

28. Гурьянов А.И. Теплофизика водород-кислородных камер сгорания высокотемпературных турбин, комбинированных ПГУ [Текст]/ А.И. Гурьянов, Г.Ш. Пиралишвили, И.М. Верещагин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3 (27). – С. 137-144.

29. 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.

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:

Проблемы и перспективы возможного использования водорода в теплоэнергетики

Кузбасса

(тема)

ОБУЧАЮЩИЙСЯ \_\_\_\_\_  
(подпись)

Фадеев В.В. \_\_\_\_\_  
(фамилия, имя, отчество)

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

Руководитель	<u>к.т.н., доцент</u> (уч. степень, звание)	_____	<u>Михайличенко Т.А.</u> (фамилия, имя, отчество)
--------------	--	-------	--

И.о. заведующего кафедрой	<u>к.т.н., доцент</u> (уч. степень, звание)	_____	<u>Темлянцева Е.Н.</u> (фамилия, имя, отчество)
------------------------------	--	-------	--

Директор института <u>МиМ</u> (наименование института)	<u>д.т.н., профессор</u> (уч. степень, звание)	_____	<u>Галевский Г.В.</u> (фамилия, имя, отчество)
--	---	-------	---

Нормоконтроль	<u>к.т.н., доцент</u> (уч. степень, звание)	_____	<u>Михайличенко Т.А.</u> (фамилия, имя, отчество)
---------------	--	-------	--

Новокузнецк  
2020 г.



# Проблемы и перспективы ВОЗМОЖНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ водорода в теплоэнергетике Кузбасса

Выполнил: обучающийся гр. МТ-16  
Фадеев. В.В.

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

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						
Разраб.		Фадеев В.В.			Тема выпускной квалификационной работы		Лит.	Лист	Листов	
Руковод.		Михайличенко Т.А.					У	3	20	
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 работы:** Проанализировать основные достоинства и ограничения, связанные с внедрением водорода в качестве альтернативного источника энергии.

### Задачи ВКР:

1. Проанализировать достоинства и недостатки альтернативных источников энергии.
2. Описать основные способы получения водорода, которые могут быть использованы в энергетике. Выполнить сравнительный анализ технологий использования водорода и его хранения. Описать основные химические реакции при получении водорода.
3. Рассмотреть схему и принцип работы электрической станции, использующей водород. Определить эффективность работы электростанции.

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР							
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Цели и задачи выпускной квалификационной работы			Лит.	Лист	Листов		
Разраб.	Фадеев В.В.							У	4	20		
Руковод.	Михайливленко Т.А.							Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16				
Консульт.												
Н. контр.	Михайливленко Т.А.											
И.о. зав. каф.	Темлянцева Е.Н.											

## Ратификация Парижского соглашения



Рисунок 1 – История и структура документа

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Ратификация Парижского соглашения					
Разраб.		Фадеев В.В.						Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайливленко Т.А.						У	5	20
Консульт.								Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайливленко Т.А.								
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.								

## Альтернативные источники энергии

Таблица 1 – Достоинства и недостатки геотермальной энергетики

Достоинства	Недостатки
Относительно экологически чистые	Экологическая проблема (дефицит пресной воды)
Стабильные цены на электроэнергию	Дорогое строительство
Низкие эксплуатационные расходы	Возможное истощение
Постоянное энергоснабжение	Сейсмическая нестабильность
	Географические ограничения

Таблица 2 – Достоинства и недостатки малой гидроэнергетики

Достоинства	Недостатки
Возможно децентрализованное использование	Остановка электростанции в период высыхания рек
Не дорогое строительство	Слабая изученность гидрологического режима
Отсутствие водохранилищ	Низкая ремонтная база
Экологическая безопасность	Отсутствие серийного оборудования
Большая степень автоматизации	

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						
Разраб.		Фадеев В.В.			Альтернативные источники энергии	Лит.	Лист	Листов		
Руковод.		Михайливченко Т.А.				У	6	20		
Консульт.						Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16				
Н. контр.		Михайливченко Т.А.								
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.								

## Альтернативные источники энергии

Таблица 3 – Достоинства и недостатки ветроэнергетики

Достоинства	Недостатки
Экологическая безопасность	Нестабильность
Быстрое строительство	Высокая стоимость
Высокая ремонтпригодность	Опасность для дикой природы
Компактность	Шумовое загрязнение

Таблица 4 – Достоинства и недостатки солнечной энергетики

Достоинства	Недостатки
Экологическая безопасность	Нестабильность
Возможность установки в любой точке мира	Высокая стоимость
Быстрый монтаж	Необходимость использования редких материалов
Большая степень автоматизации	Занимает большие площади

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Фадеев В.В.			Альтернативные источники энергии	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайливленко Т.А.				У	7	20
Консульт.						Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайливленко Т.А.						
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.						

