



**Уральский  
федеральный  
университет**

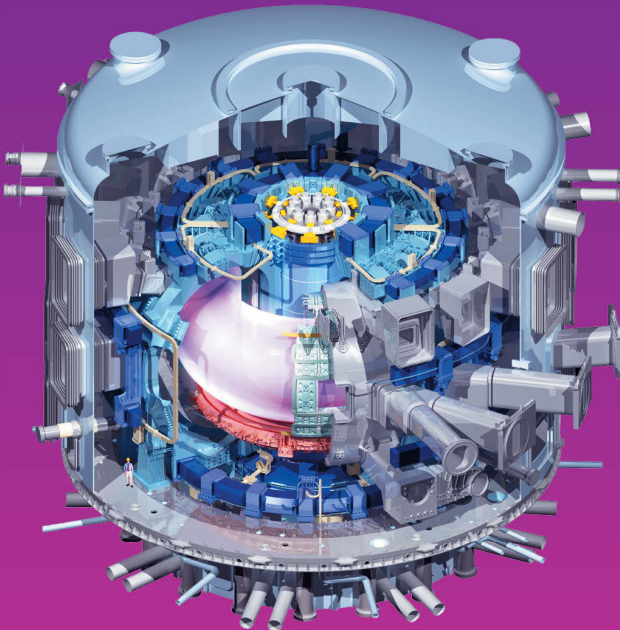
имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

**Уральский  
энергетический  
институт**

**Р. В. РАДЧЕНКО  
А. С. МОКРУШИН  
В. В. ТЮЛЬПА**

# ВОДОРОД В ЭНЕРГЕТИКЕ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**Р. В. Радченко**  
**А. С. Мокрушин**  
**В. В. Тюльпа**

# **ВОДОРОД В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Рекомендовано методическим советом УрФУ в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по дисциплинам «Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики» и «Проектирование АЭС» для студентов всех форм обучения по направлениям 140400.62 — Электроэнергетика и электротехника, 140100.62 — Теплоэнергетика и теплотехника, 141403.65 — Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2014

УДК 546.11:621.039(075.8)  
ББК 24.121я73+31.4я73  
P15

Рецензенты:

д-р техн. наук В. С. Белоусов (проф. каф. «Теплоэнергетика  
и теплотехника» Уральского энергетического института УрФУ);  
проф. А. И. Евпланов (каф. электротехники Уральского  
государственного горного университета)

Научный редактор — д-р техн. наук, проф. С. Е. Щеклеин

**Радченко, Р. В.**

P15 Водород в энергетике : учеб. пособие / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин,  
В. В. Тюльпа. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 229, [3] с.

ISBN 978-5-7996-1316-7

В данном пособии рассмотрен теоретический материал о способах получения, хранения водорода и основные направления научно-поисковых работ в области водородной энергетики. Проведено сравнение различных методов производства водорода и показаны перспективы развития водородной энергетики в России и за рубежом. Рекомендовано для студентов всех направлений Уральского энергетического института УрФУ.

Библиогр.: 48 назв. Рис. 60. Табл. 26. Прил. 1.

Подготовлено кафедрой Атомные станции и возобновляемые источники энергии

УДК 546.11:621.039(075.8)  
ББК 24.121я73+31.4я73

ISBN 978-5-7996-1316-7

© Уральский федеральный  
университет, 2014

# Оглавление

---

|  |     |
|--|-----|
| Введение.....  | 5   |
| 1. Ископаемые топлива .....  | 8   |
| 2. Основные вехи в истории водородной энергетики .....                                 | 11  |
| 3. Водород и его свойства .....  | 17  |
| 4. Получение водорода.....   | 22  |
| 4.1. Производство водорода из природных топлив .....                                   | 25  |
| 4.2. Получение водорода методом электролиза.....                                       | 30  |
| 4.3. Плазмохимия.....  | 42  |
| 5. Атомно-водородная энергетика .....  | 45  |
| 5.1. Использование ядерной энергетики для получения<br>водорода.....                   | 45  |
| 5.2. Реакторы для ядерного производства водорода.....                                  | 58  |
| 5.3. Концепция атомно-водородной энергетики .....                                      | 74  |
| 6. Термоядерная энергетика.....  | 78  |
| 6.1. Управляемый термоядерный синтез .....   | 78  |
| 6.2. Холодный ядерный синтез.....  | 94  |
| 7. Получение водорода<br>с помощью альтернативных источников энергии .....             | 109 |
| 8. Новые направления в получении водорода .....  | 122 |
| 8.1. Усовершенствование методов электролиза воды.....                                  | 122 |
| 8.2. Производство экологически чистых видов горючего<br>для автомобильных топлив ..... | 123 |
| 8.3. Фотогальванические процессы.....  | 133 |
| 8.4. Способ использования вещества мантии Земли<br>для получения водорода .....        | 136 |
| 8.5. Перспективы развития водородной энергетики<br>на основе алюминия.....             | 141 |

|  |     |
|--|-----|
| 9. Сравнение различных методов производства водорода.....  | 144 |
| 10. Хранение водорода.....   | 148 |
| 10.1. Классификация методов хранения водорода.....   | 148 |
| 10.2. Хранение газообразного водорода.....   | 149 |
| 10.3. Хранение жидкого водорода .....  | 152 |
| 10.4. Хранение и транспортирование водорода<br>в химически связанном состоянии.....                | 153 |
| 10.5. Гидридная система хранения водорода.....   | 155 |
| 10.6. Криoadсорбционное хранение водорода .....  | 157 |
| 10.7. Техничко-экономическая оценка<br>различных вариантов хранения водорода .....                 | 158 |
| 11. Использование водорода .....   | 161 |
| 11.1. ДВС на водороде.....   | 161 |
| 11.2. Топливные элементы .....   | 161 |
| 11.3. Никель-водородный аккумулятор.....   | 169 |
| 12. Современное состояние исследований и разработок<br>в области водородных энерготехнологий ..... | 173 |
| 13. Основные направления научно-поисковых работ<br>в области водородной энергетики.....            | 188 |
| Заключение.....  | 207 |
| Библиографический список .....   | 208 |
| Приложение. Глоссарий. Водородная энергетика<br>и топливные элементы (ТЭ) .....                    | 211 |

---

## Введение

---

**И**дея использования водорода в энергетике не нова. Еще в 80-е годы XX в. были разработаны двигатели на водородном топливе. Сегодня в США, в странах ЕЭС, в Японии, Китае приняты и реализуются национальные и международные программы по разработке элементов водородной энергетики, в том числе на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ), ведется активная пропагандистская кампания. В Мадриде, Риме, Амстердаме, Стокгольме и других европейских столицах ходят автобусы на водороде. Электромобиль с водородным двигателем приобрел премьер-министр Японии, а Исландия практически полностью переходит на водородную энергетику: водородные двигатели устанавливаются на катера, автомобили, источниками тепла на водороде отапливаются дома.

Стремление Европы и США развивать альтернативную энергетику понятно: в Европе своих нефтегазовых ресурсов нет, у США их немного. Переход на водородную энергетику с использованием ВИЭ позволит им перестать зависеть от поставщиков нефти и газа — России и стран ОПЕК (Организация стран экспортеров нефти), а также решить экологические проблемы.

В России с запасами нефти и угля ситуация другая: нефть пока есть и угля достаточно много. Однако не стоит особо на это надеяться. Относительно мировых цен наша нефть дорогая, и запасы ее в недалеком будущем закончатся, бурить придется все глубже и глубже, соответственно добыча будет обходиться с каждым разом дороже.

В России, к тому же, в последние годы обострился процесс физического и морального старения электростанций и сетей, которые сооружались по проектам полувековой давности и уже не соответствуют современным требованиям к энергоустановкам в области экологии, эффективности использования топлива, надежности и безопасности.

Кроме того, российские города, как и западные, задыхаются от газовых выбросов. Поэтому в любом случае придется искать альтернативные источники для обеспечения собственных энергетических нужд. Возможности для разработки новых возобновляемых источников энергии у российской науки есть: в предыдущие годы создан существенный задел, остались и специалисты, способные его развить и реализовать.

Из всего спектра проблем, накопившихся в энергетике, можно выделить следующие:

- проблема энергоресурсов, главным образом невозобновляемых, связанная с ситуацией, складывающейся в мире, и ведущая к тому, что к середине XXI века выработка электроэнергии с использованием нефтепродуктов и газа будет резко снижаться и потребуются замещение этих видов энергоресурсов для целей электроэнергетики;
- проблема, связанная с выбросами и отходами при производстве электроэнергии; работа ТЭС чревата возможностями глобальных климатических изменений, к которым в первую очередь относятся глобальное потепление, или парниковый эффект, связанный, главным образом, с выбросами оксида углерода, и кислотные дожди, вызываемые выбросами оксидов азота и серы; АЭС производят электроэнергию без выбросов парниковых газов, однако перспектива дальнейшего развития этих электростанций зависит от успехов по удалению отходов.
- проблема воздействия электрических и магнитных полей, создаваемых сетями высокого и сверхвысокого напряжения (значение этой проблемы в настоящее время полностью еще не выяснено);
- проблема, касающаяся повышения коэффициента полезного действия электроэнергетики, начиная от стадии преобразования энергоресурсов в электроэнергию и кончая ее потреблением;
- проблема организационной структуры объединенных и национальных энергосистем, которые до последнего десятилетия XX века во всех странах представляли вертикально интегрированные системы с жестким государственным регулированием их хозяйственной деятельности, что стало тормозить дальнейшее развитие электроэнергетики; экономический эффект от концентрации производства электроэнергии и централизации ее распределения с ростом энергосистем проявляется все в меньшей степени, этим вызваны проходящие во многих странах процессы реструктуризации и дерегулирования электроэнергетики.

Единственный способ справиться с данными проблемами — перейти на новый технологический уровень, обеспечивающий существенно более высокие показатели эффективности, лучшую защиту окружающей среды и большую надежность.

К решению этих проблем есть много подходов. В первую очередь — развитие возобновляемых источников, таких как ветро-, гелио- и гидроэнергетика, а также атомной энергетике. Однако поскольку эти источники должны быть привязаны к конкретным местностям и вполне специфически рассредоточены на этих территориях, то они не позволяют решить задачи обеспечения энергией крупных промышленных предприятий и транспорта.

Водородная энергетика также соответствует мировым тенденциям автономного и локального энергопотребления. В европейских энергетических программах фигурирует понятие «домашняя электростанция». Такие мини-электростанции мощностью не более 5 кВт, использующие, например, высокотемпературные ТЭ, экологичны уже потому, что позволяют производить столько электроэнергии, сколько необходимо потребителю, и расходовать ее без потерь, неизбежных в большой энергетике с ее тысячекилометровыми линиями электропередач.

Распределенная энергетика очень удобна для удаленных регионов, куда трудно протянуть ЛЭП, и для дачных поселков, что характерно для России. Сейчас в такие районы завозят топливо или сжигают дерево для обогрева и используют дизель-генератор для получения электроэнергии. И то, и другое малоэффективно.

Децентрализованное энергоснабжение надежнее. Сегодня, чтобы лишить электроэнергию огромный город или даже регион, достаточно нарушить линию электропередач, идущую от большой электростанции. Так в свое время Грузия осталась без электричества, когда в горах были разрушены ЛЭП.

Возникает вопрос: если энергоустановки на водороде обладают столькими преимуществами, почему же человечество до сих пор полностью на них не перешло?

Главная проблема — стоимость. Она сегодня непомерно высока — от 10 до 20 тыс. долл. за 1 кВт установленной мощности. Чтобы обогреть трехкомнатную квартиру, надо 10 кВт, плюс питание электроприборов (около 2 кВт) — всего получается 12. Таким образом, потребуется установка стоимостью минимум 120 тыс. долл., а чтобы обеспечить электроэнергией коттедж площадью 200 м<sup>2</sup>, нужно около 400 тыс. долл.

Именно задача существенного снижения стоимости (не менее чем в 10 раз) энергоустановок на водороде стоит перед учеными в рамках комплексной программы «Водородная энергетика и топливные элементы», которую согласился финансировать «Норильский никель» и которая выполняется в основном институтами РАН.

Вероятнее всего, именно водородная энергетика закрывает вопросы: как сделать все возможные источники энергии более совместимыми между собой, как сделать их совокупное влияние на окружающую среду минимальным. Потому что этот источник энергии является более универсальным, более гибким в использовании и экологически более чистым.

Ситуация здесь подобна той, которая возникла в конце XIX века при переходе от «века пара» к «веку электричества», когда более удобные и эффективные электрические системы вытеснили паровые машины.



---

# 1. Ископаемые топлива

---

Существуют три основных вида ископаемых энергоносителей: уголь, нефть и природный газ. Примерные значения теплоты сгорания этих видов топлива, а также разведанные и промышленные (т. е. допускающие экономически рентабельную разработку при данном уровне техники) запасы нефти представлены в табл. 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1

**Теплотворная способность ископаемых топлив**

| Топливо                                  | Теплотворная способность, ГДж |
|--|-------------------------------|
| 1 т каменного угля                       | 30,5                          |
| 1 т нефти                                | 46,6                          |
| 1000 м <sup>3</sup> (н.) природного газа | 38,5                          |
| 1 т бензина                              | 47,0                          |

Таблица 1.2

**Мировые запасы нефти (ориентировочные данные за 2013 г.)**

| Регион                                       | Разведанные запасы, млрд т |
|--|----------------------------|
| Венесуэла                                    | 46,58                      |
| Ближний Восток,<br>в т. ч. Саудовская Аравия | 317,00<br>36,52            |
| Канада                                       | 28,09                      |
| Россия                                       | 12,74                      |
| США  | 5,37                       |
| Казахстан                                    | 3,93                       |
| Китай  | 2,47                       |
| Европейский союз                             | 0,91                       |
| Австралия                                    | 0,44                       |
| Великобритания                               | 0,41                       |
| Узбекистан                                   | 0,081                      |
| Всего  | 238,20                     |

*Запасы нефти и природного газа.* Трудно точно рассчитать, на сколько лет еще хватит запасов нефти. Если существующие тенденции сохранятся, то годовое потребление нефти в мире к 2018 г. достигнет 3 млрд т. Даже до-

пуская, что промышленные запасы существенно возрастут, геологи приходят к выводу, что к 2030 г. будет исчерпано 80% разведанных мировых запасов нефти.

*Запасы угля.* Запасы угля оценить легче (см. табл. 1.3). Три четверти мировых его запасов, составляющих по приближенной оценке 10 трлн т, приходятся на страны бывшего СССР, США и КНР.

Хотя угля на Земле гораздо больше, чем нефти и природного газа, его запасы не безграничны. В 1990-х годах мировое потребление угля составляло более 2,3 млрд т/год. В отличие от потребления нефти, потребление угля существенно увеличилось не только в развивающихся, но и в промышленно развитых странах. По существующим прогнозам, запасов угля должно хватить еще на 420 лет. Но если потребление будет расти нынешними темпами, то его запасов не хватит и на 200 лет.

Таблица 1.3

**Мировые запасы угля (ориентировочные данные за 2013 г.)**

| Регион           | Запасы каменного угля,<br>млн т | Запасы<br>всего угля, млн т |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| США              | 108501                          | 237295                      |
| Россия           | 49088                           | 157010                      |
| Китай            | 62200                           | 114500                      |
| Австралия        | 37100                           | 76400                       |
| Европейский союз | 4883                            | 56082                       |
| Казахстан        | 21500                           | 33600                       |
| Канада           | 3474                            | 6582                        |
| Венесуэла        | 479                             | 479                         |
| Великобритания   | 228                             | 228                         |
| Всего            | 403199                          | 891531                      |

В этой связи в последнее время во всем мире все больше внимания уделяется перспективам развития водородной энергетики.

Водород — это высокоэффективное и экологически чистое топливо. В наши дни крупномасштабное использование водорода освоено в промышленных химических процессах и ракетной технике. Производство водорода в мире превысило 50 млн т и быстро растет. При дальнейшем развитии этот энергоноситель мог бы служить источником энергии для локального производства электричества и тепла, бытового энергоснабжения, аккумуляции энергии, для транспорта, в том числе для заправки автомашин. Будучи произведенным из воды с помощью возобновляемых или ядерных ресурсов и технологий, водород становится возобновляемым топливом, способствующим устойчивому развитию мирового сообщества.

Еще одним достоинством водорода как возобновляемого источника энергии является возможность прямого преобразования энергии химической реакции его соединения с кислородом в электрический ток в так называемых топливных элементах. Водородные источники тока часто воспринимают, как идеальное решение глобальных проблем энергетики — их использование полностью исключает возможность эмиссии веществ, загрязняющих окружающую среду. Такие топливные элементы можно применять для транспортировки и хранения энергии, генерируемой 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.

---

## 2. Основные вехи в истории водородной энергетики

---

**И**дея широкомасштабного использования водорода как искусственного топлива, получаемого электролизом воды, появилась в научно-фантастическом романе Жюль Верна «Таинственный остров» (1874 г.). Первые попытки ее реализации относятся к 1920–1930 гг., когда в Канаде было освоено промышленное производство водородно-щелочных электролизёров и принята первая программа в области создания водородных энергосистем на основе первичной электроэнергии, вырабатываемой на ГЭС. Данная программа выполнялась до 1936 г., после чего была свернута по причине сдвига приоритета канадского рынка энергосистем в сторону потребления дешевого природного газа. В 20–40-е годы XX века основная активность европейских ученых и инженеров в области водорода была направлена на адаптацию тепловых машин, в первую очередь двигателей внутреннего сгорания (ДВС), для работы на нетрадиционных топливах, в том числе водороде. Результаты, полученные, в основном, в Германии и Великобритании, показали принципиальную возможность такого подхода. Было показано, что использование водорода при соответствующей переделке топливной системы (переход к внутреннему смесеобразованию) позволяет увеличить мощность двигателя на 10% и более. Использование водорода в качестве добавки к традиционному моторному топливу позволило повысить экономичность двигателей при снижении вредных выбросов в атмосферу. Всего, за этот период на нетрадиционные топлива, включая водород, было конвертировано от 1 до 4 тысяч единиц автотранспортных средств, причем стоимость такой переделки, как было подсчитано позднее, не превышала нескольких сот долларов США за единицу (в ценах 1970 г.). Указанные разработки, основной вклад в которые внес немецкий инженер Р. Эррен, стали важным заделом последующих работ по использованию водорода на автотранспорте, возобновленных в 1970-х гг.

Интересно отметить, что в годы Второй Мировой войны исследования и разработки в указанном и смежных направлениях даже интенсифицировались. Хорошо известно, что в Германии в годы войны широко использовались синтетическое моторное топливо, производимое путем гидрогенизации угля. В СССР в условиях блокадного Ленинграда грузовой автотранспорт был переоборудован на водородное топливо, бравшееся из отработавших

свой ресурс аэростатов войск ПВО. Указанные работы проводились под руководством техника-лейтенанта Б. И. Шелища.

С 1942 г. особый интерес к водородным разработкам (автономная энергосистема для дизельной подводной лодки, использующая в качестве топлива для подводного плавания сжатые водород и кислород, получаемые электролизом воды) проявляют военно-морские флоты разных стран.

В некоторых странах, отрезанных в годы войны от поставок нефти (например, Австралия), были начаты крупные программы по внедрению крупномасштабного производства водорода и его использованию как моторного топлива. С послевоенным возобновлением поставок дешевой нефти эти программы были приостановлены.

С 1950 г. интерес к водороду возобновился в связи с успехами в разработках топливных элементов (ТЭ). Хотя ТЭ были изобретены еще в XIX в., первые пригодные к практическому использованию образцы появились в начале 1950-х гг. в Великобритании и ФРГ. В последствии (70–80-е гг.) данные разработки имели большое значение для реализации космических программ США и СССР и позднее (к середине 90-х гг.) их развитие привело к коренному пересмотру концепции водородных энергосистем, поскольку использование ТЭ позволило существенно повысить эффективность генерации электроэнергии на стадии использования водорода потребителями.

Бурное развитие исследований и разработок, проводимых в мире в области водородной энергетики и технологии, пришлось на 1974–1983 гг. и являлось прямым следствием энергетического кризиса, охватившего в то время большое число промышленно развитых стран. С середины 1970-х гг. начинается интенсивный обмен информацией и международная кооперация деятельности занимающихся водородом групп, которые до этого большей частью работали независимо друг от друга. В конце 1974 г. создается Международная ассоциация по водородной энергетике (International Association for Hydrogen Energy, IAHE) — сообщество ученых, инженеров и менеджеров, эффективно способствующих этому процессу. Основным направлением деятельности Ассоциации является информационное обеспечение исследований и разработок в области водородных технологий, а также ознакомление с ними широкой общественности и правительственных кругов стран мира. С этой целью Ассоциацией раз в два года организуются представительные Всемирные конференции по водородной энергетике (World Hydrogen Energy Conferences) и издается Международный журнал по водородной энергетике (International Journal of Hydrogen Energy). Ассоциация активно способствовала учреждению в различных странах мира Национальных ассоциаций по водородной энергетике, которых к настоящему времени насчитывается несколько десятков.

Изменение конъюнктуры на мировом рынке энергоресурсов во второй половине 1980-х гг. привело к некоторому снижению темпов роста

интенсивности исследований и разработок в области водородной энергетики и технологии. Особенно это было характерно для США, где при администрации Рейгана бюджет программ по возобновляемым источникам энергии и водороду был урезан на 80%. Основным фактором, сдерживающим интерес политиков и бизнесменов к работам по водородной энергетике, был экономический. В первую очередь это относилось к высокой себестоимости производства водорода (в особенности методом электролиза). Немалую роль также сыграло некоторое разочарование американских ученых, которые возлагали до этого слишком большие надежды на возведенную в ранг панацеи концепцию водородной энергетики и питали иллюзии в отношении ее быстрой реализации. Подход европейских и в особенности, японских научно-технических, деловых и правительственных кругов был более реалистичным. Здесь осознавали, что широкомасштабное внедрение водородных технологий будет требовать длительного периода интенсивной работы, исчисляемого многими десятилетиями. Так, в Японии уже в 1974 г. стартовал долгосрочный проект “Sunshine”, который выполнялся до 2000 года. Это была самая крупная программа по альтернативной энергетике, по размаху сравнимая с американской космической программой «Аполлон». Всего было израсходовано около 15 млрд долл., из них 3,6 млрд составлял водородный бюджет. В 1976 г. Международное энергетическое агентство (International Energy Agency, IEA) со штаб-квартирой в Париже начало финансирование водородных работ. В 1978 г. бюджет водородной программы IEA составлял порядка 16 млн долл. США, распределенных на несколько лет. Вместе с тем общие тенденции расширения применения водорода в энергетике и технологии, хотя и сохранились, но стали менее динамичными.

Важной вехой в развитии водородной энергетики и технологии явились результаты экономических исследований, проведенных в конце 1980-х гг. в НИИ чистой энергии при университете Майями (University of Miami’s Clean Energy Research Institute), США. В них было проведено детальное обоснование подсчета экономического ущерба от загрязнения атмосферы промышленными и транспортными выбросами и предложена методика введения соответствующих поправок в экономические расчеты. С учетом данных поправок экологическая чистота водорода сделала его использование потенциально рентабельным в целом ряде производств.

В целом период с середины 1970-х до конца 1990-х гг. характеризовался углубленными исследованиями и разработками, заложившими научно-технические основы современных водородных технологий. Значительные успехи были достигнуты в области производства водорода с использованием возобновляемых источников энергии. Были усовершенствованы и доведены до опытно-промышленных демонстрационных образцов базовые технические решения электролизёров различных типов с улучшенными характе-

ристиками. Параллельно развивались родственные разработки топливных элементов, имеющих более высокую эффективность, больший срок службы и надежность, чем существующие ранее образцы. Появились принципиально новые технические решения электрохимических систем (новое поколение электролизёров и топливных элементов с твердым полимерным или твердым оксидным электролитом), использующих водород и другие альтернативные топлива. Также были разработаны принципиально новые экологически чистые технологии производства водорода, например, биохимическая и фотокаталитическая.

Динамично развивались также методы использования водорода как топлива для тепловых двигателей и энергоустановок. В ряде стран (США, Германия, Япония, СССР) в 1970–1980 гг. были созданы демонстрационные образцы автомобилей и другого транспорта с ДВС на водородном топливе либо с добавками водорода. В 90-х гг. появились первые образцы автомобилей и автобусов с электродвигателями, работающими от мобильных энергоустановок на топливных элементах.

В это же время был выполнен ряд крупных разработок по использованию водорода как авиационного или космического топлива. В США (программа “Space Shuttle”) и СССР («Буран-Энергия») были созданы крупные ракеты-носители, главные двигатели которых использовали жидкий водород в качестве топлива и жидкий кислород как окислитель. Первое успешное испытание самолета на водороде (экспериментальная модель Ту-155, выполненная на базе серийного самолета Ту-154, один из трех двигателей которого работал на жидководородном топливе) прошло в СССР в апреле 1988 г. Месяц спустя в США был испытан легкий (четырёхместный) с одним двигателем, топливом для которого был только водород.

Существенный прогресс был достигнут и в области решения сложной технологической проблемы компактного хранения водорода. Было разработано новое поколение композитных газовых баллонов высокого давления, позволивших существенно увеличить весовую и объемную плотность хранения водорода в виде сжатого газа. Также были усовершенствованы технологии ожижения водорода и его хранения в жидком состоянии. Получили интенсивное развитие новые разработки по физико-химическим методам хранения водорода в связанном состоянии, включая металлгидридные технологии. Одним из важных результатов, полученных в ходе исследований и разработок по последнему направлению, явилось создание к началу 1990-х гг. высокоэффективных никель-металлогидридных аккумуляторов электроэнергии, которые в настоящее время занимают значительный сегмент мирового рынка компактных химических источников тока.

Большое число новых разработок, выполненных за рассматриваемый период, было посвящено использованию водорода в бытовых целях (отопление, горячее водоснабжение, приготовление пищи). Указанные разработки

в основном использовали каталитическое горение водорода; в результате был создан (на уровне демонстрационных прототипов) целый ряд высокоэффективных, экономичных и удобных устройств. Кроме этого, была показана осуществимость и перспективность новых технических решений тепловых установок бытового и промышленного назначения (системы отопления, холодильники и кондиционеры, системы транспортировки низкопотенциального тепла и т. п.), основанных на использовании водородных металлогидридных технологий.

Основным результатом работы международного сообщества ученых и инженеров в области водородных энергосистем в 1970–1990 гг. стало то, что данное направление к концу 1990-х гг. вышло за рамки исследований и опытных разработок и перешло к стадии коммерциализации. К работам в данной области подключились крупные коммерческие компании, в первую очередь, автомобильные (General Motors, Daimler-Benz, Toyota, BMW, Ford, Volvo и др.), нефтеперерабатывающие (Royal Dutch/Shell), энергетические (Norsk Hydro, Tokyo Electric Utility). С 1989 г. начинается разработка стандартов в области водородной энергетики и технологии, для чего в Цюрихе по инициативе Международной организации по стандартам (ISO) создается постоянно действующий международный комитет. Успешно выполняется ряд крупных международных проектов по созданию демонстрационных образцов новой техники в области водородной энерготехнологии. Так в результате выполнения совместно Германско-Саудовского проекта “HYSOLAR” в 1994 г. в районе Эр Рияда была запущена первая крупная установка по производству водорода с использованием солнечной энергии. В том же году в Европе появляются первые водородные автобусы на топливных элементах, созданные в рамках проекта Euro-Quebec Hydro-Hydrogen (Канада — ЕС). Одним из результатов работ по уже упоминавшемуся Японскому проекту “Sunshine” (с 1993 г. преобразован в коммерческую международную программу WE-NET с бюджетом около 2 млрд долл. США до 2030 г.) явилось создание на базе компании Tokyo Electric Utility одной из первых в мире электростанций (11 МВт) на топливных элементах.

Существенный вклад в развитие водородной энергетики и технологии в рассматриваемый период внесли многочисленные группы, работавшие в СССР. Их работы координировались Всесоюзной Комиссией по водородной энергетике, созданной по инициативе академика В. А. Легасова, и охватывали практически все направления данной проблемы.

По комплексной программе «Водородная энергетика и топливные элементы», которая выполняется институтами РАН и финансируется «Норильским никелем», работает и уральская команда из восьми институтов: Институт электрофизики (головная организация), Институт высокотемпературной электрохимии, Институт химии твердого тела УрО РАН, Институт химии твердого тела и механохимии, Институт теплофизики, Институт



катализа и Институт сильноточной электроники СО РАН; Институт физики твердого тела РАН.

В Институте высокотемпературной электрохимии разрабатывается вся гамма электрохимических устройств: от электролизёров и конверторов для производства водорода до топливных элементов для получения электроэнергии и тепла. Созданием топливных элементов ИВТЭ занимается с момента его основания, то есть более 50 лет. Пока до внедрения разработок электрохимиков дело не дошло. Во-первых, не так легко найти производство, способное воспринять эти наукоемкие технологии, во-вторых, на это требуются большие средства. Зато сегодня у электрохимиков оказался серьезный задел.

Сотрудники Института химии твердого тела имеют многочисленные разработки функциональных материалов различного назначения, в том числе и представляющих интерес в связи с проблемами водородной энергетики и топливных элементов. Непосредственное использование в ТЭ наиболее широко распространенного в природе топлива — природного газа — довольно затруднительно по многим причинам. Более предпочтительно преобразование (риформинг) природного газа (метана) в так называемый синтез-газ (смесь CO и H<sub>2</sub>), который затем можно либо непосредственно использовать в высокотемпературных твердооксидных ТЭ, либо выделить из него водород для дальнейшего сжигания в низкотемпературных ТЭ.

Другой участник проекта — Институт электрофизики — имеет совсем другое направление исследований — создание нанопорошков. Казалось бы, как это связано с топливными элементами и водородной энергетикой? Между тем оптимальный электролит для топливного элемента — это пленка из нанопорошка. Кстати, такие порошки умеют создавать только в России, и все эти проекты выполняются в ИЭФ.

Академические ученые работают по программе около года. По многим направлениям получены неплохие результаты. Руководство «Норильского никеля» считает, что пора переходить к стадии отбора оптимальных проектов. Сейчас еще трудно оценить, какие подходы перспективные, а какие нет.

Прорывные технологии не создаются за один день и даже за один год. На это нужно время, и попытки искусственно сократить его не дадут результата.

---

### 3. Водород и его свойства

---

**П**ервый элемент периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева. Относительная атомная масса 1,0079. Существуют два стабильных изотопа водорода —  $^1\text{H}$  (протий) и  $^2\text{H}$  (дейтерий), а также один радиоактивный —  $^3\text{H}$  (тритий).

В свободном состоянии и при нормальных условиях водород — бесцветный газ, без запаха и вкуса. Обычно существует в комбинации с другими элементами, например, кислорода в воде, углерода в метане и в органических соединениях. Поскольку водород химически чрезвычайно активен, он редко присутствует как несвязанный элемент.

Охлажденный до жидкого состояния водород занимает 1/700 объема газообразного состояния. Водород при соединении с кислородом имеет самое высокое содержание энергии на единицу массы: 120,7 ГДж/т. Это — одна из причин, почему жидкий водород используется как топливо для ракет и энергетики космического корабля, для которой малая молекулярная масса и высокое удельное энергосодержание водорода имеют первостепенное значение. При сжигании в чистом кислороде единственные продукты — высокотемпературное тепло и вода. Таким образом, при использовании водорода не образуются парниковые газы, и даже не нарушается круговорот воды в природе.

Водород — самый распространенный элемент во вселенной (92%). Он преимущественно составляет межзвездное вещество, формирует основную массу звезд. Наше Солнце, по меньшей мере, наполовину состоит из водорода. Собственно, звезды светят благодаря непрерывному термоядерному «сгоранию» водорода в их недрах и превращению его в инертный гелий. Своим существованием мы обязаны энергии сгорания водорода на Солнце. И когда запасы солнечного водорода иссякнут, жизнь на Земле станет невозможной — и потому, что погаснет наше светило, и потому, что не станет воды. Правда, иссякнут они, по заявлению ученых, лишь через 30 млрд лет.

Открыт водород, несмотря на то, что, можно сказать, является основой основ, был сравнительно недавно. Намного позже, чем, скажем, железо или углерод. Сделал это английский химик Г. Кавендиш в 1766 г. В 1787 г. А. Лавуазье доказал, что водород — химический элемент.

В природе водород встречается преимущественно в связанном виде (вода, минералы, уголь, нефть, живые существа, органические вещества). В свободном виде небольшие количества водорода иногда выбрасываются вул-

канами, в результате диффузии рассеиваясь в атмосфере. А так как средняя скорость теплового движения молекул водорода из-за их малой массы близка ко второй космической, то из слоев атмосферы эти молекулы улетают в космическое пространство.

При обычных условиях водород — газ без цвета и запаха, почти в 15 раз легче воздуха. Обладает очень высокой теплопроводностью, сравнимой с теплопроводностью металлов. Это происходит из-за легкости молекул водорода и, следовательно, большой скорости их движения. Водород хорошо растворяется в некоторых металлах: в одном объеме палладия, например, растворяется до 900 объемов водорода. В соотношении 2:1 с кислородом образует взрывчатый гремучий газ. Температура сгорания водорода чрезвычайно высока — 2800 °С. Водород является великолепным восстановителем.

Разнообразны области применения водорода в современной промышленности и народном хозяйстве: от производства аммиака, карбамида и метанола до использования в качестве весьма эффективного топлива для ракетных двигателей. С развитием техники и промышленного производства возникают новые области практического использования водорода, и потребность в нем сильно возрастает. Ежегодно она увеличивается во всем мире на 8–10%.

Быстрый рост производства водорода объясняется в основном развитием таких крупных областей его потребления, как производства аммиака, карбамида и метанола, а также широким применением водорода в нефтехимической промышленности в процессах гидрокрекинга, гидроочистки нефтепродуктов от сернистых загрязнений в связи с необходимостью снижения уровня загрязнения атмосферы оксидами серы и получения различных нефтехимических продуктов. В больших количествах применяется водород в химической промышленности при синтезе аммиака, изготовления соляной и метиловой кислот, получения метилового спирта. В пищевой промышленности его используют для превращения жидких жиров в твердые (их гидрогенизации).

Очень широки возможности использования водорода в металлургии для прямого восстановления железных руд, а также для интенсификации доменного процесса и снижения расхода кокса в доменных печах. Высказываются предположения, что к концу текущего столетия по потреблению водорода металлургия может сравниться с синтезом аммиака и даже превзойти его. Крупным потребителем водорода может стать микробиологическая промышленность (синтез кормовых белков на основе штаммов бактерий, ассимилирующих водород).

Учитывая «невесомость» водорода, им заполняли и заполняют оболочки летательных аппаратов легче воздуха. Сначала это были воздушные шары, позднее — аэростаты и дирижабли, сегодня (вместе с гелием) — метеорологические зонды. Высокая температура горения, а в сочетании с электри-

ческой дугой она достигает 4000 °С, обеспечивает плавление даже самых тугоплавких металлов. Поэтому кислородно-водородные горелки используют для сварки и резки металлов. В цветной металлургии восстановлением водородом получают особо чистые металлы из оксидов. В космической технике как топливо для самых мощных ракет-носителей.

В связи с истощением запасов нефти особое внимание привлекают процессы глубокой переработки тяжелых фракций нефтепродуктов с целью увеличения выхода моторных топлив и нефтехимических продуктов. По этой же причине вероятно развитие процессов переработки углей и сланцев, на что потребуются большие количества водорода.

Интерес к водороду как моторному топливу обусловлен следующими обстоятельствами:

- при сгорании водорода в двигателе образуется практически только вода, и в этом отношении двигатель на водородном топливе является наиболее экологически чистым;
- высокие энергетические свойства водорода — низшая теплота сгорания водорода составляет 120 МДж/кг, что более чем в 4 раза выше по сравнению с бензином (около 25 МДж/кг), т. е. 1 кг водорода эквивалентен почти 4,5 кг бензина;
- практически неограниченная сырьевая база при условии получения водорода из воды.

Использование водорода в качестве моторного топлива для автомобилей может осуществляться по нескольким вариантам:

- применение самого водорода;
- применение водорода совместно с традиционными нефтяными топливами;
- использование водорода как топлива в топливных элементах.

В настоящее время мощности по производству водорода в мире оцениваются в 40 млн т/год, при этом более 90 % водорода получают в процессах риформинга и других нефтеперерабатывающих и нефтехимических процессах. Водород вырабатывается также при конверсии природного газа в синтез-газ. Получение водорода электролизом воды в настоящее время — процесс чрезвычайно дорогой, по затратам энергии он практически равен количеству энергии, получаемой при сгорании водорода в двигателе.

Кроме того, следует учитывать способ получения электроэнергии, необходимой для электролиза воды. Если электроэнергия вырабатывается на электростанциях, использующих в качестве топлива природный газ (минимальная токсичность дымовых газов) или уголь (максимальная токсичность дымовых газов), то экологичность применения водорода в качестве моторного топлива во многом теряет свои преимущества. Доля электростанций, использующих энергию воды, атомные станции, солнечные батареи в большинстве стран мира не очень велика.

Практически весь вырабатываемый в настоящее время водород используется в различных процессах нефтепереработки (гидроочистка, гидроформинг, гидроизомеризация и т. п.) и нефтехимии (процессы гидрирования).

При высокой массовой энергоплотности объемная энергоплотность водорода на 15–20% ниже по сравнению с бензином. С воздухом водород устойчиво воспламеняется в широком диапазоне концентраций вплоть до  $\alpha = 10$ , что обеспечивает устойчивую работу двигателя на всех скоростных режимах в широком диапазоне изменения состава смеси от  $\alpha = 0,2$  до  $\alpha = 5$ . Критическая степень сжатия при стехиометрическом водородо-воздушном составе смеси не превышает 4,7, что соответствует октановому числу по исследовательскому методу 46 единицам, в то время как при  $\alpha = 3,5$  степень сжатия достигает 9,4 и октановое число равно 114. Таким образом, при достаточном обеднении смеси возможна бездетонационная работа водородного двигателя в широком диапазоне степеней сжатия.

Высокая температура самовоспламенения водородо-воздушных смесей затрудняет использование этого топлива в дизельных двигателях. Устойчивое воспламенение может быть обеспечено принудительным поджигом от свечи или организацией работы по газодизельному режиму, аналогичному рассмотренному ранее для газового топлива.

Технические трудности при использовании и высокая стоимость водорода привели к тому, что уделяется внимание разработке комбинированного топлива бензин-водород. Высокая активность водорода позволяет обеспечить работу двигателя на обедненных смесях, степень обеднения зависит от количества водорода в смеси [5]:

|                             |      |      |     |      |     |
|-----------------------------|------|------|-----|------|-----|
| Содержание водорода, % масс | 0    | 10   | 20  | 40   | 100 |
| $\alpha$                    | 1,12 | 1,67 | 2,5 | 3,34 | 5,0 |

Проведенные испытания показали, что использование бензино-водородных смесей позволяет вдвое снизить расход бензина при скорости 90–120 км/ч и на 28% при езде в городе.

Определенные сложности использования водорода в качестве моторного топлива создает его высокая взрыво- и пожароопасность. Водородо-воздушные смеси имеют широкие диапазоны воспламенения 14–75% об. и взрываемости 18,3–74%. Однако высокая температура воспламенения (590 °С) и быстрое рассеивание в атмосфере позволяют приравнивать водород по показателям пожаро- и взрывоопасности к природному газу.

В последние годы все большее внимание уделяется разработке и использованию на автомобильном транспорте топливных элементов, топливом для которых служит водород или продукты, способные при переработке выделять водород.

Еще одна существенная особенность применения водорода связана с возможностью прямого преобразования энергии химической реакции в электричество при его соединении с кислородом в электрохимическом генераторе (ЭХГ) с высоким коэффициентом полезного действия.

Водород применяется также в качестве теплоносителя в системах охлаждения мощных электрических генераторов, в производстве искусственных драгоценных камней и оптического кварца, редких металлов, твердых сплавов, в порошковой металлургии и во многих других отраслях народного хозяйства.

---

## 4. Получение водорода

---

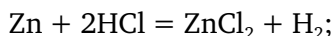
**В**одород практически не встречается в природе в чистой форме и должен извлекаться из других соединений с помощью различных химических методов. Разнообразие способов получения водорода является одним из главных преимуществ водородной энергетики, так как повышает энергетическую безопасность и снижает зависимость от отдельных видов сырья.

К ним относятся: паровая конверсия метана и природного газа, газификация угля, электролиз воды, пиролиз, частичное окисление, биотехнологии.

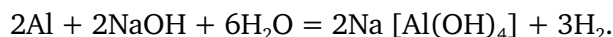
Все методы получения водорода можно разделить на лабораторные и промышленные.