## Способы получения водорода

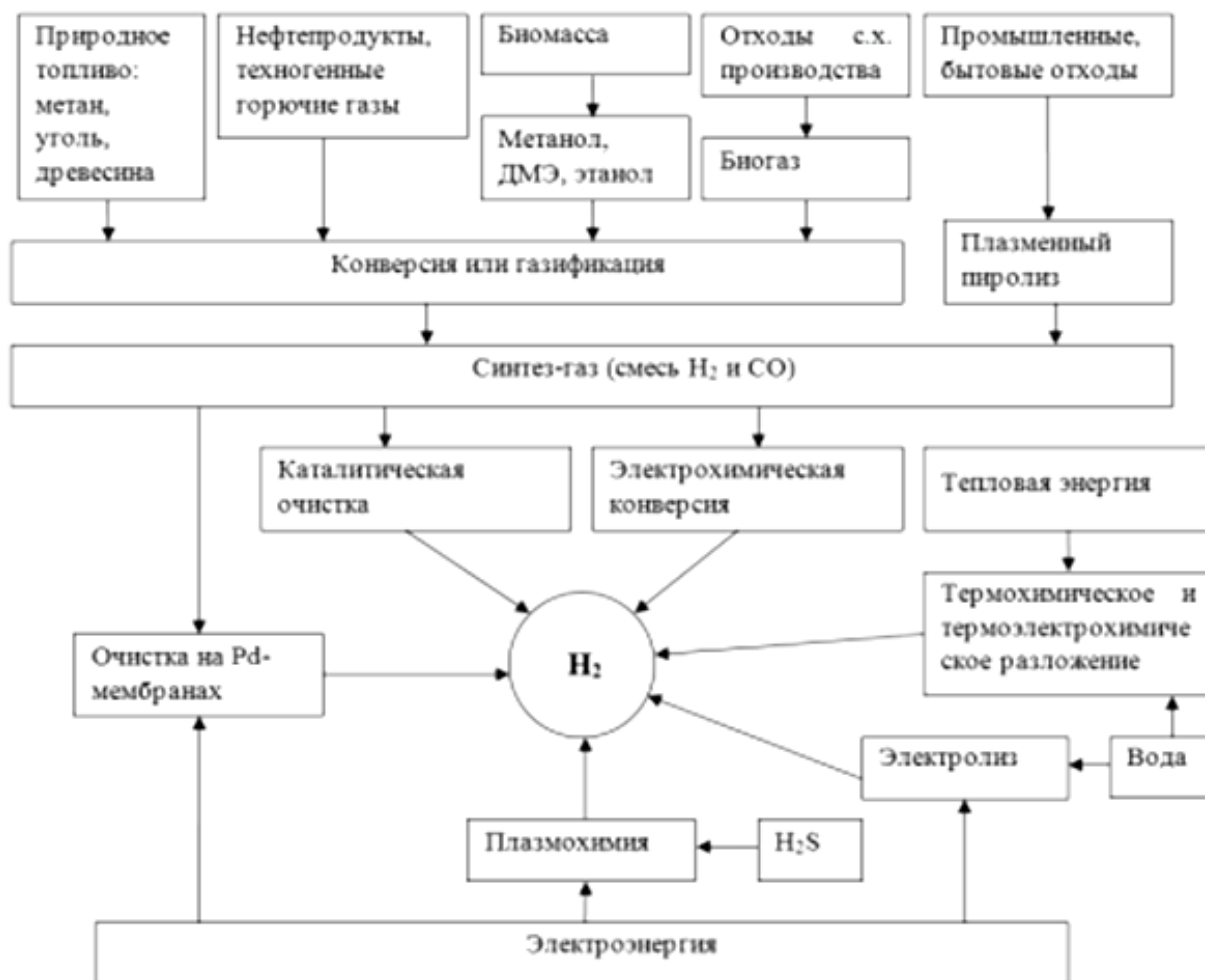
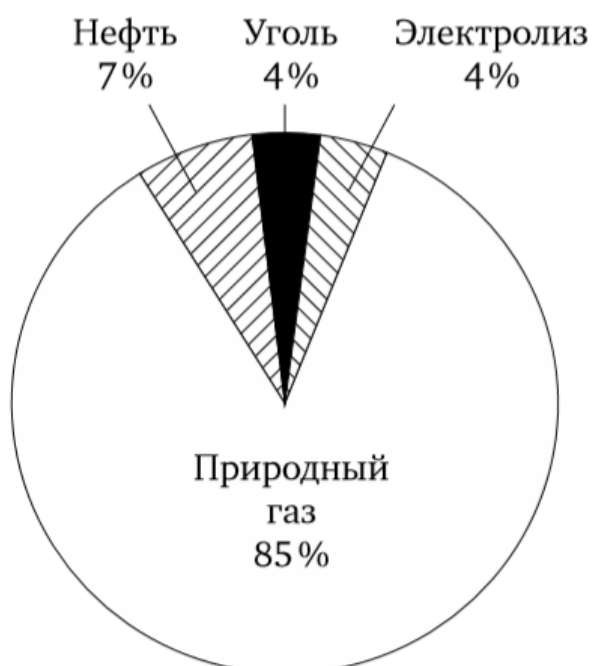


Рисунок 2 – Источники и пути получения водорода

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.		Фадеев В.В.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайливленко Т.А.			У	8	20
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайливленко Т.А.					
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.					
Способы получения водорода							

## Структура мирового производства водорода



85 % – Паровая конверсия природного газа

4 % – Газификация угля

4 % – Электролиз воды

7 % – Газообразные продукты переработки нефти

Рисунок 3 – Структура мирового производства водорода

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						
Разраб.		Фадеев В.В.			Структура мирового производства водорода		Лит.	Лист	Листов	
Руковод.		Михайливленко Т.А.					У	9	20	
Консульт.							Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16			
Н. контр.		Михайливленко Т.А.								
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.								

## Способы хранения водорода

Таблица 5 – Удельные показатели способов хранения водорода

Способ хранения	Удельное потребление, энергии кВт·ч/кг H <sub>2</sub>	Удельный объем хранения, дм <sup>3</sup> /кг H <sub>2</sub>	Удельная масса хранения, кг/кг H <sub>2</sub>
Газообразный водород при высоком давлении	0,93	81	16
Водород в гидридах	1,16	22	77
Жидкий водород	10,50	14	7
Криогенная адсорбция	3,20	59	20

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Фадеев В.В.			Способы хранения водорода	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайливленко Т.А.				У	10	20
Консульт.						Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайливленко Т.А.						
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.						

## Область применения водорода



Рисунок 4 – Основные области применения водорода

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Область применения водорода					
Разраб.		Фадеев В.В.						Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайливленко Т.А.						У	11	20
Консульт.								Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайливленко Т.А.								
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.								