*В лабораторных условиях* в настоящее время применяется:

— взаимодействие активных металлов с кислотами — неокислителями:

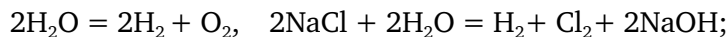


— взаимодействие алюминия (или цинка) с водными растворами щелочей:

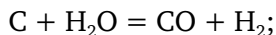


*В промышленности:*

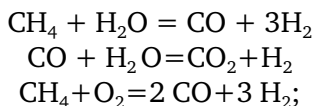
— электролиз воды и водных растворов щелочей и солей:



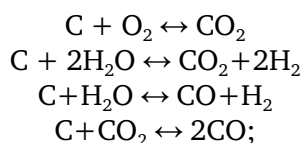
— пропускание паров воды над раскаленным углем при 1000 °С:



— паровая и парокислородная конверсия метана:



— газификация угля:



— использование ядерной энергетики;

— использование альтернативных источников энергии.

С развитием производства водорода в крупных масштабах претерпели изменение и методы его получения. Так, железо-паровой процесс, газификация твердого топлива и выделение водорода из образующегося коксового газа уступили место более экономичным новым способам, однако старые методы и в настоящее время продолжают еще применяться в промышленности в небольших масштабах.

К настоящему времени технологии крупномасштабного производства и переработки водорода являются хорошо освоенными (рис. 4.1, а) и составляет 50 млн т (увеличивается ежегодно на 10%). Следует отметить, что только 62% водорода производят как целевой продукт, остальные 38% являются побочным продуктом других производств (нефтепереработка, коксохимия и т. п.). К последним также относится почти весь водород, получаемый в настоящее время электролизом (производство хлора, хлоратов, перекиси водорода и каустической соды).

При мировом производстве хлора около 25 млн т в год в качестве побочного продукта получают ~ 0,7 млн т водорода (~ 7 млрд м<sup>3</sup>) в год. Попутный водород от производства хлора и других электрохимических производств частично используется в промышленности, а частично сжигается в котельных или выбрасывается в атмосферу.

Рассматривается возможность использования полученного таким образом водорода не только в качестве химического сырья для удовлетворения нужд традиционных потребителей водорода, но и для замены природного газа или нефтяных фракций, используемых как энергетическое сырье.

Еще одним источником водорода может явиться его эмиссия из земных недр. По мнению геологов в области так называемого Байкальского рифтогенеза (Тункинская впадина), где земная кора тоньше, кремний-магний-железистые слои, насыщенные водородом, залегают на глубинах всего 4–6 км. На этой глубине электромагнитное зондирование выявило огромную зону с аномально высокой проводимостью. Поэтому предлагалось осуществить глубокое бурение с целью оценить и проверить наличие экологически чистого энергоресурса для получения газообразного водорода.

По мнению автора теории В. Н. Ларина срединные океанские хребты активно «газят» водородом. В Исландии водород в некоторых местах вырывает



ется из-под земли просто со свистом, еще одна из зон близкого залегания слоев металлогидратов — в Израиле, и еще одна — штат Невада в США. То есть, по мнению геологов, в атмосферу Земли непрерывно выделяется огромное количество газообразного водорода без всякого антропогенного вмешательства.

При использовании в дальнейшем водорода-энергоносителя, получение энергии было бы связано с окислением водорода до воды без выделения экологически вредных веществ.

Структура потребления водорода показана на рис. 4.1, б. Как видно из данного рисунка, основными потребителями водорода (95%) являются химическая промышленность и нефтепереработка. Водород является ключевым элементом в производстве минеральных удобрений (получение аммиака). Определяющее значение имеет использование водорода в многочисленных процессах органического синтеза, как в виде метанола, так и непосредственного реагента. Особое место водород занимает в нефтепереработке (гидрокрекинг, гидроочистка), способствуя увеличению глубины переработки сырой нефти и повышению качества конечных продуктов — углеводородных топлив с повышенной теплотворной способностью и уменьшенными вредными выбросами от их сжигания.

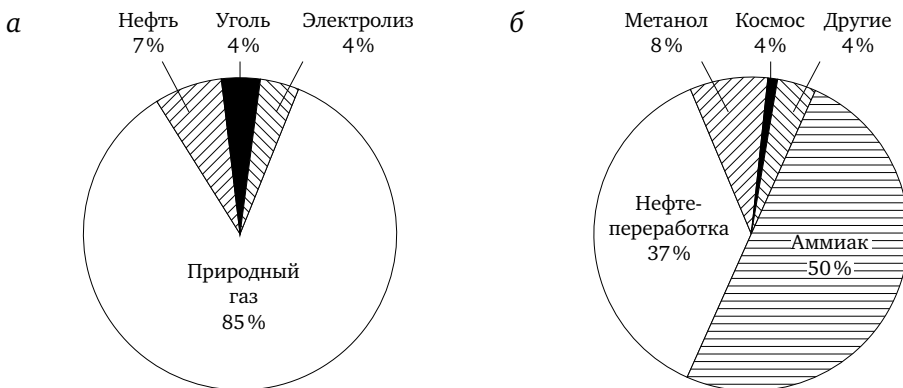


Рис. 4.1. Структура мирового производства (а) и потребления (б) водорода

Более половины потребляемого в мире водорода на сегодняшний день используется в качестве химического сырья. Косвенное использование остальной части в энергетических целях главным образом относится к обеспечению нагрева для проведения технологических процессов, как правило, с одновременным участием водорода в химических реакциях (гидрирование, раскисление и т. п.). Раскисляющее действие водорода широко применяют в порошковой металлургии, металлообработке, производстве стекла, синтетических рубинов и т. п. (в сумме примерно 2% от общего потребле-

ния водорода). Применение водорода в микроэлектронике главным образом связано с получением кремния путем восстановления  $\text{SiCl}_4$ .

Основным потребителем водорода как топлива является космонавтика. Комбинация «жидкий водород (топливо) — жидкий кислород (окислитель)» обеспечивает максимальное выделение энергии на единицу веса, что является определяющим критерием для аэрокосмических приложений.

Следует отметить, что из значительного объема производимого водорода только 5 % в настоящее время является коммерческим продуктом, продаваемым от производителей потребителям. Как правило, крупные потребители водорода сами производят его для собственных нужд, что вызвано экономическими факторами (высокие цены на товарный водород), а также техническими трудностями обеспечения хранения и транспортировки больших количеств водорода. Мировая торговля водородом ведется в ограниченных масштабах. Она наиболее активна в Западной Европе, где имеется небольшая, но развитая сеть трубопроводов по перекачке водорода между предприятиями по его производству и потреблению. Водород не является биржевым товаром, и говорить о его мировых ценах трудно, поскольку цены при поставках являются контрактными и зависят от многих условий, в том числе — от требуемой чистоты водорода как продукта.

Совершенствование водородных технологий сопряжено с решением трех групп проблем, связанных с разработкой эффективных, экономически выгодных и безопасных процессов и оборудования, обеспечивающих производство водорода, его использование, а также — компактное хранение. Соответственно, работы в области водородных технологий развиваются преимущественно по трем направлениям: производство водорода, хранение и транспортировка водорода, использование водорода.

Рассмотрим подробнее основные методы промышленного получения водорода. Для производства водорода необходимо разорвать его химические связи в углеводородах или воде и выделить его из реакционной смеси.

#### 4.1. Производство водорода из природных топлив

---

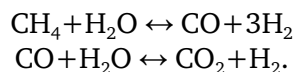
Получение водорода из природных органических топлив в настоящее время является наиболее широко освоенным методом. Основной технологией является паровая конверсия метана. Как видно из данных рис. 4.1, а, по указанной технологии получают около 85 % производимого в мире водорода, что обусловлено достаточно высокой (более 80 %) эффективностью процесса, его реализацией на уровне крупномасштабного производства, сравнительно невысокой (на настоящий момент) стоимостью и отлаженной инфраструктурой транспортировки исходного сырья. В результате стоимость

водорода для данной технологии оказывается самой низкой по сравнению со стоимостью водорода, получаемого другими методами. При этом она существенно снижается по мере увеличения производительности. Согласно данным Минэнерго США, в 1995 году стоимость водорода для условий большого завода составляла 7 долл. за гигаджоуль. Это эквивалентно стоимости 0,24 долл./л бензина при стоимости природного газа 2,30 долл./гигаджоуль (80 долл./1000 нм<sup>3</sup>).

*Паровая конверсия метана (ПКМ).* Паровая конверсия углеводородных газов получила широкое распространение после второй мировой войны и в настоящее время является наиболее рентабельным способом производства водорода. Себестоимость процесса 2–5 долл. за кг водорода. В будущем возможно снижение цены до 2–2,5 долл., включая доставку и хранение.

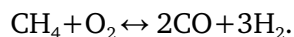
Процесс отделения водорода от углеродной основы в метане протекает в трубчатых печах (химических паровых реформерах) при внешнем подводе теплоты при температурах 750–850 °С через стенку трубы на каталитических поверхностях (никель, корунд и др.).

Основные реакции процесса:



Первый шаг реакции расщепляет метан и водяной пар на водород и монооксид углерода (синтез-газ). Вслед за этим «реакция сдвига» превращает монооксид углерода и воду в диоксид углерода и водород. Эта реакция происходит при температурах 200–250 °С. Для осуществления эндотермического процесса ПКМ сжигается около половины исходного газа. С целью экономии природного газа и снижения загрязнения окружающей среды продуктами его сгорания в России, США, Японии и Франции проводились и продолжают развиваться разработки технологии паровой конверсии метана с подводом тепла от высокотемпературного гелиевого реактора (ВТГР). Территориальная модель такого комплекса состоит из ядерной части, вырабатывающей синтез-газ (смесь H<sub>2</sub> и СО), который транспортируется к технологической части производства, где этот газ используется для выработки конечной продукции.

Помимо ПКМ существует парокислородная конверсия, где вместе с горячим паром в активную зону реактора подается кислород, это делает установку дороже на 5–10%. Основные реакции процесса те же, что и для ПКМ, плюс окисление метана кислородом:



Состав реагирующих веществ для парокислородной конверсии метана такой, что реакции в совокупности дают нулевой тепловой эффект.

Существенное преимущество парокислородной конверсии по сравнению с ПКМ — передача теплоты осуществляется напрямую, а не через стенку теплообменника — используется более дешевый реактор шахтного типа вместо дорогого трубчатого, применяемого в предыдущем случае.

Для получения водорода методом паровой и парокислородной каталитической конверсии на нефтеперерабатывающих заводах, наряду с природным газом, используются нефтезаводские газы, нефтяные остатки или любые фракции нефтепродуктов (табл. 4.1).

Таблица 4.1

## Сравнение характеристик ПКМ и парокислородной конверсии

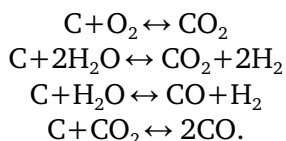
| Характеристика        | ПКМ            |                 |    |                 |                | Парокислородная конверсия |                 |     |                 |                |
|-----------------------|----------------|-----------------|----|-----------------|----------------|---------------------------|-----------------|-----|-----------------|----------------|
| давление, МПа         | 2–4            |                 |    |                 |                | 2–4                       |                 |     |                 |                |
| температура, К        | 1000–1100      |                 |    |                 |                | 1000–1300                 |                 |     |                 |                |
| КПД, %                | 60–65          |                 |    |                 |                | 67–70                     |                 |     |                 |                |
| состав синтез газа, % | H <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | CO | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> | H <sub>2</sub>            | CO <sub>2</sub> | CO  | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> |
|                       | 75,5           | 6               | 17 | 1,5             | ~0             | 71,5                      | 24,4            | 2,4 | 1               | 1              |

Компании Tokyo Gas Co (TGC) и Mitsubishi Heavy Industries (MHI) разработали высокоэффективный проточный мембранный аппарат для одновременного риформинга метана и окисления CO на никелевых и палладиевых катализаторах. Чистота водорода достигает 99,999 %, конверсия природного газа — 76,2 %.

*Плазменная конверсия углеводородов.* Изучено много комбинаций химических реакций, в которых вода расщепляется на водород и кислород в замкнутом цикле с поглощением тепла и электричества. Такой цикл может быть построен и на базе ПКМ. При паровой конверсии метана около половины водорода производится из воды. Довести в этом цикле долю водорода, получаемого расщеплением воды, до 100 %, можно путем электрохимического или плазменного восстановления метана из метанола с возвращением его в голову процесса. Выбор оптимального процесса разложения воды определяется рядом критериев, среди которых важнейшими являются следующие: эффективность цикла, термодинамические и кинетические характеристики отдельных реакций, доступность и стоимость реагентов, совместимость реагентов и конструкционных материалов, безопасность процесса, экологические соображения и, в конечном счете, экономические показатели.

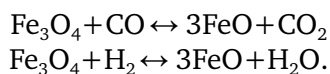
В РНЦ «Курчатовский институт» выполнены исследования плазменной конверсии природного углеводородного топлива (метан, керосин) в синтез-газ. Эта технология может быть применена на заправочных станциях или на борту водородных автомобилей при использовании обычного жидкого топлива.

*Газификация угля* — старейший способ получения водорода. Первый газогенератор был построен в Великобритании в 40-х годах XIX века. Получение водорода из угля связано с термическим разложением воды, а уголь используется в качестве энергоресурса и химического реагента, на уголь одновременно действуют водяным паром и кислородом — парокислородная конверсия. Для всех этих производств характерны большие единичные мощности агрегатов и отсутствие ограничений по потокам энергии. Основные реакции процесса газификации угля:

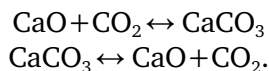


Существует большое количество способов газификации угля, из которых процессы Лурги, Копперс-Тотцека и Винклера считаются классическими, поскольку используются достаточно давно. Они отличаются: термодинамическими параметрами, размером и принципом подачи угля в газогенератор, способом удаления шлака.

Принципиально от классических методов отличается многоступенчатый процесс производства водорода железопаровым способом:



Все рассмотренные методы это автотермическое проведение реакций газификации, в методе  $\text{CO}_2$ -акцептор осуществлен аллотермический подвод теплоты за счет реакции  $\text{CaO}$  с двуокисью углерода, далее в регенераторе карбонат кальция разлагается термически:



Производство синтез-газа может быть также основано на переработке биомассы и промышленно-бытовых отходов, что одновременно способствует решению экологических проблем. При термохимической обработке биомассы ее нагревают без доступа кислорода до температуры 770–1070 К, в результате образуются водород, метан и оксид углерода (табл. 4.2).

Для выделения водорода из синтез-газа используются методы: глубокого охлаждения, адсорбции, абсорбции, диффузии через мембраны, катализа, электрохимической конверсии.

Таблица 4.2

## Параметры методов газификации угля

| Название метода           | Т, К      | р, МПа | Состав синтез-газа, % |    |                 |                 |     | Преимущества/<br>недостатки                                    |
|---------------------------|-----------|--------|-----------------------|----|-----------------|-----------------|-----|--|
|                           |           |        | H <sub>2</sub>        | CO | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | др. |  |
| Лурги                     | 1300–1500 | 3      | 26                    | 58 | 6               | 9               | 1   | Использование сортированного угля, сложная очистка синтез-газа |
| Копперс-Тотцека           | 1800      | 0,1    | 31                    | 57 | 10              | 1               | 1   | Низкая производительность                                      |
| Винклера                  | 1300      | 0,1    | 35                    | 48 | 14              | 2               | 1   | Высокая степень газификации углерода 90%                       |
| Железо-паровой            | 1200      | 7–10   | 23                    | 7  | 7               | 28              | 35  | Высокий КПД-63%  |
| CO <sub>2</sub> -акцептор | 1000–1300 | 1–2    | 56                    | 16 | 11              | 15              | 2   | Сложная очистка синтез-газа. / Высокий выход водорода.         |

США предполагают построить электростанцию по проекту FutureGen, которая будет работать на продуктах газификации угля. Впервые о планах подобного строительства заявил еще в 2003 г. министр энергетики США Спенсер Абрахам. Мощность станции должна составить 275 МВт. Общая стоимость проекта 1,2 млрд долл. На электростанции будет улавливаться и храниться до 90% CO<sub>2</sub>. Электричество будут вырабатывать топливные элементы, используя в качестве горючего водород, получающийся в процессе газификации угля. Аналогичный проект под названием «GreenGen» создан в Китае. Строительство первой очереди электростанции мощностью 250 МВт началось в 2008 г. Общая мощность электростанции составит 650 МВт.

Основные недостатки получения водорода из природных топлив — выбросы в атмосферу больших количеств CO<sub>2</sub>, утилизация которого требует значительных капитальных затрат и эксплуатационных расходов, тем самым существенно повышая стоимость конечного продукта. Кроме этого, являясь идеальным для крупномасштабного производства, метод плохо адаптируется на установки малой производительности, необходимые для децентрализованного производства водорода (например, заправочных станций, автономных энергосистем и т. п.). Еще одним недостатком метода является наличие в конечном продукте примесей CO и CO<sub>2</sub>, что предъявляет дополнительные требования к очистке водорода при его использовании в ряде устройств (например, в топливных элементах с водно-щелочным или твердым полимерным электролитом).

По этим причинам получение водорода из природных топлив обычно рассматривается как переходная технология от сложившейся инфраструктуры энергорынка к водородной экономике будущего. В далекой перспективе эта технология, видимо, будет вытесняться другими.

Следует отметить, что с точки зрения экологии стратегия производства водородного топлива из ископаемых углеводородов мало чем отличается от непосредственного сжигания природных топлив. Если в последнем случае вредные выбросы в атмосферу появляются на стадии использования топлива, то в первом мы имеем практически те же выбросы на стадии его получения. Поэтому основными компонентами новых технологий производства водорода из органики являются процессы улавливания сопутствующих выбросов в атмосферу, включая  $\text{CO}_2$ . В качестве примера можно привести последние разработки по паровой конверсии угля. Кроме этого, важным косвенным фактором здесь является повышение эффективности использования топлива, имеющее следствием меньшие выбросы в атмосферу при том же объеме конечного потребления энергии, поскольку водородные энерготехнологии имеют в этом отношении больший потенциал, чем сжигание ископаемых горючих.

## 4.2. Получение водорода методом электролиза

По-видимому, в ближайшем будущем методы получения водорода с использованием углеродного сырья будут основными. Однако сырьевые и экологические ограничения процесса паровой конверсии метана стимулируют разработку процессов производства водорода из воды. Среди способов получения водорода из воды наибольший интерес в контексте атомно-водородной энергетики представляют электролиз, термохимические и термоэлектрохимические циклы.

Впервые электролитическое разложение воды на кислород и водород осуществлено в 1800 г., а промышленное освоение этого метода началось с 1888 г., когда стали доступны генераторы постоянного тока. Электролиз воды является наиболее перспективной технологией получения водорода в будущем, хотя в настоящее время из-за высокой стоимости доля этого метода в мировом производстве водорода не превышает 5% (рис. 4.1). Наиболее привлекательными особенностями электролизной технологии являются экологическая чистота (разумеется, при условии, что производство первичной энергии не сопряжено с загрязнением окружающей среды), возможность создания установок с широким диапазоном производительности (от нескольких литров до сотен  $\text{м}^3$  водорода в час), простота эксплуатации и удобство в работе, высокая чистота производимого водорода и наличие ценного побочного продукта — газообразного кислорода. Метод нашел широкое применение в ряде стран, обладающих значительными ресурсами дешевой гидроэнергетики. Наиболее крупные электрохимические комплексы находятся в Канаде, Индии, Норвегии, Египте.

Из различных методов разложения воды (электрохимический, термический, термохимический, биохимический, фотохимический и др.) технически наиболее разработан электролитический метод, который позволяет производить водород с полезным использованием затрачиваемой электрической энергии примерно 70%. При дальнейшем усовершенствовании процесса теоретически возможно увеличение этого показателя до 80%, а при высокотемпературном электролизе и до 80–90%.

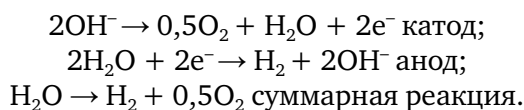
В настоящее время существуют три способа реализации электролизной технологии производства водорода, отличающиеся типом используемого электролита и условиями проведения электролиза.

Таблица 4.3

#### Способы реализации электролизной технологии производства водорода

| Тип электролизёра                       | Энергозатраты, $\text{H}_2 \text{ м}^3/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ | Температура, К | Производительность, $\text{H}_2 \text{ м}^3/\text{ч}$ | Давление, МПа | КПД, %    |
|---|---|----------------|---|---------------|-----------|
| щелочной                                | 4,5–5,5   | 320–370        | до 500  | 0,1–5         | 50–70     |
| с твердым полимерным электролитом (ТПЭ) | 3,5–4,5   | 350–370        | до 100  | 0,1–15        | 80–90     |
| с твердым оксидным электролитом         | 2,5–4   | 1070–1270      | —   | 0,1–3         | $\geq 85$ |

**Щелочной электролиз** — процесс прохождения электрического тока через раствор электролита (20–30% раствор KOH или NaOH) от анода к катоду, вследствие чего на них соответственно образуются газы водород и кислород:



Особенность процесса щелочного электролиза — возможность работать в широких пределах нагрузки (начиная с 20% от номинальной мощности). Основными производителями являются: Stuart IMET, The Electrolyser Corporation Ltd, Norsk Hydro, DeNora, НПО «Уралхиммаш» и др.

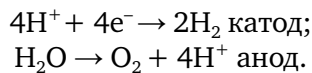
К исследованиям, направленным на усовершенствование традиционного процесса электролиза воды и повышения его экономичности, можно отнести разработку *электролизёров с твердо-полимерным электролитом (ТПЭ)*. Данный метод производства водорода исторически связан с появлением перфторированной ионообменной мембраны «Нафион» фирмы DuPont. Первые электролизёры с ТПЭ были созданы в 1966 г. компанией General Electric. Такие изделия предназначались для специальных целей



(космические корабли, подводные лодки и т. п.), а также для нужд гражданской индустрии.

В настоящее время областями применения электролизёров с ТПЭ, помимо использования произведенных ими газов в топливных элементах, являются: аналитическое приборостроение (оборудование для газовой хроматографии, обеспечение водородом лабораторий), системы коррекции водно-химического режима атомных реакторов, водородная сварка, производство особо чистых веществ для электронной промышленности и т. п. Водород также широко используется в различных химических технологических процессах, например, аммиака, при гидрировании органических соединений. При этом производимый кислород, помимо его использования для дыхания (например, в медицине), может быть применен в некоторых областях промышленной энергетики, таких как различные процессы горения, производство полупроводников, выплавка стекла, обработка твердых бытовых отходов и сточных вод, а также газификация угля. Необходимо отметить, что при некоторых условиях, помимо производства водорода и кислорода, в процессе электролиза воды с ТПЭ может выделяться озон.

Мембрана таких электролитов — беспористая полимерная на основе перфторированного углерода обладает механической прочностью, химической стойкостью и высокой электропроводностью. Переносчик заряда в таких мембранах является гидратированный протон:



ТПЭ электролизёры в 5–7 раз дороже водно-щелочных с аналогичными характеристиками, но при этом экологически чистые, имеют значительно меньшие массогабаритные характеристики и энергозатраты, повышенный уровень безопасности, возможность работы в нестационарных режимах, простое обслуживание, и в дополнение ко всему, можно получить компримированные газы (до 30 атм. и более) непосредственно в электролизёре. Важной особенностью систем электролиза воды с ТПЭ является то, что чистота производимого водорода (а также кислорода) соответствует качеству газов, необходимых для использования в топливных элементах с ТПЭ, которые сегодня начинают внедряться на транспорте и в децентрализованной энергетике (например, чистота водорода, полученного электролизом с ТПЭ, составляет не менее 99,98 %). Но и сами электролизные системы на основе ТПЭ предъявляют жесткие требования к чистоте подаваемой воды.

На сегодняшний день основными производителями электролизёров с ТПЭ являются: в США Hamilton Sundstrand, Proton Energy Systems Inc. (электролизёры, работающие под давлением до 28 атм, производительностью по водороду до 26 м<sup>3</sup>/ч с возможной комбинацией электролизёров

в энергоустановку производительностью  $260 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), Membrrel process, David Systems and Technology, Iwani; в Германии H-tec (электролизёры мощностью до 10 кВт). Исследования и разработка электролизёров с ТПЭ проводятся в Норвегии (Norwegian University of Science and Technology), а также в Японии (Matsushita Electric Works, Ltd. и Fuji Electric Co., Ltd.). Так, например, определенный прогресс был достигнут в рамках Японской программы WE-NET (элемент с площадью  $2500 \text{ см}^2$  рабочим напряжением (U) 1,556 В при  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  и плотности тока ( $i$ )  $1 \text{ А}/\text{см}^2$  с эффективностью преобразования энергии 95,1 %, что объясняется близостью к равновесному потенциалу 1,48 В. Это позволяет говорить о дальнейшем увеличении удельной производительности и снижении цены. Во Франции работы по исследованию электролиза с ТПЭ были начаты в 1985 г. Были разработаны системы мощностью 0,5 кВт, предназначенные, в основном, для обеспечения кислородом подводных лодок и космических аппаратов.

В России одну из лидирующих позиций в разработке и производстве систем электролиза воды с ТПЭ занимает ИВЭПТ ФГУ РНЦ «Курчатовский институт». За более чем 20 лет работы в этом направлении созданы электролизёры различной производительности с рабочим давлением до 30 атм. Так, например, разработаны электролизёры с производительностью по водороду до  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ , работающие под давлением до 30 атм. К настоящему моменту в ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» накоплен значительный опыт по проектированию и изготовлению опытных и мелкосерийных образцов, имеются конструкторские и технологические разработки для изготовления элементов конструкции (мембранно-электродных блоков, коллекторов тока, биполярных пластин, уплотнительных элементов и т. д.). Разработаны электрокатализаторы на носителях, смешанные оксидные каталитические композиции, позволяющие снизить расход металлов платиновой группы без уменьшения ресурса. При этом показано, что активность композиции с 40–50 ат. %  $\text{RuO}_2$  сравнима с активностью чистого  $\text{IrO}_2$ , а параметры электролиза с анодным электрокатализатором в виде  $\text{RuO}_2$  (30 %)  $\text{IrO}_2$  (32 %)  $\text{SnO}_2$  (38 %) при расходе платиновых металлов  $0,8 \text{ мг}/\text{см}^3$  практически сходны с параметрами электролиза с иридиевым анодным электрокатализатором и расходом  $1,5\text{--}2,0 \text{ мг}/\text{см}^3$  (рис. 4.2).

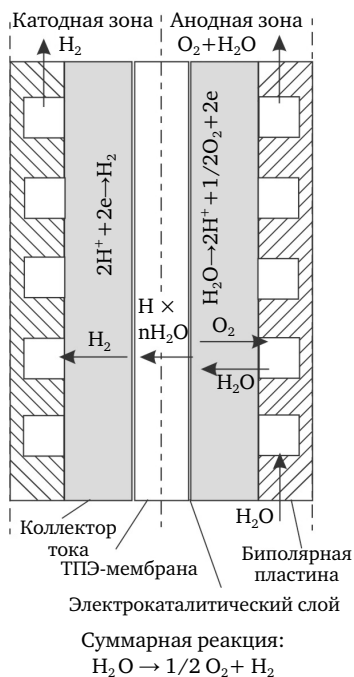


Рис. 4.2. Принципиальная схема электролизной ячейки с ТПЭ

Также довольно хорошие характеристики имеет электролизёр с катодным катализатором на основе Pd (включая Pd на углеродном носителе).

Рабочие характеристики электролизёров:

- энергозатраты 3,9–4,1 кВт·ч/м<sup>3</sup> водорода при  $i = 1$  А/см<sup>2</sup> и  $t = 90$  °С и напряжении на ячейке  $U = 1,65$ – $1,72$  В;
- чистота водорода > 99,98 %;
- выход по току для водорода > 98 % при 1 А/см<sup>2</sup>;
- рабочее давление до 30 атм. (ведется разработка электролизёров, работающих под давлением до 50 атм.);
- расход благородных металлов 0,3–1,0 мг/см<sup>3</sup> на катоде и 1,5–2,0 мг/см<sup>3</sup> на аноде;
- ресурс работы до 10000 ч.

Как уже отмечалось, существенным является возможность проведения электролиза воды с ТПЭ при повышенных давлениях. Исследования показали, что при проведении процесса электролиза при повышенном давлении (до 30 атм.) наблюдается улучшение вольт-амперной характеристики при рабочих плотностях тока по сравнению с электролизом при атмосферном давлении. Это обусловлено, в первую очередь, снижением анодного перенапряжения. Так, при плотности тока 2 А/см<sup>2</sup> на видимую поверхность напряжение электролиза уменьшается на 70–80 мВ. Кроме того, повышенное давление позволяет проводить электролиз при температуре выше 100 °С, тем самым снижая энергозатраты за счет уменьшения сопротивления мембраны и снижения перенапряжения. В частности, при температуре 120 °С и давлении 25 атм. при плотности тока 1 А/см<sup>2</sup> видимой поверхности напряжение на ячейке составило 1,64 В. Теоретический анализ позволяет предполагать, что увеличение давления приводит к уменьшению объема пузырьков газа, выделяющегося в процессе электролиза, что, в свою очередь, способствует улучшению транспорта воды, уменьшению омических потерь в каталитическом слое и улучшению электрического контакта между каталитическим слоем и коллектором тока.

Несмотря на большой объем исследований и разработок в области электролизёров с ТПЭ, высокая стоимость мембраны (около 200 долл. на 1 м<sup>3</sup>/ч водорода при 1 А/см<sup>2</sup>), электрокатализатор с применением драгметаллов (Pt, Ir, Ru), высокие требования к чистоте воды и конструкционных материалов (в основном, Ti) приводят к относительно высокой стоимости такого типа электролизёров. С другой стороны, стоимость производимого методом электролиза водорода обычно приблизительно на 70 % состоит из стоимости электричества, поэтому снижение энергопотребления электролизёрами с ТПЭ позволяет иметь высокие капитальные затраты. Оценка, сделанная исходя из одного и того же срока службы (около 5 лет), показывает, что стоимость водорода, произведенного методом электролиза с ТПЭ, даже меньше, чем стоимость водорода, произведенного методом ще-

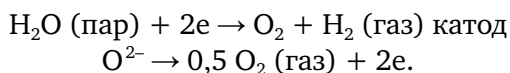
лочного электролиза, особенно если принять во внимание стоимость зданий, вспомогательного оборудования, очистки водорода и утилизацию щелочного раствора.

Очевидно, достаточно существенное снижение цены возможно при увеличении масштабов производства и усовершенствовании конструкции электролизёров. Однако изначально высокая стоимость таких электролизёров являлась препятствием для развития их производства.

Необходимо отметить, что при производстве электролизёров с ТПЭ используются те же материалы и технологии, что и для топливных элементов с ТПЭ (например, те же мембраны, электрокатализаторы на основе металлов Pt-группы, схожие технологии их синтеза и нанесения и т. д.). С этой точки зрения существуют реальные предпосылки для снижения стоимости электролизёров с ТПЭ, связанные с началом широкомасштабного производства топливных элементов с ТПЭ. Так, например, уже сегодня крупнооптовая цена мембраны Nation может быть снижена до 200 долл./м<sup>2</sup> и ожидаемая цена в ближайшем будущем составит менее 200 долл./м<sup>2</sup> (или 50 долл. за 1 м<sup>3</sup>/час производимого водорода при  $i = 1$  А/см<sup>2</sup>).

Анализ литературных данных и экспериментальных результатов, полученных авторами, позволяет сделать вывод о том, что в ближайшем будущем ожидается значительное развитие производства электролизёров с ТПЭ, и их стоимость будет приближаться к стоимости щелочных электролизёров. Таким образом, высокоэффективные электролизёры с ТПЭ могут стать очень полезными для децентрализованного производства водорода, его использования в транспортных средствах и энергоустановках на основе топливных элементов.

**Высокотемпературный электролиз водяного пара проводится в ячейках с твердым электролитом** на основе оксидов циркония, модифицированных добавками 10–15 % (мол.) оксидов некоторых элементов для увеличения его электропроводимости. К таким оксидам относятся оксиды кальция, иттрия, иттербия, селена, ванадия. Подобный электролит обладает униполярной проводимостью; ток через него переносится ионами кислорода, образующимися при диссоциации воды и выделении водорода на катоде по выражениям:



Водород отводится из катодного пространства вместе с неразложившимся паром.

Принципиальная схема ячейки высокотемпературного электролиза водяного пара приведена на рис. 4.3. Ячейка электролизёра состоит из электролитической трубки небольшого диаметра (~10 мм) с определенным

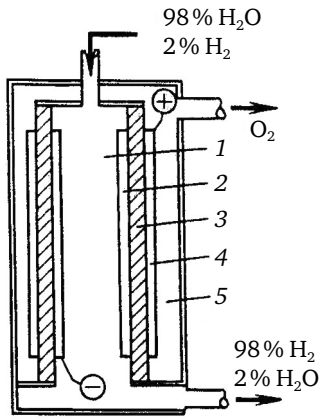


Рис. 4.3. Принципиальная схема ячейки для высокотемпературного электролиза водяного пара с коаксиальным расположением электродов: 1 — катодное пространство ячейки; 2 — катод; 3 — твердый электролит на основе оксидов циркония; 4 — анод; 5 — анодное пространство ячейки

числом электродов (например, 20 шт.), расположенных на внутренней (катоды) и наружной поверхности трубки (аноды). Отдельные электролитические элементы соединены между собой в серию при помощи проводников первого рода, размещенных в твердом электролите.

В качестве катода может быть использован никель с добавкой 10% (мол.) циркония, в качестве анода — кобальтит лантана и празеодима. Жесткие условия работы затрудняют подбор достаточно стойких в условиях анодной поляризации материалов для анода и создание надежной ячейки анод-электролит-катод, выдерживающих изменение температуры от комнатной до рабочей температуры электролиза.

При реализации этого процесса создается возможность резкого сокращения расхода электроэнергии на производство электролитического водорода путем замены части ее тепловой энергией, например, от ядерного реактора. Лучшее использование тепловой энергии достигается на комбинированной установке, сочетающей высокотемпературный электролиз с энергетической системой для утилизации тепла в паровом котле и турбогенераторе.

Процесс электролиза водяного пара можно проводить при значительно более низком напряжении по сравнению с электролизом водных растворов.

При высокотемпературном электролизе практически напряжение выше термодинамического и часть расходуемой на разложение электрической энергии превращается в тепло.

Реальное напряжение на ячейке вследствие потерь на необратимые процессы всегда будет выше и зависит от используемой плотности тока:

|  |     |     |      |      |
|--|-----|-----|------|------|
| Плотность тока, $\text{kA}/\text{m}^2$ | 1   | 2   | 3    | 5    |
| Напряжение, В                          | 1,0 | 1,2 | 1,35 | 1,65 |

Электролизёр с твердым оксидным электролитом может работать только в стационарном режиме; по крайней мере, в ходе эксплуатации следует избегать многочисленных циклов «пуск/остановка», сопряженных с циклическими изменениями температуры рабочих ячеек. Такие электролизёры существуют только в экспериментальных и опытно-промышленных образцах. Перспективны для получения электроэнергии в крупных стационарных установках.

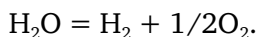
Независимо от способа реализации основной вклад в стоимость водорода, производимого методом электролиза (70–90%), вносят затраты на электроэнергию. Так что, в отличие от рассмотренного метода получения водорода из природного газа, при увеличении производительности электролизной установки цена водорода существенно снижаться не будет, и основным фактором, определяющим конкурентоспособность электролизёра, будет не стоимость, а эффективность его работы (КПД). В то же время при наличии дешевой электроэнергии (например, в «провальные» периоды ее потребления) электролитическое производство водорода может стать рентабельным.

При электролизе вода разлагается на водород и кислород. И тот, и другой газ находят широкое применение в современной промышленности, однако наиболее ценным продуктом из них является водород. Кислород может быть получен практически в неограниченных количествах низкотемпературным выделением из воздуха.

При современном состоянии техники электролиза воды и экономики производства водорода электрохимический метод получения водорода и кислорода для крупных потребителей не может конкурировать с химическими методами, его доля в получении водорода уменьшилась. Если в 1937 г. электролизом воды было получено 16% водорода от мирового производства, то в 1965 г. этим методом было получено 1,4 млрд м<sup>3</sup>, что составляет только 1% общей его выработки в мире. В настоящее время он является рентабельным для потребителей, предъявляющих высокие требования к чистоте водорода и кислорода, для установок малой мощности, а также при наличии очень дешевой электроэнергии и отсутствии запасов углеводородного сырья.

Получение водорода и кислорода электролизом воды осуществляется по сравнительно простой технологической схеме. Подготовка сырья — чистой воды — и первичная переработка водорода и кислорода, получающихся при электролизе (охлаждение, очистка от щелочного тумана, осушка), не требуют сложного оборудования.

Электролиз воды протекает по общему суммарному выражению:



Для получения водорода электролизом воды используют дистиллированную или обессоленную природную воду, что позволяет избежать накопления в электролите различных примесей. Однако несмотря на эти предосто-

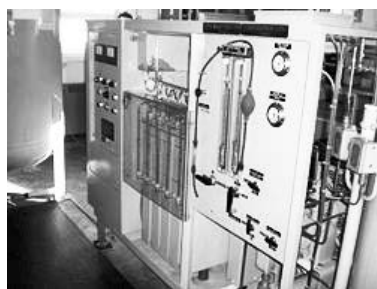


Рис. 4.4. Электролизёр — оборудование для производства водорода из воды

рожности, в электролите при длительной работе накапливаются примеси, содержащиеся (хотя и в небольшом количестве) в питательной воде или появляющиеся в нем в результате коррозии деталей электролизёров. Обычными примесями к электролиту являются  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}$ , железо, продукты разрушения металлических деталей электролизёра и диафрагмы.

Удельная электропроводимость обычной водопроводной воды невелика и близка к  $10^{-1}$  Ом/м, а очень чистой дистиллированной воды — около  $4 \cdot 10^{-6}$  Ом/м. Для увеличения удельной электропроводимости воды при электролизе применяют водные растворы электролитов — кислот, щелочей, солей.

В промышленности в настоящее время используют практически только щелочные электролиты: водные растворы едкого кали или едкого натра. Другие электролиты (растворы некоторых солей или кислот) иногда применяются в специальных электролитических установках.

При электролизе в электролит, то есть в токопроводящую среду (классический вариант — вода с небольшим количеством щелочи), помещают два электрода и подводят к ним напряжение. Однако в установках, работающих по этому принципу, для получения одного кубометра водорода требуется 4–5 киловатт-часов электроэнергии, что довольно дорого — производство эквивалентного по теплотворной способности количества бензина обходится втрое дешевле. Причем при электролизе большая часть электроэнергии теряется в виде выделения тепла при протекании тока через электролит.

Реальная возможность создания экономичных электролизёров появилась после появления твердых беспористых полимерных мембран, обладающих во влажном состоянии высокой электропроводностью. Используя их вместо классического электролита, мы можем существенно уменьшить тепловые потери. Однако такие мембраны дают кислую реакцию, и это приводит к коррозии контактирующих электродов. Для предотвращения этого нежелательного процесса мембраны покрывают тонким слоем платины или других редких металлов, что значительно повышает стоимость оборудования. Правда, уже начались разработки с целью получения твердополимерных электролизёров, без драгоценных металлов. Если удастся найти приемлемое решение, у электролиза появятся большие перспективы.

Для получения водорода из воды при электролизе требуется как минимум столько же энергии, сколько ее выделяется при сгорании водорода. Однако не вся эта энергия должна поступать в виде электроэнергии — можно использовать в электролизёрах и тепловую энергию воды. Чем выше ее температура, тем больше вклад тепловой и меньше электрической энергии. В ряде случаев это сулит немалую выгоду: можно использовать тепло от любого источника, скажем, от ядерного реактора. Особенно значительна экономия электроэнергии при температурах воды в районе тысячи градусов, однако в этих условиях сама вода переходит в пар, и снова потребуется

твёрдый термостойкий электролит. Весьма жесткие требования предъявляются в этом случае и к электродным материалам: они должны обладать высокой коррозионной стойкостью, механической прочностью и иметь термический коэффициент расширения, близкий к твёрдому электролиту.

Высокотемпературные электролизёры на основе циркониевой керамики разрабатывают сейчас в различных лабораториях мира, но, несмотря на значительные успехи в этом направлении, пока не появился промышленный аппарат, в котором вода разлагалась бы с использованием теплоты от внешнего источника.

Если же такие электролизёры появятся, один недостаток у этого метода, по-видимому, останется: малая удельная производительность установок — сегодня не более 0,5 литра водорода в час с одного см<sup>3</sup>. Это количество определяется самым характером электрохимических реакций, протекающих только на поверхности электродов.

Для предотвращения или уменьшения коррозии деталей электролизёров при приготовлении электролита применяют только чистые КОН или NaOH, обычно получаемые электролизом растворов хлоридов щелочных металлов методом с ртутным катодом.