## Тепловые циклы с применением водорода

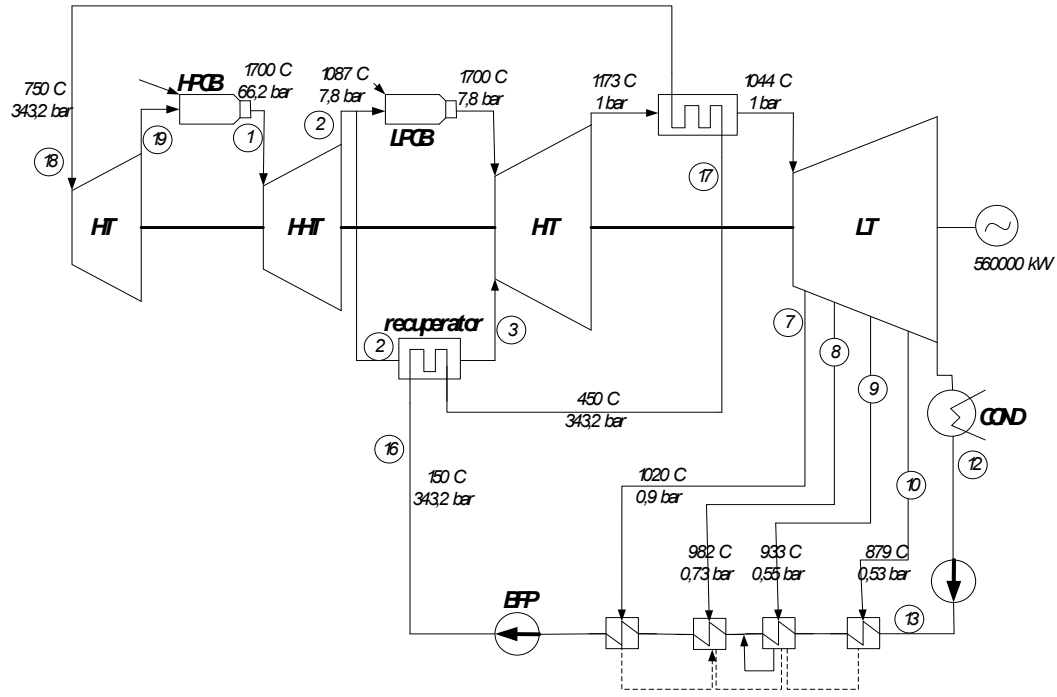


Рисунок 5 – Тепловая схема водородного энергоблока

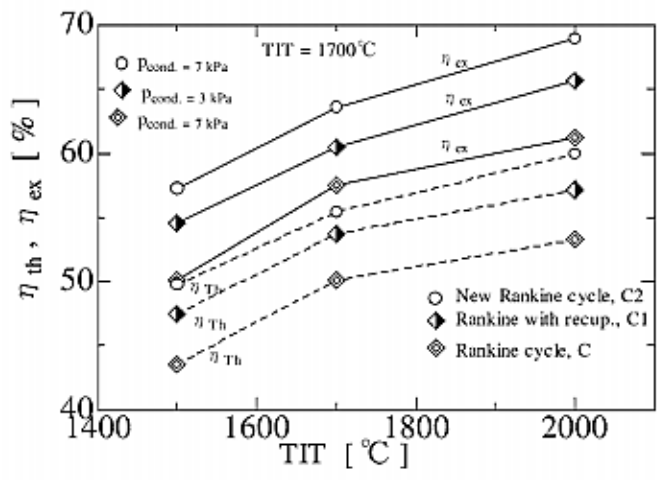


Рисунок 6 – Термический цикл водородного энергоблока

СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Фадеев В.В.		
Руковод.		Михайливленко Т.А.		
Консульт.				
Н. контр.		Михайливленко Т.А.		
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.		
Тепловые циклы с применением водорода				
		Лит.	Лист	Листов
		У	12	20
Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16				

## Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа

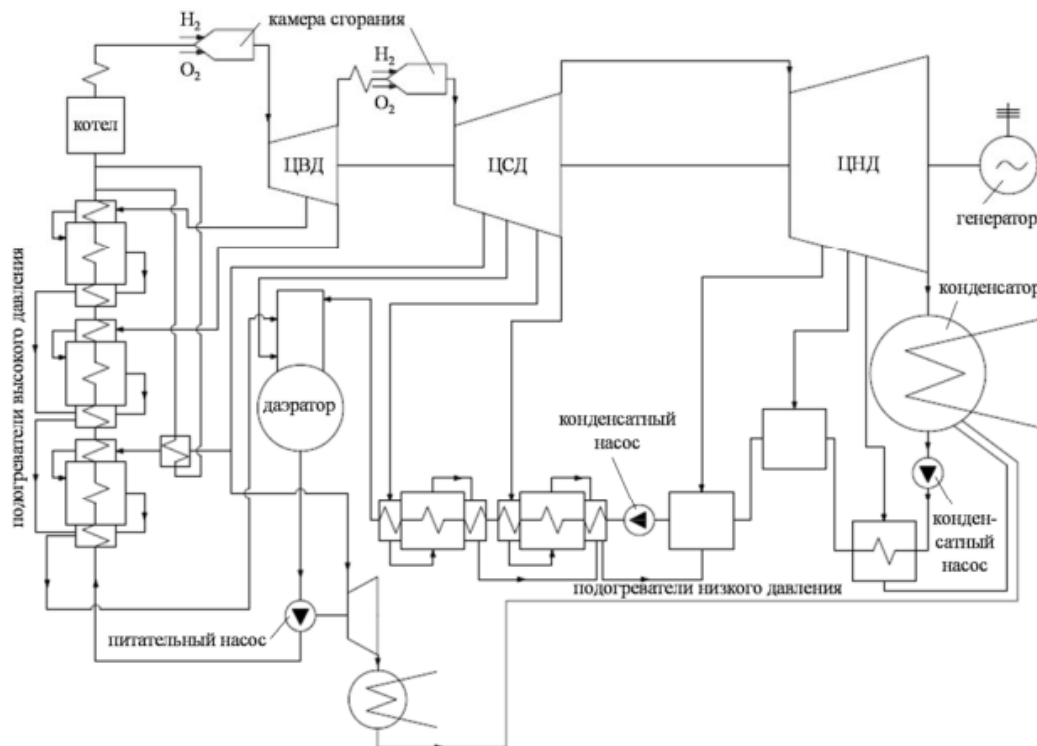


Рисунок 7 – Принципиальная тепловая схема гибридного энергоблока с двукратным водородным перегревом пара

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.		Фадеев В.В.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайлившенко Т.А.			У	13	20
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайлившенко Т.А.					
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.					