В процессе электролиза происходят небольшие потери электролита, и при длительной работе устанавливаются стационарные концентрации примесей в результате равновесия между количествами примесей, поступающих в электролизёр и теряемых с электролитом. Предельное содержание растворимых в электролите и не разрушающихся в процессе электролиза примесей можно вычислить по уравнению

$$C_k = C_1 + \frac{C_o PC}{b},$$

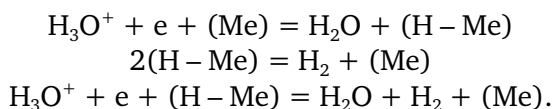
где  $C_o$  — содержание примеси в питательной воде, г/л;  $C_1$  — то же, в свежем растворе электролита, подаваемого в аппарат для пополнения потерь щелочи, г/л;  $C_k$  — равновесное содержание примесей в растворе электролита, г/л;  $C$  — концентрация щелочи в электролите, г/л;  $P$  — расход питательной воды на единицу выработанного газа, л;  $b$  — потери щелочи на единицу выработанного газа, г.

При питании электролизёра дистиллированной или обессоленной водой содержание посторонних ионов в электролите обычно очень невелико и не превышает для всех примесей (исключая карбонаты) 1–5 г/л. Содержание карбонатов может достигать нескольких десятков граммов на 1 л раствора. Особенно высоким оно может быть в том случае, если имеется постоянный контакт электролита с воздухом.

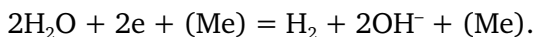
В процессе электролиза в кислых растворах на катоде происходит разряд ионов водорода с образованием атомарного водорода и последующей



рекомбинацией его в молекулярный по каталитическому или электрохимическому механизму в зависимости от материала катода и условий проведения электролиза:



В щелочных растворах, где концентрация ионов водорода очень мала, и в кислых растворах при очень высоких плотностях тока недостаток ионов водорода у катода должен восполняться за счет прямого разряда молекул воды с образованием атомарного водорода и иона  $\text{OH}^-$  с последующей рекомбинацией атомарного водорода в молекулярный:



Многочисленные работы, в которых сделана попытка дать технико-экономическую оценку путей развития производства водорода на ближайшие годы, свидетельствуют о перспективности разрабатываемых электрохимических методов. В перспективе можно ожидать, что параллельно с разработкой термических, термохимических, биохимических и других методов получения водорода из воды, начнутся интенсивные работы по усовершенствованию существующих и созданию новых более экономичных методов электролитического разложения воды на базе электрической энергии станций, работающих на атомной энергии.

**Электролиз воды под давлением** представляет большой технический интерес. При разложении 1 л воды образуется  $\sim 1242$  л водорода и 621 л кислорода, что позволяет при проведении электролиза в закрытом сосуде увеличить давление примерно в 1800 раз.

Проведение электролиза под давлением было предложено еще в конце XIX в., когда процесс электролиза воды начал использоваться в промышленности. Несмотря на большое число работ и многочисленные варианты конструкций для электролиза при повышенном давлении, в течение долгого времени промышленное применение находил только процесс электролиза при атмосферном давлении. Впервые электролиз воды под давлением нашел применение в нашей стране в 30-х годах XX в., когда были построены установки с электролизёрами ЭФ для работы под избыточным давлением до  $10 \cdot 10^5$ – $15 \cdot 10^5$  Па. В 50-х годах фирма Лурги (ФРГ) выпустила электролизёры для работы под давлением до  $30 \cdot 10^5$ – $40 \cdot 10^5$  Па. В настоящее время в промышленности используются электролизёры, работающие под сравнительно невысоким давлением  $(10\text{--}40) \cdot 10^5$  Па; рассматривается вопрос о создании установок для работы под более высоким давлением —  $(100\text{--}200) \cdot 10^5$  Па.

Проведение процесса электролиза воды под давлением упрощает производственную схему, так как позволяет отказаться от установки газгольдеров и компрессоров. При этом сразу получают водород и кислород под давлением, без затраты дополнительной энергии на компримирование (сжатие) газов.

Экономия электроэнергии, затрачиваемой на компримирование газов в случае электролиза под давлением, с учетом коэффициента полезного действия компрессорной установки в производстве газов под давлением  $10 \cdot 10^5$ ,  $100 \cdot 10^5$  и  $200 \cdot 10^5$  Па составляет соответственно 0,11; 0,21 и 0,23 кВт·ч/( $1 \text{ м}^3 \text{ H}_2 + 0,5 \text{ м}^3 \text{ O}_2$ ), а в пересчете на напряжение на ячейке 0,075; 0,142 и 0,156 В.

Следует отметить, что особенно большая экономия электроэнергии на компримирование достигается при работе под сравнительно небольшим давлением — до  $30 \cdot 10^5$ – $50 \cdot 10^5$  Па. При дальнейшем повышении давления экономия возрастает не так сильно.

При использовании электролиза под давлением наибольшие преимущества получают при переходе от атмосферного давления к давлениям  $(10\text{--}50) \cdot 10^5$  Па. Такое давление устраивает наибольшее число потребителей. Если же требуется давление  $(200\text{--}1000) \cdot 10^5$  Па, экономически выгоднее вести процесс электролиза под средним давлением и дополнительно компримировать полученные газы до нужного давления.

Конструкция электролизёров, работающих при давлении  $10 \cdot 10^5$ – $50 \cdot 10^5$  Па, решена без чрезмерного увеличения затрат металла на изготовление и усложнения схемы регулирования давления газов. Дальнейшее повышение рабочего давления потребует разработки новых конструкций и схем регулирования работы электролизёров. Техничко-экономические расчеты не указывают на заметные преимущества при применении электролизёров под давлением  $200 \cdot 10^5$  Па по сравнению с электролизёрами под давлением  $20 \cdot 10^5$  Па.

Проведение электролиза под давлением позволяет уменьшить напряжение на ячейке и соответственно снизить расходы электрической энергии по сравнению с электролизом при атмосферном давлении. Потери напряжения в электролите с ростом давления уменьшаются вследствие снижения газонаполнения (уменьшения объема газов под давлением). Электропроводимость чистого электролита с ростом давления незначительно увеличивается, а газонаполненного снижается, что объясняется повышением растворения газов в электролите. При проведении электролиза под повышенным давлением возрастают требования к конструкциям электролизёров и материалам для их изготовления, расход которых увеличивается. Повышаются требования к диафрагме и устройствам для регулирования давления водорода и кислорода по обе ее стороны.

Электролиз воды осуществляется в большом числе промышленных установок, работающих как при атмосферном давлении, так и под дав-

лением  $10 \cdot 10^5$ – $40 \cdot 10^5$  Па. Только в нашей стране на различных установках работает более тысячи электролизёров типа ЭФ и СУ под давлением  $10 \cdot 10^5$ – $15 \cdot 10^5$  Па.

Производство водорода электролизом воды на основе современных технологий оценивается по затратам от 3 до 20 долл. за ГДж в зависимости от стоимости электроэнергии и капитальных вложений в электролизёры.

### 4.3. Плазмохимия

Данный метод использует химическую активность ионизованного газа — плазмы, является гораздо более производительным по сравнению с электролизом, удельная производительность установок которого не более 0,5 литра водорода с  $1 \text{ см}^3$ . В специальные установки — плазмотроны подводят газы или пары различных веществ. Интенсивным электромагнитным полем в этих газах или парах создают электрические разряды, образуется плазма. Энергия электрического поля передается ее электронам и от них нейтральным молекулам, которые переходят в возбужденное, химически активное состояние.

Особо перспективны неравновесные плазмохимические системы, где электроны, разогретые электромагнитным полем до температур 10–15 тыс. °С, избирательно передают энергию молекулам, а последние, распадаясь, образуют нужные химические продукты. При этом газ в целом остается практически холодным (его температура 300–1000 °С). Важное преимущество этих систем — объемный характер протекающих в них процессов. Большие скорости химических реакций в газовой фазе позволяют добиваться гигантской удельной производительности плазмотронов.

Правда, плазмохимическое разложение различных веществ, которое уже в течение десятка лет выполняется в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова, показало, что далеко не все газы и пары можно эффективно разлагать методами плазмохимии. У ряда соединений пока еще не удается свести к минимуму процессы релаксации — быструю потерю энергии молекулами, возбужденными разрядом, и предотвратить обратные реакции — рекомбинацию. К числу таких веществ относятся пары воды, так что их прямое плазмохимическое разложение на кислород и водород в настоящее время малоэффективно. А вот углекислый газ оказался идеальным плазмохимическим объектом. Неравновесное возбуждение его молекулярных колебаний до 4–6 тыс. °С приводит к тому, что богатые энергией молекулы отбирают ее у более бедных. Происходит как бы «монополизация» энергии, в физических терминах — перезаселение высоковозбужденных состояний молекул. Это влечет за собой резкое повышение

скорости химических реакций и энергетической эффективности процесса. Коэффициент полезного действия при разложении углекислого газа на окись углерода и кислород превышает 80%. Практически всю вкладываемую в разряд энергию удастся направить на осуществление полезной химической реакции.

С учетом этого можно организовать двухстадийный

цикл производства водорода: на первой стадии осуществить плазмохимическое разложение углекислого газа, а на второй — выполнить давно освоенную промышленностью реакцию взаимодействия окиси углерода с водяным паром, в результате которой образуется водород и исходное вещество — углекислый газ. Таким образом, углекислый газ будет выполнять роль физического катализатора для получения водорода из воды и, не расходуясь, разрешит трудности, возникающие при разложении чистого водяного пара. В итоге формируется плазмохимический цикл, в котором тратится только вода, а углекислый газ постоянно возвращается в процесс.

Производительность такой плазмохимической системы в десятки тысяч раз превзойдет эффективность электролизёров, стоимость же водорода окажется примерно такой же, как и при электролизе. Это, конечно, еще довольно дорого, и сегодня практически весь водород, потребляемый промышленностью, производится за счет переработки природного газа.

Несколько лет назад в Институте имени И. В. Курчатова занялись таким обнадеживающим источником водорода, как сероводород, сопутствующий, в частности, обычным, прежде всего глубинным, месторождениям природного газа. Многие наши беды в районах газовых месторождений Поволжья связаны как раз с выбросами сероводорода или продуктов его переработки в атмосферу. Сейчас в промышленности в лучшем случае сероводород окисляют кислородом воздуха по методу Клауса, разработанному еще в прошлом веке, и получают при этом, серу, а водород прочно связывается с кислородом. Недостаток этого, кстати, весьма дорогостоящего процесса очевиден: из сероводорода извлекают только серу, а водород переходит в воду.

Поэтому в институте были начаты эксперименты по диссоциации сероводорода в плазме, чтобы на одной стадии получать два продукта: водород и конденсированную серу.

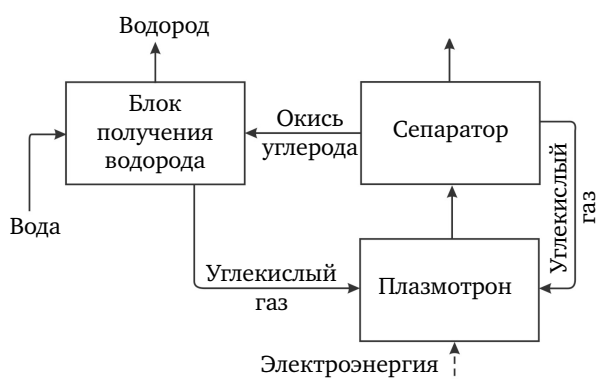


Рис. 4.5. Схема получения кислорода и водорода методом плазмохимии

Для этого сероводородную плазму заставляют вращаться с околосвуковой скоростью. Образующиеся в плазмотроне кластеры (частицы) серы выносятся при этом из реакционного объема за время, недостаточное для осуществления обратной реакции. Центробежный эффект позволяет добиться значительного отклонения плазмохимической системы от термодинамического равновесия и снизить энергозатраты на получение кубометра водорода до десятых долей кВт · час. Такой водород оказывается дешевле электролизного примерно в 15 раз, и его уже можно широко использовать и в энергетике, и в промышленности.

---

## 5. Атомно-водородная энергетика

---

### 5.1. Использование ядерной энергетики для получения водорода

---

**Д**ля получения водорода характерны большие удельные затраты энергии. В процессах с использованием ископаемых топлив энергию получают сжиганием этих топлив — для осуществления технологии ПМК сжигается около половины используемого газа. Процессы электролиза потребляют в среднем 50 МВт электрической энергии на тонну водорода. При реализации термохимических циклов необходимы температуры порядка 1000 К, что требует существенных материальных затрат на производство водорода и результатом этого является отдаление перспективы широкомасштабного применения водорода в энергетике. Изменить эту тенденцию может применение атомной энергетики для производства водорода [41]. Ядерная технология обладает практически неограниченными ресурсами дешевой энергии для производства водорода, к тому же при производстве электричества, тепла и водорода ядерная энергетика оказывает наименьшее воздействие на окружающую среду в сравнении с использованием углеродных ресурсов.

Используя произведенное ядерной энергией электричество, можно, применив электролиз, разделить воду на водород и кислород [45]. Если электролиз производить при помощи высокотемпературного пара, то полученная из ядерного реактора тепловая энергия может заменить часть электричества, и чистая эффективность (отношение произведенного водорода высокого нагрева (ННВ) к затраченной электроэнергии) увеличится. При термохимических циклах разделения воды можно получать всю входную энергию от произведенного в ядерных реакторах тепла, используя комплексные, движимые тепловой энергией химические реакции разложения воды на кислород и водород, и давать эффективность  $\sim 50\%$ .

**Низкотемпературный электролиз.** Этот метод является полностью доказанной коммерческой технологией, обеспечивающей сейчас 4% производства водорода в США. Установки электролиза коммерчески доступны, в них применяются три различные технологии — униполярные и биполярные ячейки, использующие водный раствор гидроксида калия (щелочной электролиз), и ячейки с протонно-обменными мембранами (PEM электро-

лиз). В крупных установках обычно применяют щелочную технологию. Доступны установки различной производительности — вплоть до  $\sim 1000$  кг  $H_2$  в день, и для увеличения объема производства подобные блоки можно соединять параллельно. Установки большой производительности обычно работают при давлении, близком к атмосферному; полученный водород затем сжимается, чтобы достигнуть давления трубопровода (20–30 атмосфер). Разрабатываются установки с высоким давлением, что сделает ненужной компрессию водорода.

Предел чистой эффективности низкотемпературных систем электролиза, производящих водород при трубопроводных давлениях, составляет  $\sim 75\%$ . Если подсоединить установку низкотемпературного электролиза к реактору LWR, производящему электроэнергию с 32%-м тепловым КПД, то чистая эффективность производства водорода составит 24%, а для усовершенствованного реактора с 48%-й тепловой эффективностью она будет равна 36%. Потеря эффективности и увеличение капитальных затрат при использовании двухступенчатого процесса преобразования высокотемпературного тепла в электричество с последующим использованием электричества для получения водорода — существенный негативный аспект низкотемпературного электролиза. При типичных затратах на производство электричества и электролиз стоимость получаемого водорода высока: 4–6 долл./кг или больше. Полезный для применения в малых масштабах, этот способ не может конкурировать с технологией получения водорода из природного газа, где типичная стоимость водорода равна 1,00–1,50 долл./кг. Там, где доступны большие количества электричества по очень низкой цене, например на ГЭС, низкотемпературный электролиз вполне приемлем. Его можно легко и быстро запускать и останавливать, и с его помощью можно производить пригодный для хранения водород.

Низкотемпературный электролиз применим в ЯЭ, но только при наличии большого излишка мощностей. Сейчас энергетические компании удовлетворяют базовый спрос, используя АЭС и другие способы производства электроэнергии с низкими эксплуатационными расходами, а пиковые нагрузки покрывают, добавляя блоки, работающие на органическом топливе. Последние имеют высокие топливные затраты, и их работу прекращают, когда они не нужны для покрытия спроса. Низкотемпературный электролиз мог бы играть роль в крупномасштабном ядерном производстве водорода, если бы энергетические компании имели больше ядерных мощностей, чем нужно для покрытия спроса на базовую электроэнергию, и могли перемещать выход электричества от сети к установкам электролиза в период низкого спроса на базовую электроэнергию.

**Высокотемпературный электролиз.** В этом методе пар с температурой  $\sim 800$  °С разделяется так, что водород и кислород собираются на двух электродах (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Общая конфигурация ячейки электролиза на твердом оксиде

Эксплуатация ячейки при высоких температурах уменьшает количество электричества, нужного для производства водорода, так как около 30 % энергии может вводиться в процесс в виде тепла, а не электричества. Кроме того, при температуре 800–1000 °С намного уменьшается сопротивление движению ионов кислорода через стабилизированный окисью иттрия или скандия циркониевый электролит, и все химические реакции протекают очень быстро. Наконец, эффективность производства электричества реактором, работающим при высокой температуре, значительно выше (около 45 %). Комбинация этих эффектов может привести к полной эффективности водородного производства — 45–50 %.

Процесс электролиза реализуют следующим образом. На одну из сторон плоской ячейки вводят пар и небольшое количество водорода (чтобы поддерживать изменяющееся состояние в катоде из двуокиси циркония и никеля).

Пар диффундирует на интерфейс между электродом и электролитом, где происходит первая реакция  $2\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2 + 2\text{O}^{2-}$ . Ионы кислорода несут электрический ток через твердый электролит к интерфейсу между электролитом и анодом, где происходит реакция  $2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + \text{e}^-$ . Связующая плата (ниже анода на рис. 5.1) обеспечивает каналы потока для поступающей и уходящей пароводородной смеси, а также для кислорода, произведенного в аноде. Она также обеспечивает электрическое соединение ячейки со следующей. Кислород движется через анод из лантаново-стронциевого манганита (LSM), а паро-водородная смесь — по катоду на противоположной стороне электролита. При испытаниях (в октябре 2004 и январе 2005 гг.)



экспериментальный комплект из десяти ячеек производил водород в виде газа (более 60 л/ч).

Idaho National Laboratory (INL) в сотрудничестве с фирмой Ceramates исследует технические вопросы и проблемы увеличения масштаба, связанные с твердоокисным электролизом, пара. Результаты испытаний ячеек продемонстрировали эффективное производство водорода в небольших масштабах с рабочими характеристиками, близкими к теоретическим предсказаниям. Исходя из этих предварительных результатов, высокотемпературный электролиз считают жизнеспособным способом производства водорода с использованием ядерной энергии.

**Термохимическое разложение воды** — это преобразование воды в водород и кислород посредством ряда приводимых в действие теплотой химических реакций.

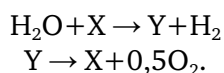
Как известно, для прямого термического разложения воды на водород и кислород требуется высокая температура на уровне 2500 °С. Однако воду можно термически разложить и при более низкой температуре, около 1000 °С, как этого требует термохимический процесс получения водорода с КПД до 50%.

В отличие от электролиза, энергия используется непосредственно, чтобы разложить соединения, содержащие водород. На отдельных стадиях процессов такого типа наряду с термическим воздействием для отщепления водорода может использоваться электричество (электролиз, плазма). Они называются гибридными термохимическими циклами или электротермохимическими процессами.

Более высокая температура увеличивает скорость реакции и уменьшает количество этапов, необходимых для процесса. Температура, требуемая на каждом этапе, должна соответствовать подведенному теплу во избежание пустой траты энергии и материалов.

Тепловая энергия вводится в термохимический цикл через одну или более эндотермических высокотемпературных химических реакций. Для отвода энергии на выходе цикла используется одна или более экзотермических низкотемпературных реакций. Все реагенты, отличные от воды, восстанавливаются и вновь поступают в цикл.

Таким образом, термохимические и комбинированные циклы по получению водорода — это многостадийное разложение воды с помощью различных химических реакций. Этих способов известно несколько десятков тысяч, и каждый год появляется еще около пятидесяти [46]. В сущности, термохимические циклы — это связывание воды, отщепление водорода и кислорода, регенерация реагентов:



Реагенты X и Y, а в многостадийных способах используются и дополнительные вещества, определяют название циклов: галоидные, на основе металлов и их оксидов, на основе различных соединений углерода и циклы на основе серы.

В термохимических и комбинированных циклах с точки зрения экономики и экологии вряд ли оправдано использование соединений мышьяка, ртути, ванадия, стронция, цезия, брома, йода, даже если они перспективны в отношении термодинамики. Наиболее конкурентно способны циклы, в которых используются дешевые и легкодоступные реагенты: оксиды железа, серы, углерода, хлориды железа.

По массообмену методы делятся на замкнутые и разомкнутые, у первых в ходе реакций расходуется только вода, тепло и электроэнергия (если цикл комбинированный), у вторых, кроме перечисленных, расходуются реагенты (X, Y и др.), которые, из экономической целесообразности, являются промышленными отходами: сероводород, сернистый ангидрид, различные сульфиды, не полностью окислившиеся металлы.

Все современные промышленные методы получения водорода это разомкнутые термохимические циклы. Их характерная особенность заключается в том, что энергию, необходимую для разложения воды на водород и кислород, получают путем сжигания органического горючего; процесс получения водорода из воды сопровождается реакцией связывания кислорода углеродом горючего с образованием диоксида углерода (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Принципиальная схема термохимического разложения воды

Недостатком такого открытого термохимического цикла является то, что в качестве отхода в окружающую среду выбрасывается диоксид углерода (на 1 т водорода 10–50 т диоксида углерода, в зависимости от технологии процесса и природы исходного горючего) (табл. 5.1).

Эффективность рассчитывается по высшей теплоте сгорания водорода, КПД по низшей.

Химические элементы в термохимическом процессе используются снова и снова с очень малыми потерями или вообще без них. Основные условия — тепловая энергия и вода. В некоторых процессах электричество используется для электролиза в одном или нескольких этапах. Используемые химические элементы включают различные катализаторы, органические растворы, комплексные вещества и растворимые соли.

**Цикл сульфата висмута**, изобретенный Научной Лабораторией Los Alamos, был оценен за эффективность более чем 50 % при 1000 °C (1800°F).

Процессу требуется меньшее количество серной кислоты, в отличие от других процессов. Это понижает напряжение для этапа электролиза (пер-

вый этап, показанный ниже). Коррозия также снижена. В ходе процесса используются твердые химические элементы.

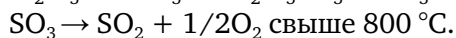
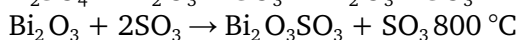
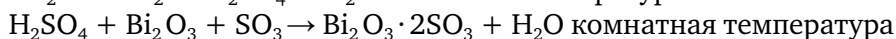
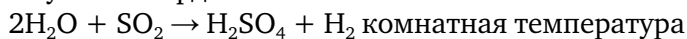


Таблица 5.1

**Наиболее перспективные термохимические и комбинированные циклы**

| Название циклов                        | Основные химические реакции процессов  | Эффективность процессов $\eta = \Delta H/Q$ , % | КПД преобразования энергии, % |
|--|--|---|-------------------------------|
| Железохлорный термохимический          | $3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2$ (1200–1000K);<br>$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{HCl} \rightarrow \text{FeCl}_2 + 2\text{FeCl}_3 + 4\text{H}_2\text{O}$ (400–750K);<br>$\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCl} + 0,5\text{O}_2$ (1100–1300K);<br>$2\text{FeCl}_3 \rightarrow 2\text{FeCl}_2 + \text{Cl}_2$ (600–1100K) | 28–35   | 24–30                         |
| Сернокислотный комбинированный Марк-11 | $\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2$ (350K, электролиз);<br>$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + 0,5\text{O}_2$ (1000–1100K)  | 40–50   | 34–42                         |
| Марк-13 комбинированный                | $\text{SO}_2 + \text{Br}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HBr} + \text{H}_2\text{SO}_4$ (320–370K, электролиз);<br>$2\text{HBr} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Br}_2$ (380–400K);<br>$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + 0,5\text{O}_2$ (1000–1200K)   | 37–45   | 31–38                         |
| Марк-16 термохимический                | $2\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + x\text{I}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{HI}x$ (300K);<br>$2\text{HI}x \rightarrow \text{H}_2 + x\text{I}_2$ (600K);<br>$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + 0,5\text{O}_2$ (1100K)  | 33–41   | 31–35                         |
| Гидриднолитиевый комбинированный       | $\text{H}_2\text{O} + 2\text{Li} \rightarrow 2\text{LiH} + 0,5\text{O}_2$ (550–800K, электролиз);<br>$2\text{LiH} \rightarrow 2\text{Li} + \text{H}_2$ (970–1200K)   | 42–48   | 35–41                         |
| Метан-метанольный комбинированный      | $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ (1100K);<br>$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ (520K);<br>$\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_4 + 0,5\text{O}_2$ (470K, электролиз)  | 33–40   | 28–34                         |

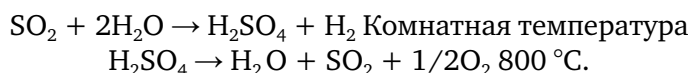
На первом этапе вода и диоксид серы образуют водород и серную кислоту. Затем, серная кислота транспортируется в резервуар, который содержит  $\text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{SO}_3$ . Содержимое реагирует с серной кислотой, чтобы произвести  $\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SO}_3$ . Этот состав высушен и нагрет до 800 °C (1500 °F). В этом

случае это соединение распадается на  $\text{V}_2\text{O}_3 + \text{SO}_3$  и трехокись серы. Трехокись серы нагревается до  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , и распадается на диоксид серы и кислород. Диоксид серы охлаждается, отделяется и возвращается к электролиту.

Кислород в этом процессе может использоваться для производства железа и аэрации водоемов. Если кислорода произведено больше чем, нужно, он уходит в атмосферу.

Что касается других термохимических циклов, каждый вступает в вышеупомянутый процесс — отдельную химическую реакцию, которая должна пройти так, чтобы требуемые количества полученных продуктов были доступны для следующего этапа, без отходов.

**Цикл Вестингауза** имеет место при  $300\text{--}375\text{ }^\circ\text{C}$  ( $570\text{--}700^\circ\text{F}$ ).



Как и в цикле висмута, первый этап включает электролиз воды, чтобы произвести серную кислоту и водород. Последняя реакция представляет простой распад молекулы серной кислоты при высокой температуре  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  ( $2190^\circ\text{F}$ ). Разложение 84% реагентов может произойти при  $1080\text{ }^\circ\text{C}$  ( $1976^\circ\text{F}$ ).

Компания General Atomics (GA), Sandia National Laboratories (SNL) и Университет Кентукки провели обзор мировой литературы по термохимическим, разлагающим воду циклам. Для детальной технической оценки из рассмотренных 115 циклов отобрано 25 наиболее перспективных. В результате изучения химической термодинамики этих циклов и оценки предварительных технических диаграмм был отобран цикл «йод — сера» (IS) (рис. 5.3).

Серная кислота концентрируется и разлагается при высоких температурах

Избыточная вода сдвигает химическое равновесие посредством гидратирования кислот

Бунзеновская реакция генерирует кислоты и выделяет в среду излишек теплоты при низких температурах

Излишек йодида сдвигает химическое равновесие и сепарирует кислоты в соответствии с фазовым равновесием «жидкость — жидкость»

Йодид водорода собирается и разлагается при умеренных температурах

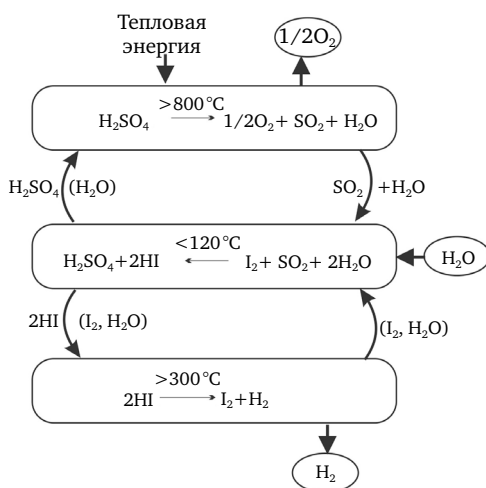
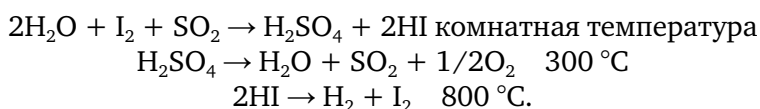


Рис. 5.3. Термохимический цикл «йод — сера» хорошо подходит для получения водорода с помощью ядерной энергетики

**Цикл «йод — сера».** В цикле IS к воде добавляют йод и диоксид серы, что приводит к экзотермической реакции с образованием йодида водорода и серной кислоты [40]. При надлежащих условиях эти вещества являются несмешивающимися и могут быть легко отделены. Серная кислота разлагается при 850 °С, высвобождая кислород и возвращая в оборот диоксид серы. Йодид водорода разлагается при температуре около 350 °С, высвобождая водород и возвращая в оборот йод. Конечный результат реакции — разложение воды на водород и кислород. На входе процесса требуются только вода и высокотемпературная тепловая энергия, а на выходе образуются водород, кислород и низкотемпературная тепловая энергия.



В результате получается малое количество водорода и имеются трудности в отделении серной кислоты от йодида водорода, отходы отсутствуют.

Испытательные установки лабораторного масштаба для цикла IS с низким давлением успешно демонстрировались в Японском институте атомной энергии. Подготовку к лабораторным испытаниям при прототипных условиях по давлению и температуре в настоящее время совместно проводят GA, SNL и CEA-Saclay (рис. 5.4).

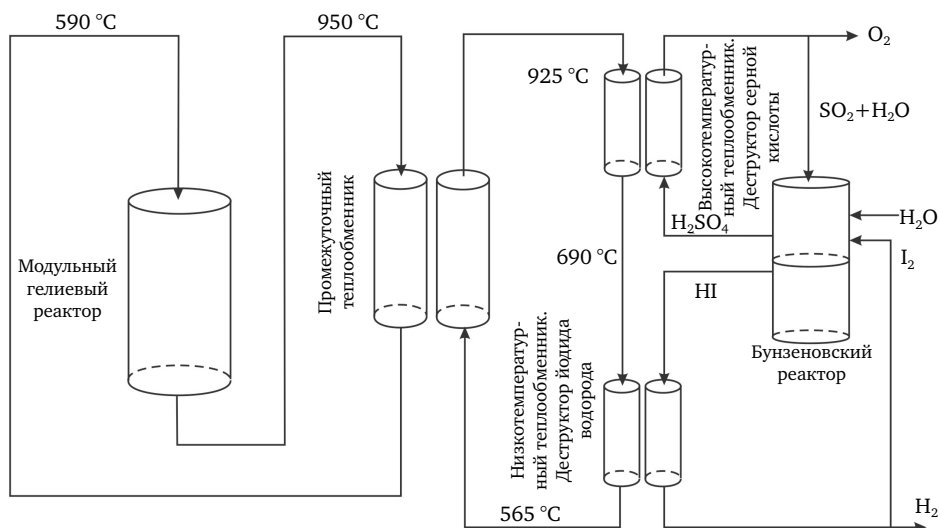


Рис. 5.4. Схема термохимического процесса разделения воды «йод — сера»

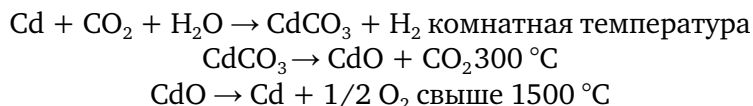
Цикл IS требует высоких температур, но предлагает высокую эффективность преобразования тепловой энергии в водород (рис. 5.5). Главное

преимущество состоит в том, что масштаб химических реакций определяется объемом, а не площадью электродов, как это имеет место при электролизе.

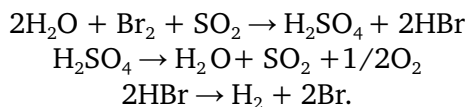
Таким образом, крупномасштабное производство водорода в ядерной энергетике должно обеспечить существенную экономию. Детальное изучение проекта указывает, что цикл IS, соединенный с модульным гелиевым реактором, мог бы про-

изводить водород по стоимости 1,50–2,00 долл./кг, что не намного больше текущей стоимости производства водорода из природного газа.

Ниже приведен другой процесс, исследованный в Los Alamos. В процессе не используется электролиз. Главный недостаток — высокие температуры.



Ученые сделали вывод, что самый многообещающий из четырех процессов — *бром-серный цикл*. В мае 1978 г. прошла демонстрация этого процесса. Он стал первым полным термохимическим процессом производства водорода разложением воды.



Серная кислота составляет 75 % веса всей смеси. Кислота разложена при 90–1200 °С и низком давлении 3 атм. Сталь используется в качестве катализатора. Нет необходимости в теплообменнике.

На третьем этапе, бромид водорода разлагается при напряжении 0,80 Вт. Получается 0,1 м<sup>3</sup>/ч водорода. Эти два газа легко отделяются, так как водород легче. Никакой сепаратор не требуется. Ниже приведена спецификация производства за 18 месяцев в течение 1984–1985 гг.

- Объем производимого водорода в час: 1 000 м<sup>3</sup>/ч.
- Переработанная серная кислота: 43,7 кг/ч.
- Рабочее давление: 24,7 атм.

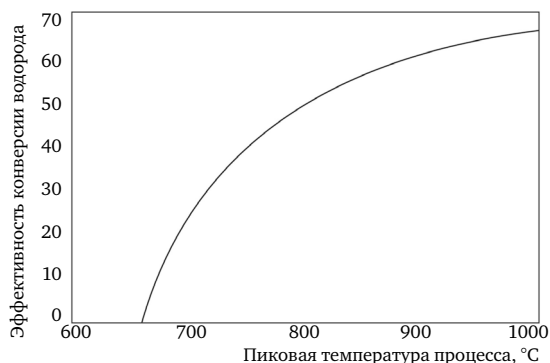
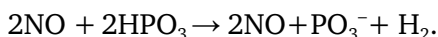


Рис. 5.5. Оценка эффективности процесса IS в зависимости от пиковой температуры процесса

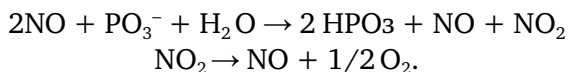
- Максимальная рабочая температура: 950 °С (1740°F).
- Требуемая электроэнергия: 100 кВт.
- Эффективность: 30–40 %.
- Стоимость: 1,00 долл./м<sup>3</sup>/ч.

Эффективность и стоимость сравниваются с 28–32% высокотемпературного электролиза твердого полимера. Производство не выявило никаких неустойчивостей, никаких побочных продуктов, или посторонних реакций. *Имеющихся знаний, химических технологий и коммерческих материалов достаточно для постройки Индустриальных экспериментальных заводов, никакой крупный технический прорыв не требуется... Термохимическое производство водорода выполнимо.*

**Процесс азотной кислоты.** Ньювелл Кук разработал процесс переработки азотных окисей и кислоты, разлагая воду для производства водорода. Окись азота обладает низкой температурой кипения, низким потенциалом ионизации и высокой тепловой стабильностью. Множество кислот может использоваться вместо фосфорной кислоты.



Фосфорная кислота разлагается, выпуская водород и образуя фосфат азота. При добавлении воды получается кислота и половина азотной окиси. Выделяется теплота, NO<sub>2</sub> нагревается, образуя NO, который используется повторно.

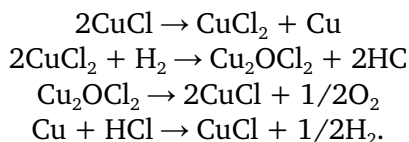


Окись азота распадается на положительный ион (NO<sup>+</sup>) и свободный электрон (e<sup>-</sup>). Этот процесс распада более эффективен, чем электролиз. Требуемая энергия — 58,2 Вт при 20 °С (68°F) и 1 атм. В данном процессе выделяется небольшое количество водорода, но его проще осуществить, чем другие химические циклы.

**Цикл «медь — хлор».** Возникший во время энергетического кризиса 1970-х гг. и иссякший вместе с ним интерес к термохимическим процессам возродился в последнее время, когда цены на органические топлива достигли рекордных отметок. Министерство энергетики США (DoE) вновь рассматривает некоторые из наиболее многообещающих ранних концепций, а также новые концепции, основанные на техническом прогрессе за прошлые 30 лет. Программа исследований DoE обращается к альтернативным термохимическим процессам, имеющим потенциал для достижения высоких показателей (высокая эффективность, низкие требования по температуре или уменьшенные сложность и коррозионная активность).

Альтернативные термохимические циклы могут работать при более низких температурах (около 550 °С), чем высокотемпературные циклы серы, требующие тепловой энергии с температурой свыше 825 °С. Циклы, работающие при более низких температурах, имеют два преимущества: меньшие требования к материалам и большая гибкость в отношении источников тепловой энергии. Для соединения с низкотемпературными циклами пригодны следующие реакторы: сверхкритические водные реакторы типа Candu-Mark 2; усовершенствованный быстрый реактор с натриевым теплоносителем; высокотемпературный газовый реактор (HTGR), причем последний можно использовать для производства электричества с высоким КПД.

Argonne National Laboratory исследует потенциал низкотемпературного цикла Cu-C1, состоящего из четырех главных реакций:



Водород производится при 425 °С, а кислород — при 530 °С. Это самые высокие температуры в цикле. Кроме того, эти реакции включают генерацию либо газа и твердого вещества, либо жидкости. Их можно довести до завершения простым выпуском газа, минимизируя таким образом потоки переработки. Ввиду отсутствия конкурирующих реакций они идеально подходят для циклического процесса. Сейчас изучают промежуточные реакции, которые порождают большие проблемы. Привлекает комбинация относительно недорогих химикалий и высокой чистой эффективности — 49% (NHV). Хотя эта эффективность несколько ниже, чем в циклах серы, многообещающая химия заставляет признать, что цикл Cu-C1 имеет реальный потенциал. DoE спонсирует работу по оценке других, недостаточно изученных циклов, чтобы гарантировать себя от пропуска потенциально важных вариантов.

**Гибридные циклы: HyS-цикл.** Разлагающие воду циклы, которые включают по крайней мере один электрохимический шаг реакции, классифицируют как гибридные термохимические циклы. Наиболее известный и хорошо изученный из них — гибридный цикл серы, также известный как HyS-цикл, цикл серы Westinghouse, цикл Ispra Mark II или цикл GA 22 (рис. 5.6). Все чисто термохимические циклы (типа IS) требуют по крайней мере трех отдельных шагов реакций. Гибридные циклы могут иметь только два шага. HyS-цикл имеет шаги:  $\text{H}_2\text{SO}_4 \Rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{O}_2$  и  $2 \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \Rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2$ . Оба процесса — термохимические; первый протекает при температуре 800–900 °С, второй — при 100–120 °С.



Присутствие  $\text{SO}_2$  на аноде электролизёра сильно уменьшает реверсивный потенциал ячейки, необходимый для расщепления молекул воды электролизом. Ввиду того что прямой электролиз воды имеет реверсивный потенциал ячейки 1,23 В при 25 °С, теоретический потенциал для электролиза на аноде, деполяризованном  $\text{SC} > 2$ , составит только 0,17 В на ячейку. Практические  $\text{SO}_2$ -электролизёры, как ожидается, будут потреблять в четыре раза меньше электроэнергии, чем обычные электролизёры. При объединении с эндотермическим разложением  $\text{H}_2\text{SO}_4$  чистые потребности в тепловой энергии для  $\text{HyS}$ -цикла значительно меньше, чем для прямого электролиза воды. Проблема состоит в разработке такого процесса, который максимизировал бы преимущество в тепловой эффективности при минимизации его сложности и капитальных затрат.