Применение пароперегревателей  
водородно-кислородного типа

## Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа

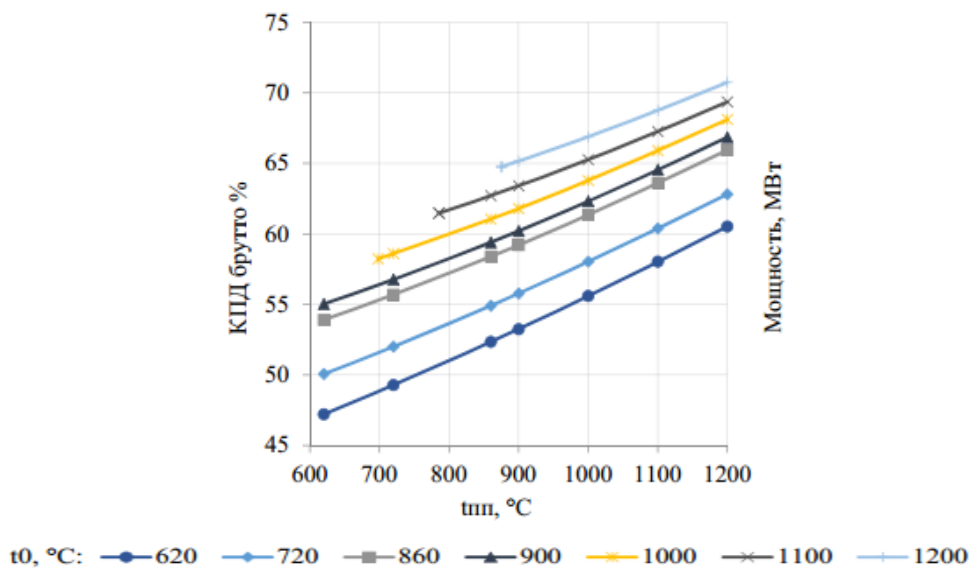


Рисунок 8 – КПД гибридного энергоблока с двукратным водородным перегревом пара

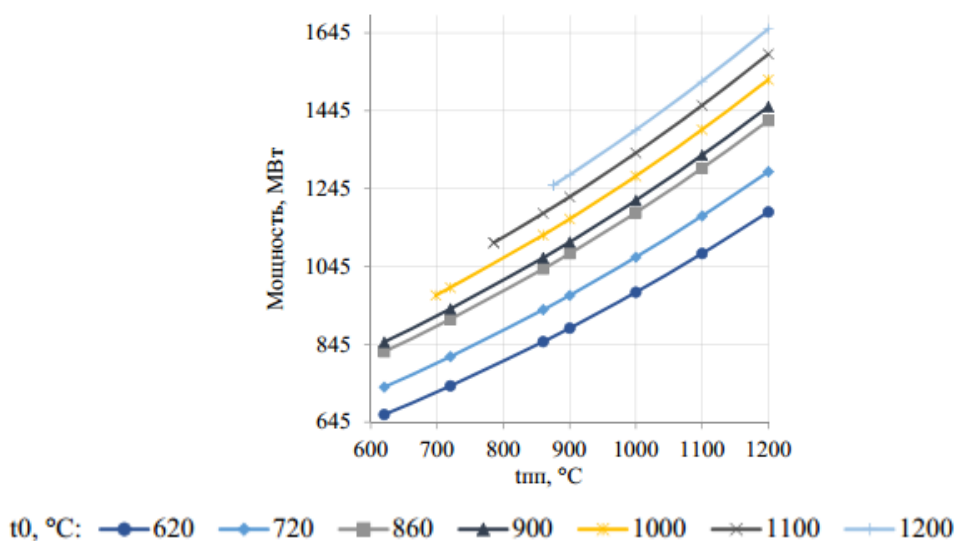


Рисунок 9 – Электрическая мощность гибридного энергоблока с двукратным водородным перегревом пара

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.	Фадеев В.В.				Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Михайливченко Т.А.				У	14	20
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.	Михайливченко Т.А.						
И.о. зав. каф.	Темлянцева Е.Н.						
					Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа		

## Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа

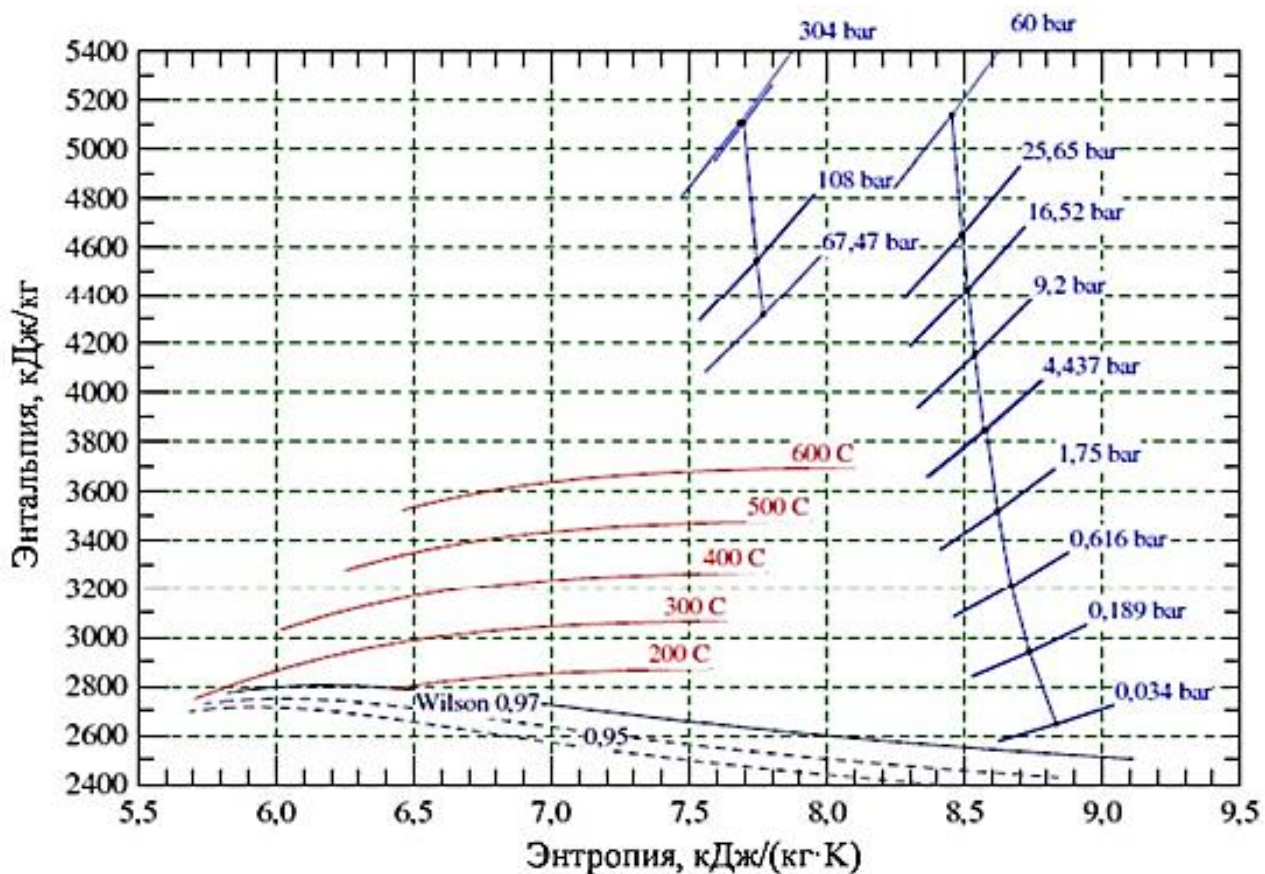


Рисунок 10 – Процесс расширения пара в турбине гибридного энергоблока с двукратным водородным перегревом пара

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.		Фадеев В.В.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайливленко Т.А.			У	15	22
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайливленко Т.А.					
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.					
					Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа		

# Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа

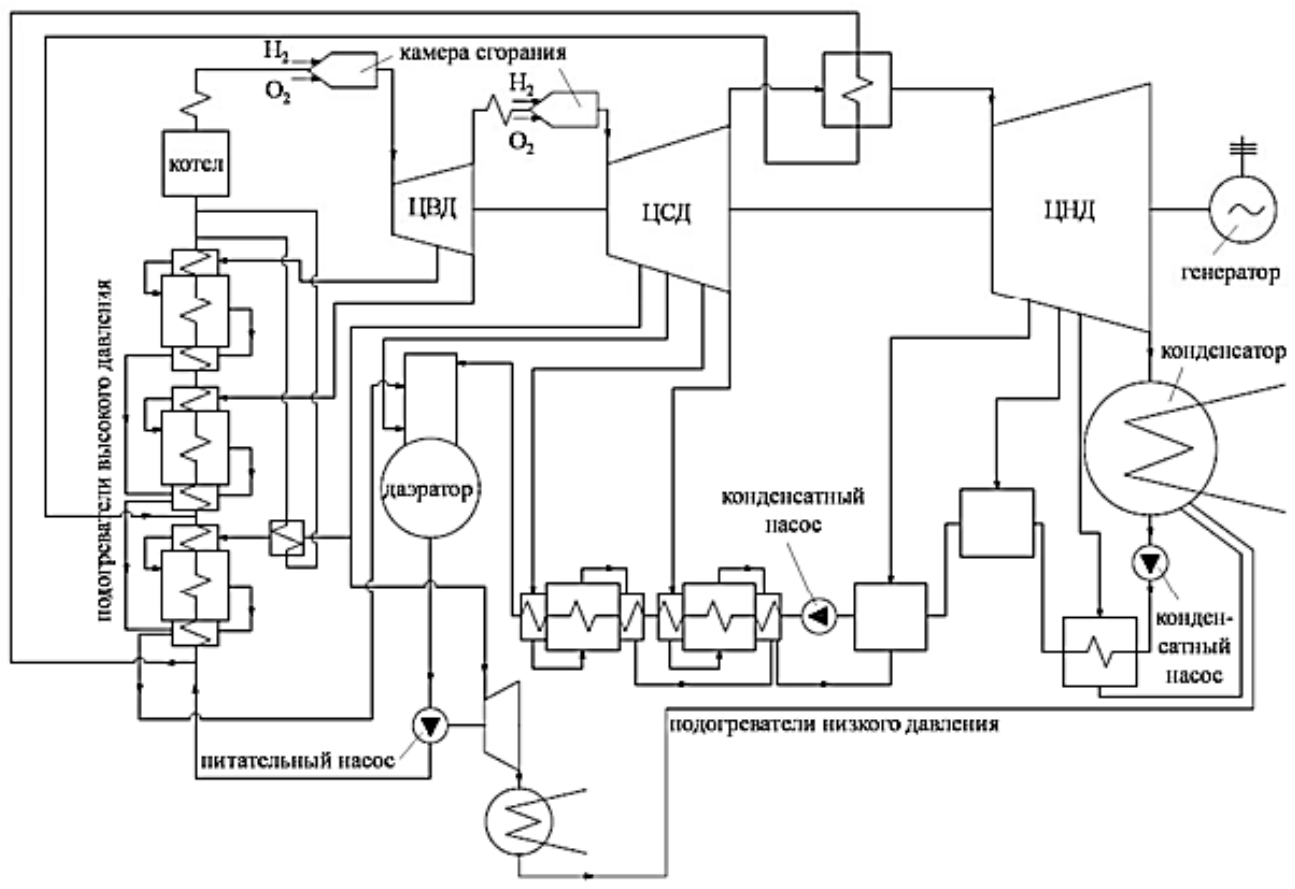
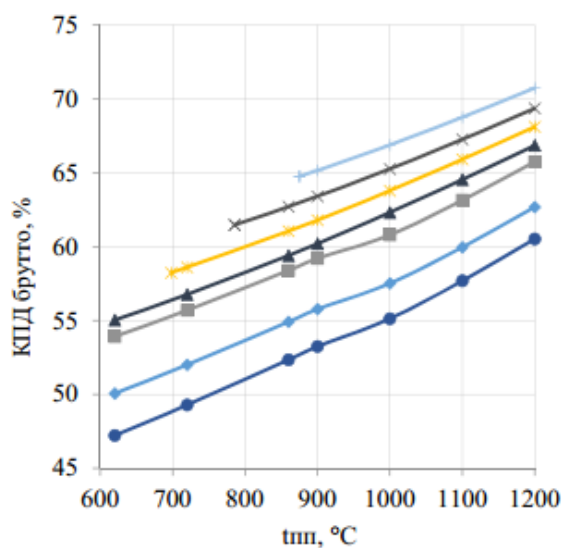