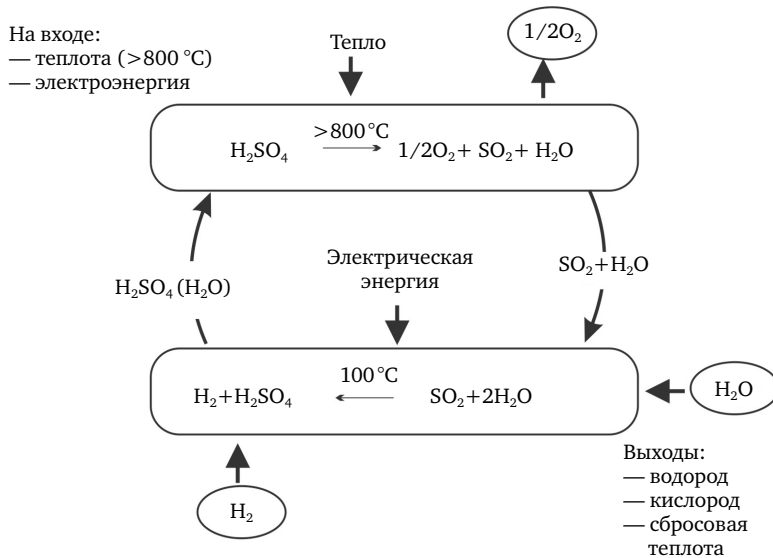


Рис. 5.6. Гибридный серный цикл

Недавняя работа Национальной лаборатории Savannah River (SRNL) привела к усовершенствованию процесса в  $\text{HyS}$ -цикле. Был проведен анализ технологической схемы  $\text{HyS}$ -системы, объединенной с охлаждаемым гелием ядерным реактором. Расчетная чистая тепловая эффективность установки составила 48,8 % при температуре на входе в процесс, равной 900 °С. Разработка деполяризованного  $\text{SO}_2$ -электролизёра, соответствующего заданным рабочим параметрам, имеющего долгий срок эксплуатации и эффективного по затратам, является основной целью продолжающихся исследований. SRNL разрабатывает электролизёр на основе PEM-электролиза. Уникальные условия  $\text{SO}_2$  электролиза, такие, как необходимость иметь дело с серной кислотой и растворенным  $\text{SO}_2$ , делают та-

кую разработку трудной задачей. Разработка дешевого электролизёра — ключевой фактор в получении эффективного по затратам  $\text{HyS}$ -цикла. Предварительный экономический анализ, сделанный на основе разумной экстраполяции прогнозных значений стоимости PEM-электролизёра, показывает, что  $\text{HyS}$ -цикл в комбинации с охлаждаемым гелием газовым реактором мог бы производить водород при затратах  $\sim 1,60$  долл./кг, что примерно соответствует затратам процесса IS. Дополнительные доходы от продажи побочного продукта (кислорода) могут уменьшить издержки. Технические проблемы включают оптимизацию эксплуатационных режимов (температура, давление, кислотная концентрация), материалы для строительства, проект ячейки (в том числе, выбор мембраны и нагрузки электрокатализатора), а также долговечность и рабочие характеристики. Другие технические вопросы связаны с секцией разложения серной кислоты и системой разделения  $\text{SO}_2/\text{O}_2$ . Следующим шагом является демонстрационная замкнутая петля полного  $\text{HyS}$  цикла, включая электролизёр и секции разложения кислоты.

**Затраты.** Химические элементы в термохимическом процессе используются снова и снова с очень малыми или вообще без потерь. Основные условия — тепловая энергия и вода. В некоторых процессах электричество используется для электролиза в одном или нескольких этапах. Используемые химические элементы включают различные катализаторы, органические растворы, комплексные вещества и растворимые соли.

Для сравнения альтернативных процессов, нужно рассмотреть экономические затраты. Стоимость высокотемпературного электролиза с твердыми полимерными электролитами сравнима со стоимостью лучших термохимических циклов. Газификация угля, однако, остается наиболее дешевым источником водорода. Переход к электролизу или термохимическим циклам достаточно длительный и дорогостоящий процесс.

В табл. 5.2 приведены сравнительные затраты различных коммерческих и экспериментальных способов производства водорода.

Было изучено более чем 1000 возможных термохимических циклов, использующих материалы, которые могут быть переработаны. В ходе процесса с участием углеводорода были переработаны все материалы. Единственными материалами для любого термохимического цикла были вода, высокая температура и электричество. Ученые сделали вывод, что самый многообещающий — бром-серный цикл.

Что касается затрат на эти термохимические процессы, то наблюдения «L. P. Vicelli» являются пессимистическими. *«Вследствие многих проблем, трудно предсказать, будет ли один из этих процессов производства водорода, которые являются чрезвычайно сложными с технической точки зрения, когда-либо использоваться в коммерческих целях».*

Таблица 5.2

Издержки производства водорода

| Процесс  | Цена, долл./( $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ ) | Цена, долл./млн ВТУ)  |
|--|---|-----------------------|
| Термохимический  | 0,02–0,04                                   | 6–12                  |
| Электролиз   | 0,05–0,06                                   | 15–18                 |
| Бензин   | 0,03  | 9                     |
| Электричество  | 0,05  | 15                    |
| Природный газ  | 0,01  | 3                     |
| Процесс  | Цена за единицу напряжения                  |                       |
|  | долл./ $\text{м}^3$                         | долл./ $\text{фут}^3$ |
| Каталитическое паровое преобразование                                  | 0,10–0,12                                   | 0,003                 |
| Частичное окисление горючего   | 0,12–0,16                                   | 0,003–0,005           |
| Газификация угля   | 0,17–0,20                                   | 0,005–0,006           |
| Обычный электролиз   | 0,34–0,41                                   | 0,01–0,012            |
| Передовой электролиз   | 0,22–0,24                                   | 0,006–0,007           |
| Высокотемпературный паровой электролиз                                 | от 0,22 до 0,24                             | от 0,006 до 0,007     |
| Требуемая энергия, $\text{Вт}/\text{м}^3$ ( $\text{Вт}/\text{фут}^3$ ) | долл./ $\text{м}^3$                         | долл./ $\text{фут}^3$ |
| 3,125–3,186 (88,5–90,2)  | от 0,19 до 0,22                             | от 0,005 до 0,006     |
| 3,064–3,124 (86,8–88,4)  | от 0,18 до 0,21                             | от 0,005 до 0,006     |
| 2,711–3,064 (76,8–86,7)  | от 0,17 до 0,18                             | 0,005                 |
| Обычный электролиз с участием серной кислоты                           | от 125,7 до 170,9                           | от 3,56 до 4,84       |
| Передовой электролиз с участием серной кислоты<br>Electrolysis         | от 43,8 до 87,9                             | от 1,24 до 2,49       |
| Муравьинокислотно-бикарбонатный цикл                                   | 2,32  | 0,008                 |

## 5.2. Реакторы для ядерного производства водорода

Входами низкотемпературного электролиза являются только вода и электричество. Производство водорода отделено от реактора и может располагаться в другом месте. Но при высокотемпературном электролизе и термохимическом разложении воды часть или весь энергетический вход представляет собой высокотемпературное тепло непосредственно из реактора. Поэтому установки разложения воды тесно связаны с реактором и должны располагаться около него. В таких системах промежуточный

контур переноса тепла помещен между контуром теплоносителя реактора и аппаратурой для производства водорода. Благодаря этому при любой утечке из реакторного контура производство водорода застраховано от загрязнения, а занятый на этом производстве персонал — от облучения [41]. Водородный завод может быть неядерным предприятием. Промежуточный контур также изолирует активную зону ядерного реактора от текучих сред водородного производства. Интерфейс теплообменника устанавливает граничные условия для выбора реакторной системы. Например, температурные требования для высокотемпературного электролиза, цикла IS или гибридного цикла серы приблизительно составляют 800–900 °С. При этом следует учитывать снижение температуры на переходе от активной зоны к пункту применения в системе производства водорода. Поэтому на выходе из реактора необходима температура около 950 °С. Успехи (если таковые будут) в разработке более низкотемпературных термохимических циклов, таких, как цикл Cu-Cl, позволят снизить требования к температуре на выходе реактора.

**Выбор реактора.** В SNL были оценены различные ядерные реакторы по способности обеспечить высокотемпературную тепловую энергию, необходимую для термохимического процесса, а также безопасное и экономически приемлемое соединение с процессом производства водорода. Для рекомендованной реакторной технологии должно быть достаточно минимальной технологической доработки для обеспечения высокой температуры и не должно потребоваться решения каких-либо серьезных вопросов в областях проектирования, обеспечения безопасности, эксплуатации и экономичности. При определении соответствующих концепций главным объектом рассмотрения становится реакторный теплоноситель. Типы реакторов, включая Поколение IV, оценивали по пяти требованиям и четырем критериям. К основным требованиям относятся: химическая совместимость теплоносителя с материалами первого контура и топливом; молекулярная стабильность теплоносителя при эксплуатационных температурах в радиационной среде; обеспечение необходимого давления в первом контуре; выполнение ядерных требований в отношении захвата нейтронов, активации нейтронами, действия продуктов деления, образования газов и т. д.; технологическая осуществимость и риски разработки. Важные критерии таковы: безопасность; эксплуатационные вопросы; капитальные затраты; совместимость с промежуточным контуром.

По результатам оценки в соответствии с указанными факторами были сделаны следующие выводы:

- реакторы типов PWR, BWR и реакторы с органическим теплоносителем не могут обеспечить нужной высокой температуры;
- разработка реакторов, охлаждаемых щелочными металлами, рискованна из-за сложностей с поведением материалов при высоких тем-

- пературах, но могут быть выявлены возможности для более низкотемпературных термохимических циклов;
- реакторы, охлаждаемые тяжелыми металлами, и реакторы с жидкосолевым охлаждением — обещающее направление, но нуждается в существенном развитии;
  - реакторы с газовым охлаждением являются основным выбором, причем реакторы с гелиевым теплоносителем нуждаются только в небольшом усовершенствовании;
  - реакторы с жидкой активной зоной должны быть существенно развиты из-за сложностей с поведением материалов при высоких температурах;
  - применение реакторов с газовой активной зоной не рекомендуется ввиду излишне спекулятивного характера этого направления реакторной технологии.

Итак, гелиевые реакторы с газовым охлаждением рекомендуются как основной выбор реакторного источника тепловой энергии для высокотемпературного электролиза, термохимического цикла IS и гибридного цикла NuS в производстве водорода.

ВТГР способны вырабатывать тепло с температурой около 1300 К, которое может быть использовано либо в прямом газотурбинном цикле для производства электроэнергии с высоким КПД, либо для снабжения высокотемпературным теплом и электричеством процессов производства водорода путем термохимического (или термоэлектрохимического) разложения воды или с помощью высокотемпературных электролизёров с суммарным КПД до 50%. Суммарная эффективность использования теплоты реактора в таких процессах может достигать 50–60%, обеспечивая благоприятные предпосылки для создания на их основе атомно-водородных комплексов.

Преимуществом гелия перед другими теплоносителями, применяемыми в ядерной энергетике, является его химическая и нейтронная инертность, а также неизменность фазового состояния. Благодаря инертности гелия в качестве материала конструкции тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок материала замедлителя и отражателя используется графит. Микросферы топлива из оксидов или карбидов делящихся материалов локализованы в индивидуальных многослойных контейнерах из пиролитического углерода и карбида кремния. Такая конструкция предотвращает выход продуктов деления и обеспечивает достижение ультравысоких выгораний, превышающих общепринятые в действующих реакторах в десятков раз. Дробление массы топливного сердечника на множество микрочастиц повышает надежность и безопасность топлива. Сочетание в активной зоне реактора гелия, графита и керамики создает наиболее благоприятные условия для получения высоких температур, эффективности использования топлива, ядерной и радиационной безопасности.

Первые в мире экспериментальные ВТГР были созданы в 60-е годы: «Драгон» (Великобритания), «Пич-Боттом» (США) и AVR (ФРГ). В 70-е годы были построены и введены в эксплуатацию демонстрационные АЭС FSV (США) и ТНТР-300 (ФРГ) электрической мощностью 330 и 300 МВт соответственно. На стыке столетий введены в эксплуатацию опытные энергетические реакторы ВТГР в Японии и Китае.

В России разработан ряд проектов ядерных блоков с высокотемпературными гелиевыми реакторами. Это опытно-промышленные установки ВГР — 50 МВт и ВГ — 400 МВт (эл), установка модульного типа ВГМ — 200 МВт, блок с газовой турбиной МВГР-ГТ (200 МВт), установка малой мощности ВТГР-10.

Для обоснования этих проектов создана мощная экспериментальная и технологическая база, на которой проведен обширный комплекс исследований нейтронной физики, теплогидравлики, термомеханики, массопереноса, технологии гелиевого теплоносителя, технологии топлива, поведения топлива, в том числе под облучением, графита, конструкционных материалов, элементов конструкции и опытных образцов оборудования. Этот задел активно используется в настоящее время при разработке проектов энергетических блоков с гелиевым реактором как электрического, так и неэлектрического применения.

Одним из наиболее продвинутых проектов ВТГР является международный проект ГТ-МГР, который разрабатывается совместными усилиями российских институтов (ОКБМ, РИЦ «Курчатовский институт», ВНИИНМ, НПО «Луч», ВНИПИЭТ) и американской кампании GA при управлении и финансировании Минатомом РФ и DOE US.

Энергетическая установка ГТ-МГР состоит из двух связанных воедино блоков: модульного высокотемпературного гелиевого реактора (МГР) мощностью 600 МВт тепловых, расположенного в подземном бункере, и газотурбинного преобразователя энергии прямого цикла (ГТ), размещенного в смежном бункере. Посредством замены газотурбинной системы на контур первичного гелия, промежуточный теплообменник, промежуточный гелиевый контур и трубопровод промежуточного контура для соединения с водородным производством можно превратить систему ГТ-МГР в систему H<sub>2</sub>-МГР. При этом каждый модульный реактор мощностью 600 МВт тепловых смог бы производить около 200 т водорода в день.

Отдельный большой аммиачный завод (промышленность удобрений) мог бы использовать два модуля для производства требуемого водорода. Большой завод по очистке нефти, где водород применяется для осветления тяжелой нефти, мог бы эксплуатировать три модуля H<sub>2</sub>-МГР, чтобы получать водород. Таким образом, масштаб ядерного производства водорода хорошо согласован с масштабами текущего промышленного спроса на водород. Потребовалось бы около 160 таких модулей мощностью 600 МВт те-

пловых, чтобы получать весь водород, используемый сейчас промышленностью США.

В настоящее время разработан эскизный проект ГТ-МГР для утилизации оружейного плутония при эффективной генерации электричества с использованием прямого газотурбинного цикла (КПД ~ 50%). Эскизный проект ГТ-МГР прошел экспертизу и одобрен управляющими инстанциями.

Работы по проекту продолжаются на стадии технического проектирования с экспериментально-стендовой отработкой и демонстрацией ключевых технологий: топливо и система преобразования энергии. Долгосрочная задача: завершение технического проекта и сооружение на площадке Сибирского химического комбината демонстрационного модуля и 4-х модульной АЭС для утилизации плутония с выработкой необходимой для региона тепловой и электрической энергии.

Технологии ГТ-МГР обеспечивают не только эффективную утилизацию плутония, но и будут использованы при разработке эффективных и безопасных реакторов нового поколения, в том числе для производства водорода. В настоящее время ведется оценка этого проекта для производства водорода с использованием термохимических циклов или высокотемпературного электролиза с намерением соорудить реактор МГР-Н2 в INEEL в рамках американской программы NE-2010.

Работы по ГТ-МГР соответствуют поручению президентов России и США (заявление на встрече в России в мае 2002 года) по развитию российско-американского сотрудничества по инновационным ядерным технологиям для будущей ядерной энергетики и изучению мер по ускорению утилизации оружейного плутония.

В рамках проработок были рассмотрены несколько вариантов МГР для энерготехнологического назначения:

- для производства электроэнергии и коммунального теплоснабжения, с преобразованием тепловой энергии активной зоны в электрическую в прямом газотурбинном (ГТ) цикле Брайтона — МГР-100 ГТ;
- для производства электроэнергии и водорода методом высокотемпературного электролиза пара (ВЭП) — МГР-100 ВЭП;
- для производства водорода методом паровой конверсии метана (ПКМ) — МГР-100 ПКМ;
- для высокотемпературного теплоснабжения нефтехимического производства (НП) — МГР-100 НП.

Каждый вариант установки МГР-100 состоит из энергетической и технологической частей.

Энергетическая часть максимально унифицирована для всех вариантов и представляет собой энергоблок, включающий реактор и, в зависимости от назначения, газотурбинный блок преобразования энергии (БПЭ), пред-

назначенный для производства электроэнергии, и (или) блоки теплообменного оборудования (рис. 5.7).

Технологическая часть МГР-100, в зависимости от назначения, представляет собой или технологическую установку по производству водорода или контуры высокотемпературного теплоснабжения, снабжающие теплом различные технологические процессы.

Компоновка всех рассматриваемых вариантов МГР-100 выполнена с учетом требований безопасной эксплуатации реакторной установки при всех возможных на АС авариях. Каждая РУ размещается в главном здании АС, состоящем из наземной части, являющейся зданием техобслуживания и перегрузки реактора (центральным залом) и подземного контейнента (защитной оболочки РУ) низкого давления, расположенного под центральным залом.

В вариантах энергоисточников для МГР-100 ВЭП (рис. 5.8) предусматривается применение унифицированного газотурбинного блока преобразования энергии (БПЭ).

В зависимости от рабочей среды, типа процесса и вероятности попадания радиоактивности в продукт технологического производства и загрязнения радиоактивными продуктами оборудования, может применяться двух- или трехконтурная схема РУ.

Так, в АС для производства водорода методом высокотемпературного электролиза пара (МГР-100 ВЭП) и методом паровой конверсии метана (МГР-100 ПКМ) применена двухконтурная схема.

В этих процессах основным компонентом технологической среды является водяной пар. Проведенный анализ показывает, что при возможных аварийных ситуациях с разгерметизацией парогенератора или высокотемпературного теплообменника эффекты поступления водородосодержащих продуктов в реактор надежно регулируются системами управления и защиты реактора.

*Энергоисточники МГР-100 ВЭП и МГР-100 ПКМ для производства водорода.* Переход к водородной экономике основывается, в том числе, на создании технологии использования энергии ВТГР в процессах производства

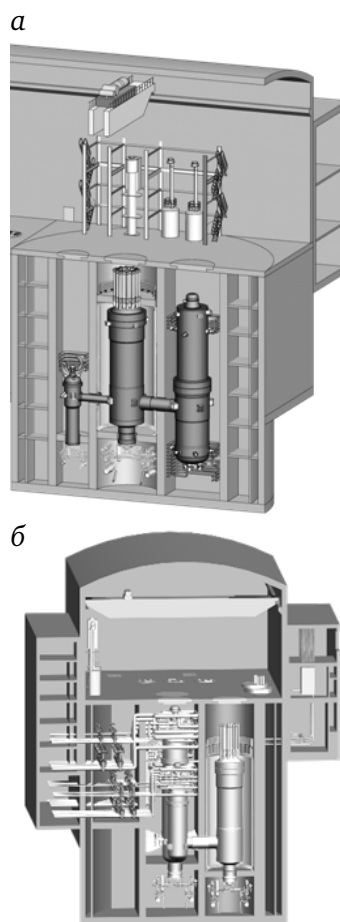


Рис. 5.7. Компоновка реакторных установок:

- а — МГР-100 ВЭП;
- б — МГР-100 ПКМ



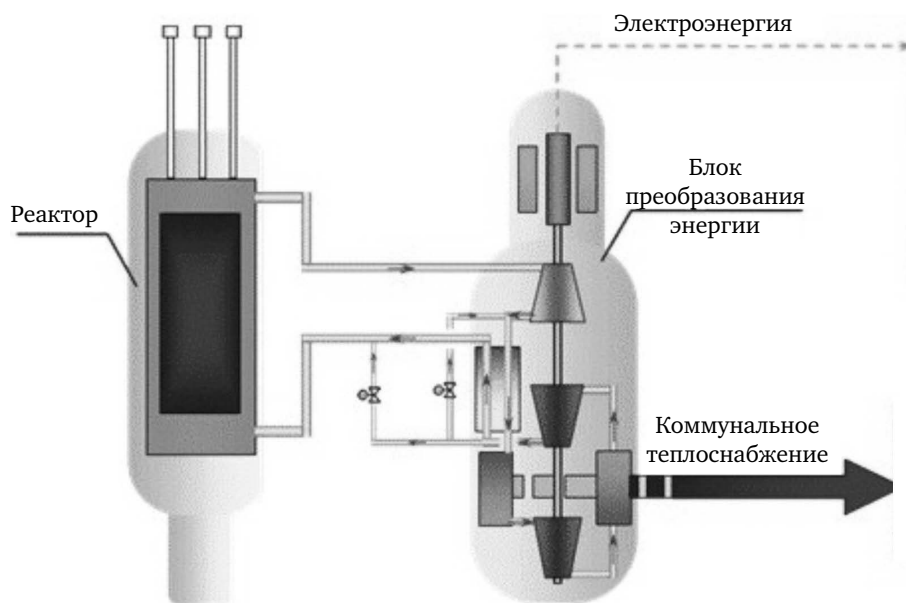


Рис. 5.8. Блок преобразования энергии (БПЭ)

водорода, имеющих высокую термодинамическую и технико-экономическую эффективность. Эти процессы, по возможности, должны исключать потребление органического топлива, прежде всего нефти и газа, которые имеют ограниченные запасы и являются ценным сырьем для промышленности. К таким процессам относится получение водорода из воды с помощью следующих основных способов: электролиз, термохимическое разложение и высокотемпературный электролиз пара. Их стоимость не зависит от постоянно возрастающих цен на нефть и газ, в отличие, например, от получения водорода из метана. В то же время для первого этапа освоения водородной энергетики, при еще относительно низких ценах на газ, рассматриваются процессы получения водорода из метана. Анализ требований к эффективности производства потребляемой энергии и уровню температуры тепла позволяет сформулировать требования к ВТГР как к источнику энергии, основными из которых являются:

- производство высокопотенциального тепла до 950 °С;
- отсутствие загрязнения водорода радиоактивными веществами или их приемлемо низкий уровень;
- низкая стоимость производства водорода по сравнению с традиционными способами;
- высокий уровень безопасности энерготехнологического комплекса.