Рисунок 11 – Тепловая схема гибридного энергоблока с двукратным водородным перегревом пара и промежуточным пароохладителем

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.		Фадеев В.В.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайливленко Т.А.			У	16	22
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайливленко Т.А.					
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.					
					Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа		

## Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа



t<sub>0</sub>, °C: ● 620    ● 720    ■ 860    ▲ 900    ✖ 1000    ✖ 1100    ✖ 1200

Рисунок 12 – КПД гибридного энергоблока с двумя водородными пароперегревателями и промежуточным охладителем пара

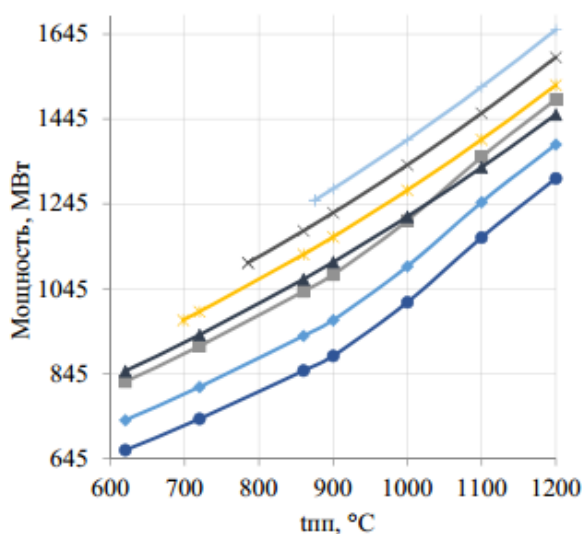


Рисунок 13 – Электрическая мощность гибридного энергоблока с двумя водородными пароперегревателями

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.	Фадеев В.В.				Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Михайливленко Т.А.				У	17	22
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.	Михайливленко Т.А.						
И.о. зав. каф.	Темлянцева Е.Н.						
					Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа		

## Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа

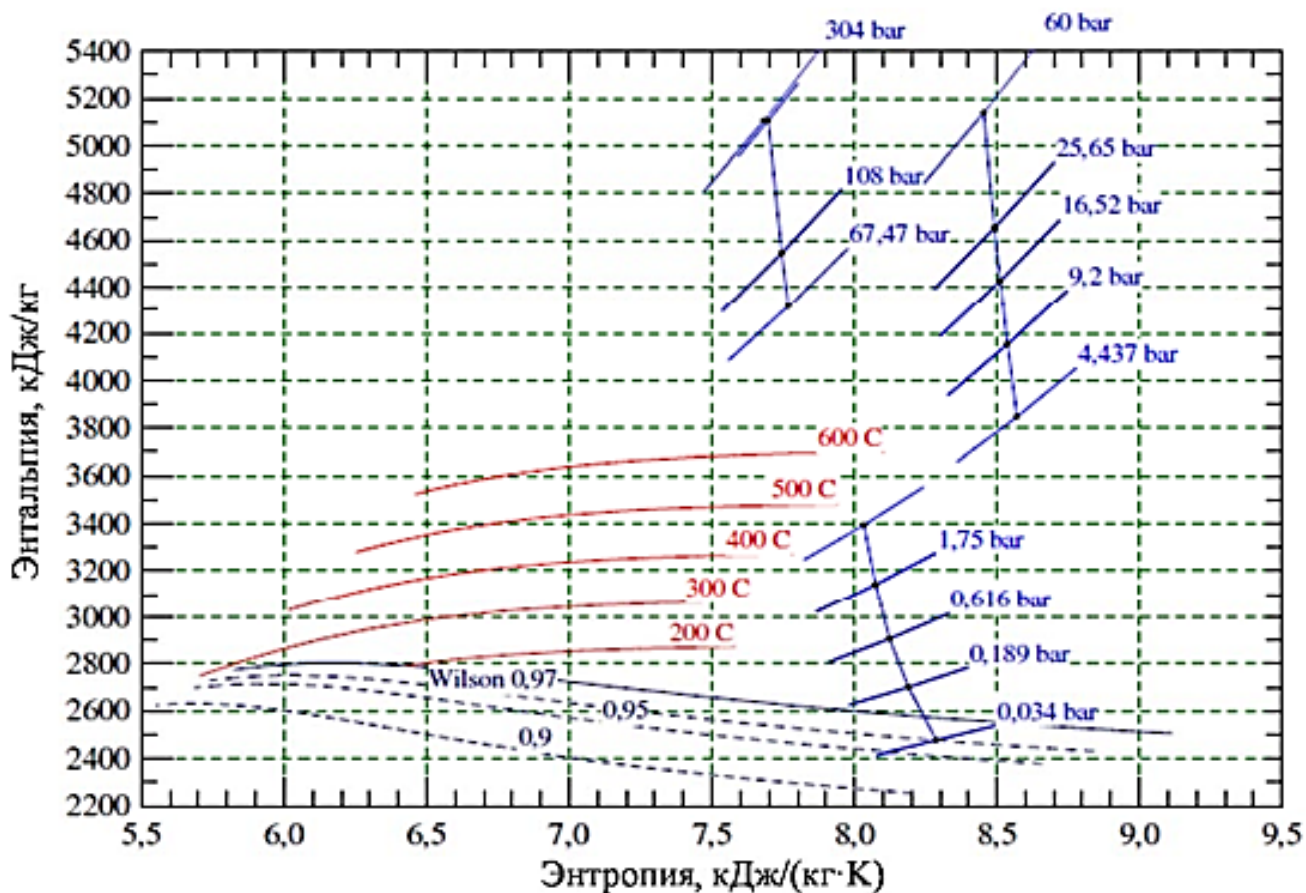


Рисунок 14 – Процесс расширения пара в турбине с двойным водородным перегревом и промежуточным охладителем

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.		Фадеев В.В.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайливченко Т.А.			У	18	22
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайливченко Т.А.					
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.					
					Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа		

# Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа

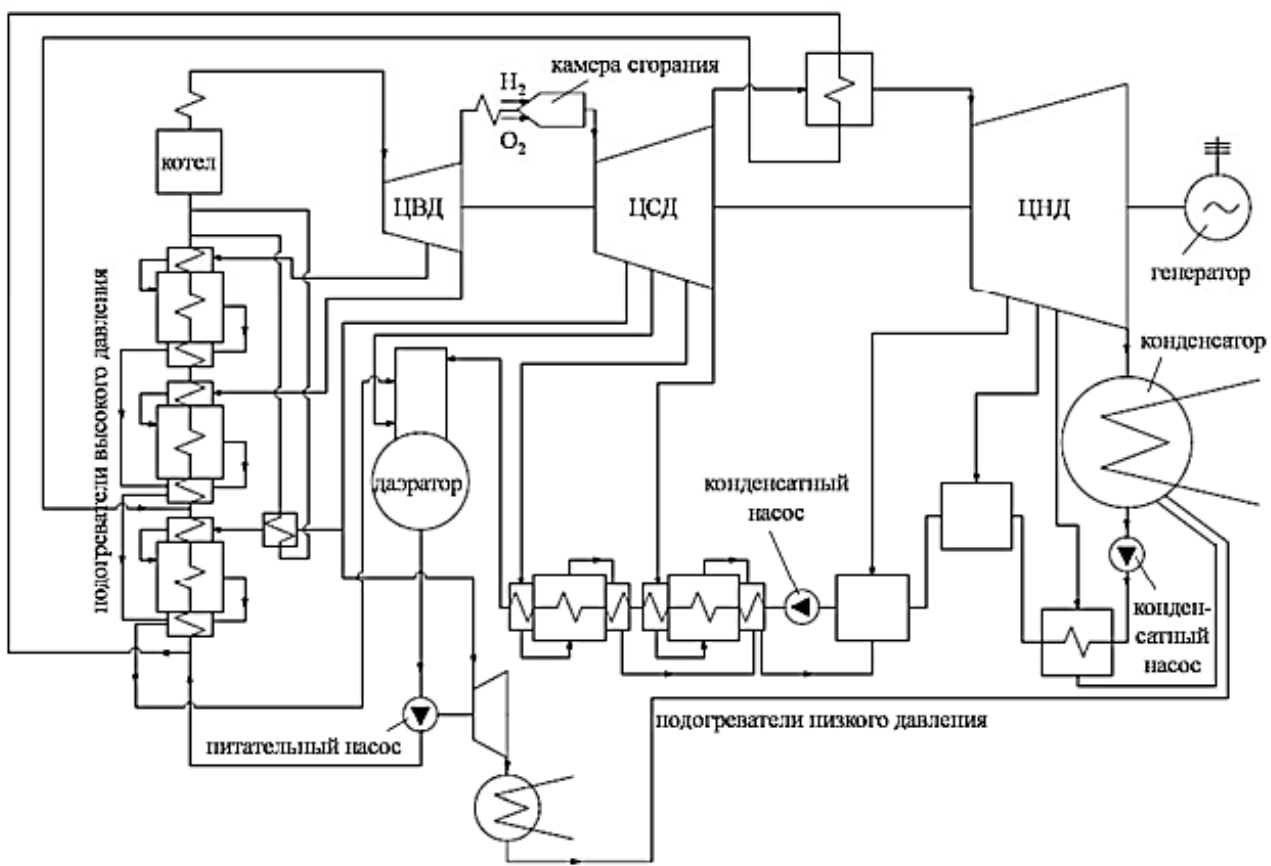


Рисунок 15 – Принципиальная тепловая схема гибридного энергоблока с однократным промежуточным водородным перегревом пара

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.		Фадеев В.В.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайливленко Т.А.			У	19	22
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайливленко Т.А.					
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.					
					Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа		



## Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа

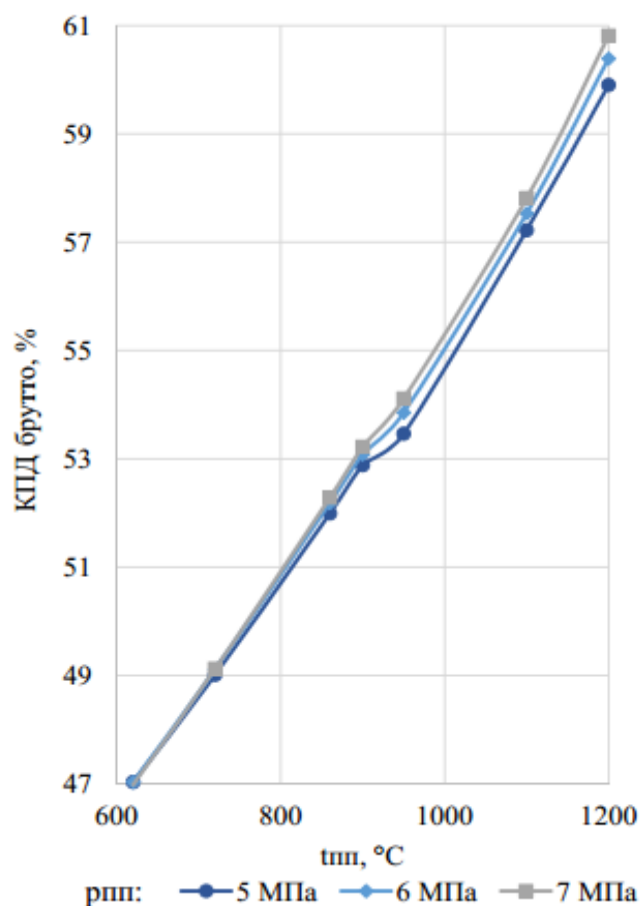


Рисунок 16 – КПД гибридного энергоблока с однократным водородным перегревом пара

СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Фадеев В.В.		
Руковод.		Михайливченко Т.А.		
Консульт.				
Н. контр.		Михайливченко Т.А.		
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.		
Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа»				
		Лит.	Лист	Листов
		У	20	22
Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16				

## Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа

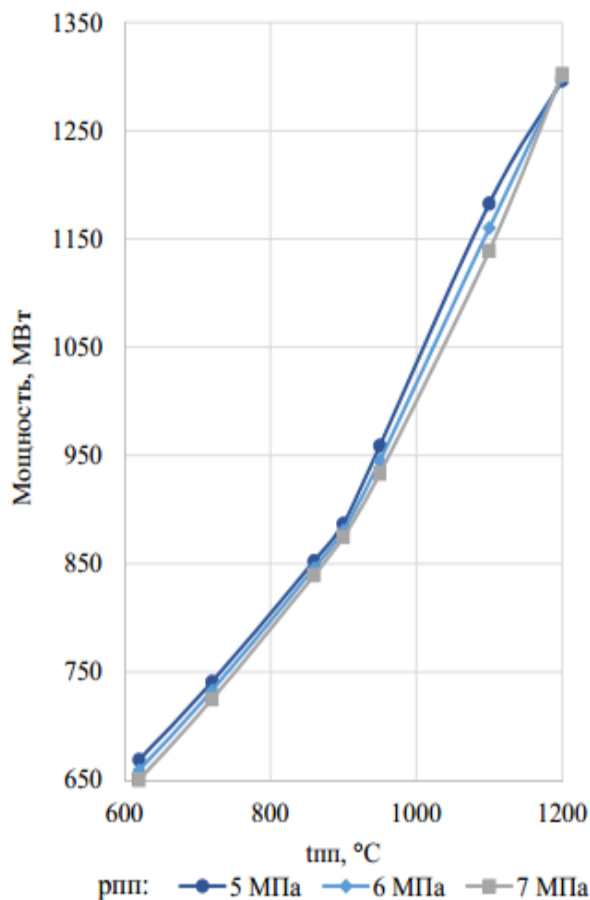


Рисунок 17 – Электрическая мощность гибридного энергоблока с однократным водородным перегревом пара

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.		Фадеев В.В.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Михайливченко Т.А.			У	21	22
Консульт.					Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.		Михайливченко Т.А.					
И.о. зав. каф.		Темлянцева Е.Н.					
					Применение пароперегревателей водородно-кислородного типа		

## Заключение

Одной из главных целей данной работы являлось всестороннее представление состояния водородной энергетики в мире. Водород, по сути являющийся «топливом будущего», служит источником энергии не только в транспорте, но и в энергетике, в частности, в тепловых электрических станциях.

На этапе освоения гибридных энергоблоков применение водородного промежуточного перегрева пара является наиболее целесообразным решением, поскольку позволяет увеличить электрическую мощность блока практически вдвое при одновременном увеличении КПД паротурбинной установки до 61 %, что находится на уровне лучших образцов парогазовых установок, имеющих гораздо более высокую начальную температуру рабочего тела.

Такое решение является более оправданным не только с термодинамической, но и с практической точки зрения, поскольку одним из основных узлов является водородно-кислородный пароперегреватель, конструкция которого достаточно хорошо отработана для рассматриваемого уровня давлений.

					СибГИУ 2020.13.03.01.16010.ВКР						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Заключение						
Разраб.	Фадеев В.В.								Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Михайливленко Т.А.								У	22	22
Консульт.									Кафедра теплоэнергетики и экологии Гр. МТ-16		
Н. контр.	Михайливленко Т.А.										
И.о. зав. каф.	Темлянцева Е.Н.										