В качестве основных процессов производства водорода на этапе концептуальных проработок МГР-100 рассматриваются:

- высокотемпературный электролиз воды;
- паровая конверсия природного газа (метана).

Принципиальная схема МГР-100 ВЭП для производства электроэнергии и перегретого пара требуемых параметров с целью получения водорода методом высокотемпературного электролиза представлена на рис. 5.9.

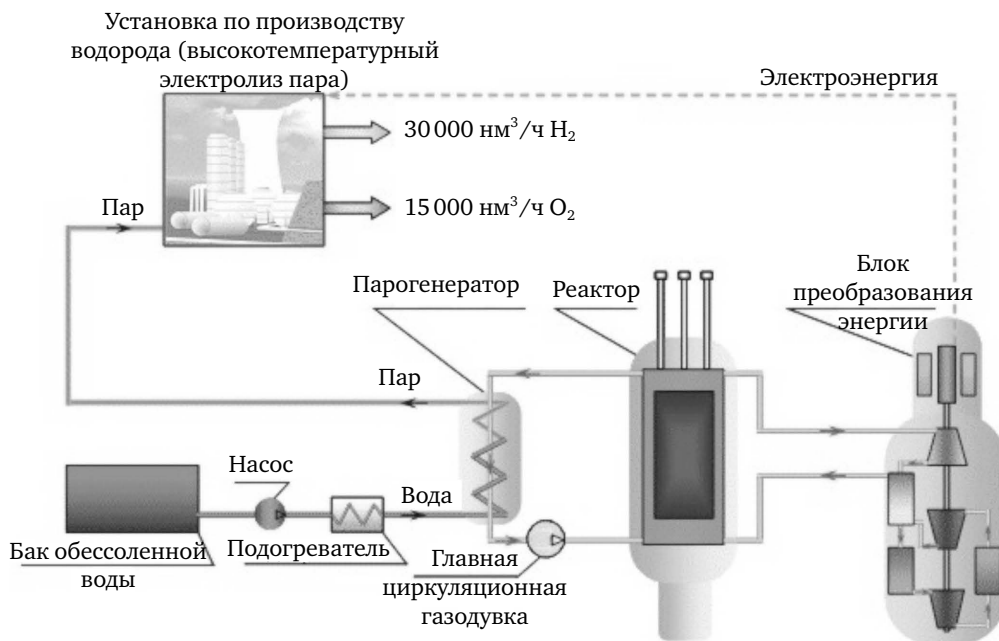


Рис. 5.9. Принципиальная схема МГР-100 ВЭП

За основу для варианта МГР-100 ВЭП принята конфигурация РУ с параллельной схемой расположения петель теплообмена в первом контуре. Одна петля включает реактор, парогенерирующий блок и ГЦГ. Другая — реактор и БПЭ. Таким образом, часть тепловой энергии (~10%), вырабатываемой в активной зоне реактора, передается в ПГБ для нужд водородного производства, остальная часть преобразуется в БПЭ в электрическую энергию в прямом газотурбинном цикле.

Основные параметры установки приведены в табл. 5.3. Температура гелия на выходе из реактора составляет 850 °С, что не превышает соответствующей температуры в прототипной РУ ГТ-МГР. Второй контур предназначен для производства перегретого пара в парогенераторе (рис. 5.10).

Циркуляция гелия в ПГБ осуществляется главной циркуляционной газодувкой. Подвод воды и отвод пара производится через крышку ПГ. Перегретый до требуемых параметров пар отводится по трубопроводам в установку высокотемпературного электролиза на твердооксидных электрохимиче-

ских элементах, в которой водяной пар разлагается на водород и кислород с разделением этих реагентов. Установка ВЭП снабжается электроэнергией, вырабатываемой генератором БПЭ.

Таблица 5.3

**Основные параметры МГР-100 ВЭП**

| № п/п | Наименование параметра                          | Значение  |
|-------|---|-----------|
| 1.    | Тепловая мощность реактора, МВт                 | 215       |
| 2.    | Полезная электрическая мощность генератора, МВт | 87,1      |
| 3.    | КПД выработки электроэнергии (нетто), %         | 45,7      |
| 4.    | Температура гелия на входе/выходе реактора, °С  | 553/850   |
| 5.    | Расход гелия через реактор, кг/с                | 138       |
| 6.    | Давление гелия на входе в реактор, МПа          | 4,41      |
| 7.    | Степень расширения в турбине                    | 2,09      |
| 8.    | Частота вращения генератора/ТК, об/мин          | 3000/9000 |
| 9.    | Расход гелия через турбину, кг/с                | 126       |
| 10.   | Температура гелия на входе/выходе БПЭ, °С       | 850/558   |
| 11.   | Мощность ПГ, МВт                                | 22,3      |
| 12.   | Расход гелия через ПГ, кг/с                     | 12,1      |
| 13.   | Температура гелия на входе/выходе ПГ, °С        | 850/494   |
| 14.   | Паропроизводительность, кг/с                    | 6,46      |
| 15.   | Давление пара на выходе ПГ, МПа                 | 4,82      |

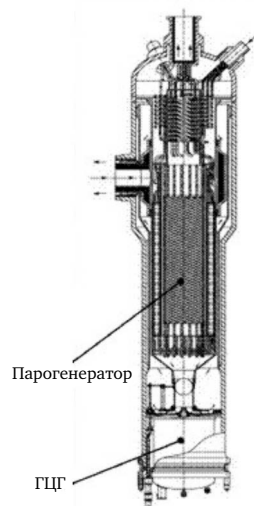


Рис. 5.10. Парогенерирующий блок

Принципиальная схема МГР-100 ПКМ для выработки высокопотенциального тепла с целью получения водорода методом паровой конверсии метана представлена на рис. 5.11.

Паровая конверсия метана является на сегодня основным промышленно освоенным и приспособленным для первого этапа внедрения технологий производства водорода (совместно с ВТГР) процессом. На нем основано существующее мировое производство водорода. Сочетание ВТГР и ПКМ позволяет примерно на 40% снизить потребление природного газа, а следовательно, и затраты, необходимые для производства водорода. Экономическая эффективность внедрения ПКМ определяется ценой на газ и температурой потребляемого тепла. Требуемая температура нагрева парогазовой смеси должна быть не ниже 800 °С, при-

чем дальнейшее повышение температуры на эффективность процесса практически не влияет.

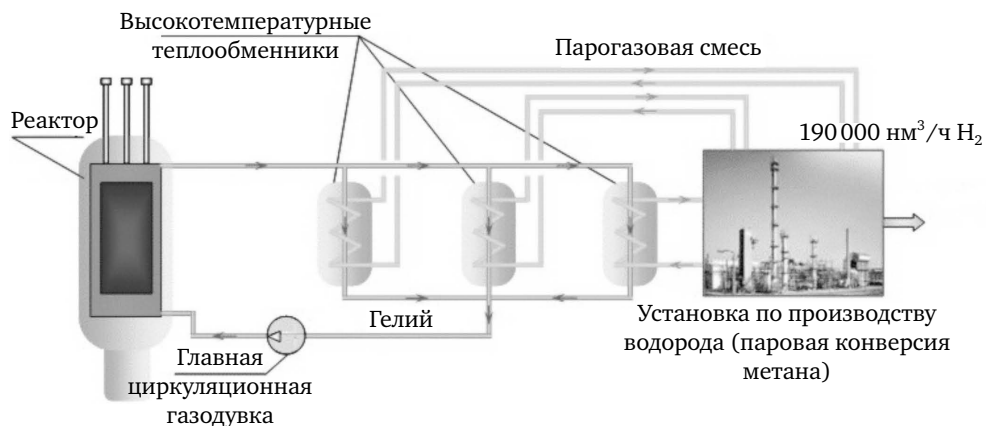


Рис. 5.11. Принципиальная схема МГР-100 ПКМ

Тепловая энергия отводится от реактора к рабочей среде второго контура (парогазовой смеси) в высокотемпературных теплообменниках (ВТО), которые являются составной частью термоконверсионного аппарата (ТКА). Реализация конверсии метана ( $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} (\text{пар}) + \text{тепло} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ ) происходит в ТКА по трехступенчатой схеме. Парогазовая смесь (пар — 83,5 %,  $\text{CH}_4$  — 16,5 %) подается последовательно в три ступени — ТКА1, ТКА2 и ТКА3. Это и определяет конфигурацию теплопередающего блока РУ. Он состоит из трех отдельных высокотемпературных теплообменников ВТО 1, ВТО 2, ВТО 3 (рис. 5.12), представляющих отдельные ступени (секции) блока. Расположение секций ВТО по ходу теплоносителя первого контура — параллельное, по ходу парогазовой смеси — последовательное.

После ТКА3 парогазовая смесь (пар — 55 %,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  — 45 %) с большой концентрацией водорода последовательно проходит блок очистки от  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  и направляется в блок отделения водорода. Возвратная фракция и природный газ смешиваются с перегретым паром и затем направляются в ТКА. Циркуляция гелия в первом контуре осуществляется ГЦГ, парогазовой смеси — компрессорами.

Основные параметры установки приведены в табл. 5.4. Температура гелия на выходе из реактора составляет 950 °С.

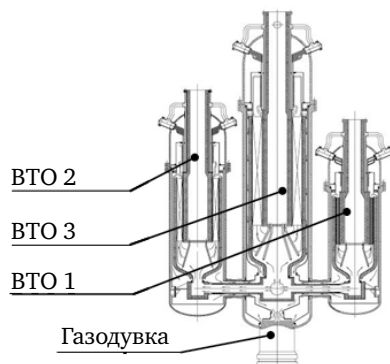


Рис. 5.12. Высокотемпературный теплообменник

В зависимости от типа компоновки (петлевая или блочная) основного оборудования РУ, конфигурация теплопередающего блока может быть различной. В блочной компоновке основное оборудование РУ соединяется с помощью коротких патрубков типа «труба в трубе», в состав теплопередающего блока целесообразно включить также и ГЦГ.

Таблица 5.4

**Основные параметры МГР-100 ПКМ**

| № п/п    | Наименование параметра                                   | Значение  |
|----------|--|-----------|
| 1.       | Тепловая мощность реактора, МВт                          | 215       |
| 2.       | Температура гелия на входе/выходе реактора, °С           | 450/950   |
| 3.       | Расход гелия через реактор, кг/с                         | 81,7      |
| 4.       | Давление гелия на входе в реактор, МПа                   | 5,0       |
| 5.       | Давление парогазовой смеси на входе теплообменников, МПа | 5,3       |
| ВТО-ТКА1 |  |           |
| 6.       | Мощность теплообменника, МВт                             | 31,8      |
| 7.       | Расход гелия/парогазовой смеси, кг/с                     | 12,1/43,5 |
| 8.       | Температура парогазовой смеси на входе/выходе, °С        | 350/650   |
| ВТО-ТКА2 |  |           |
| 9.       | Мощность теплообменника, МВт                             | 58,5      |
| 10.      | Расход гелия/парогазовой смеси, кг/с                     | 22,2/60,9 |
| 11.      | Температура парогазовой смеси на входе/выходе, °С        | 350/750   |
| ВТО-ТКА3 |  |           |
| 12.      | Мощность теплообменника, МВт                             | 125       |
| 13.      | Расход гелия/парогазовой смеси, кг/с                     | 47,4/101  |
| 14.      | Температура парогазовой смеси на входе/выходе, °С        | 350/870   |

**Повышенная безопасность.** Благодаря значительной теплоемкости активной зоны, большому запасу до температуры разрушения и отрицательной обратной связи по температуре и мощности ВТГР устойчивы при авариях реактивного типа. В модульном исполнении (типа ГТ-МГР) они выдерживают аварии с потерей теплоносителя, так как кольцевая конфигурация активной зоны путем теплопроводности обеспечивает пассивный отвод остаточного тепла в окружающую среду без превышения допустимых температур. Таким образом, реакторы данного типа за счет самозащитности и пассивных средств исключают плавление зоны при авариях с потерей теплоносителя и авариях реактивного типа. Реакторы с жидкометаллическим теплоносителем, реакторы с охлаждением щелочными металлами и тяжелыми металлами (сплавы и эвтектики свинца), а также

жидкосолевые реакторы могут хорошо подходить для соединения с низкотемпературными термохимическими циклами при успешном развитии соответствующих реакторных концепций.

**Гарантии нераспространения.** Особенности конструкции топлива, защищенного многослойными керамическими покрытиями и использование в качестве топлива урана низкого обогащения (не более 20%) способствуют защите от распространения делящихся материалов свежего топлива. Риск распространения делящихся материалов из ОЯТ практически сводится к нулю благодаря очень глубокому выгоранию исходного материала, накоплению вредных изотопов и технологическим трудностям переработки отработанного топлива ВТГР.

Применение ВТГР в промышленности в качестве энергоисточника для крупномасштабного производства водорода и водородосодержащих энергоносителей позволит в значительной степени решить проблему дефицита углеводородного сырья. Доля этого сегмента рынка атомной энергетики не уступает по масштабу электроэнергетическому применению. По прогнозам специалистов, к 2050 г. может потребоваться создание, по крайней мере, 50–100 четырехблочных атомных энерготехнологических комплексов с общим объемом производства водорода 25–50 млн т в год для России и внешнего рынка.

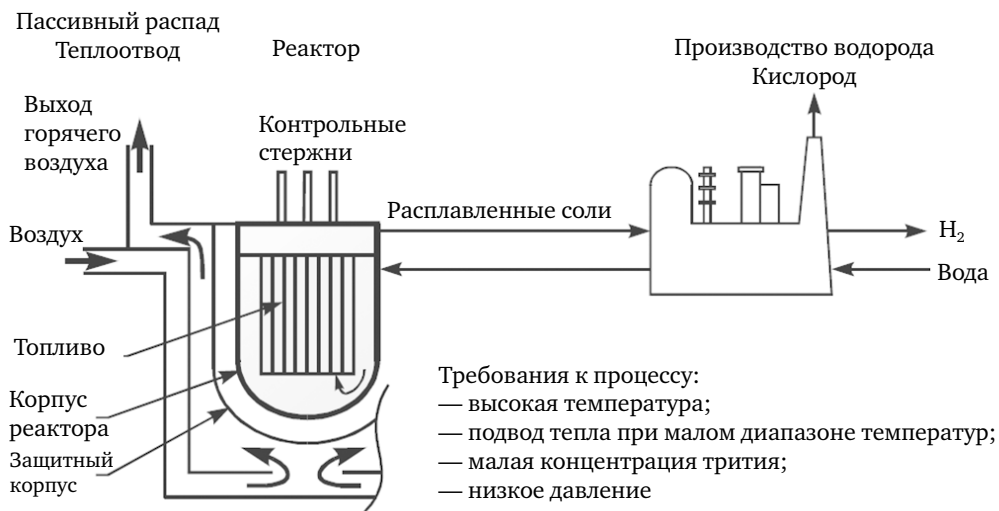


Рис. 5.13. Современные высокотемпературные реакторы (АНТР) с использованием охладителя в виде расплавленных солей и графитовой матрицы с шаровым топливом

По прогнозу, мировое потребление энергии увеличится в несколько раз в течение этого столетия, причем наибольшая часть потребности в новой энергии придется на развивающиеся страны. Для покрытия их нужд луч-

ше подходят *малые (малой мощности) ядерные реакторы*, чем большие АЭС, построенные по принципу экономии на масштабах, так как лучше соответствуют условиям развивающихся стран, испытывающих недостаток в распределяющих электричество сетях. Требования к малым реакторам включают гарантии нераспространения, пассивную безопасность, эффективное использование ресурсов урана, также простоту и надежность эксплуатации.

Дизайн реактора должен соответствовать требованиям по производству водорода. В соответствии с этими требованиями строятся современные высокотемпературные реакторы (рис. 5.13).

**Шаровое топливо** — единственное топливо, которое работает при требуемых температурах в водородном производстве (рис. 5.14).

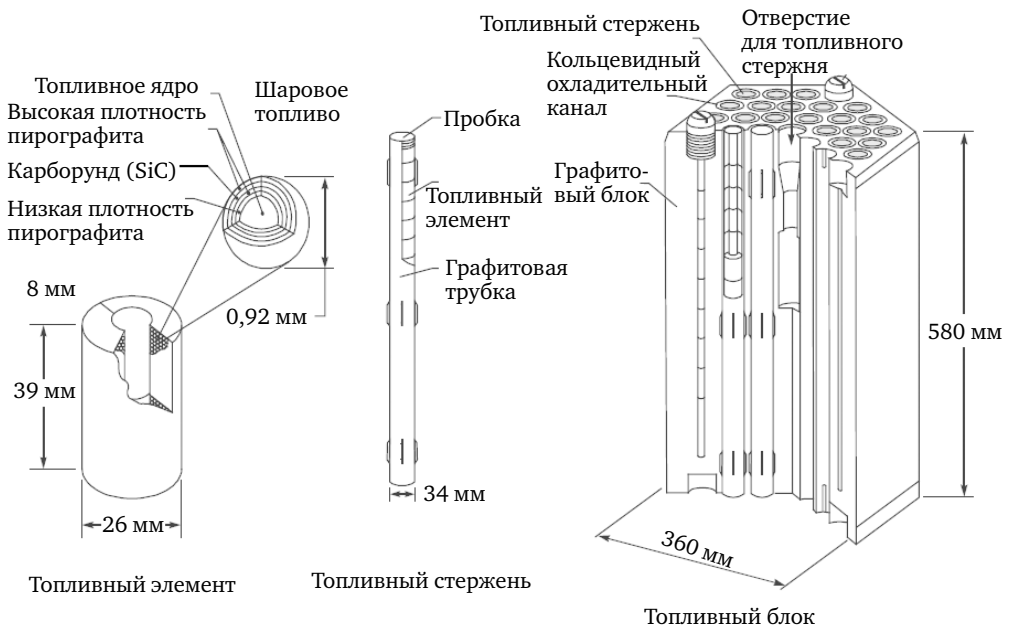


Рис. 5.14. Компоновка топливного блока реактора

Расплавленные соли обычно используются для переноса высокотемпературного тепла на химических заводах. Их свойства, такие как низкое давление, высокая температура, высокая теплоемкость (в несколько раз больше чем у натрия), ограниченность реакций с водой и воздухом, позволяют эффективно и недорого переносить тепло на расстояния.

**Концепция STAR.** Для удовлетворения этих требований развита концепция Безопасного транспортабельного автономного реактора (Secure Transportable Autonomous Reactor — STAR) [47], построенная на основе модульного охлаждаемого свинцом быстрого реактора малой мощности (LFR).

Концепция STAR инкорпорирует черты устойчивости в отношении нераспространения ядерного оружия, включая 20-летний интервал перегрузки всей активной зоны, обеспечивает стократное увеличение использования содержащейся в уране энергии в закрытом топливном цикле, реализует пассивную безопасность, режим автономного следования за нагрузкой благодаря свойствам свинцового теплоносителя и нитридного топлива, а также сильной обратной связи реактивности активной зоны с быстрым спектром с изменениями состояния теплоносителя и температуры топлива. В рамках концепции STAR разрабатывается SSTAR — представитель Поколения IV, модульный быстрый реактор малой мощности (20 МВт электрическая мощность или 45 МВт тепловых), со временем службы активной зоны (интервалом перегрузки) 20 лет. Эти характеристики относятся также к реакторам STAR-LM и STAR-H2, являющимся членами семейства STAR. Он рассчитан на производство электроэнергии в соответствии с потребностями развивающихся стран, особенно, отдаленных общин или промышленных районов, не подсоединенных к сети.

Устойчивость к нераспространению реализована применением активной зоны из нитридного топлива с подпиткой трансураними (TRU) из отработавшего топлива (ОЯТ) от LWR — топливо TRU является самозащитным в аспекте предполагаемого похищения. Активная зона состоит из единственной кассеты/картриджа; доступ к топливу ограничен. Оборудование для перегрузки топлива доставляют на площадку только на период перегрузочных операций в конце 20-летнего срока службы активной зоны, когда картридж удаляют из реакторного корпуса и помещают в транспортный контейнер для перевозки в региональный центр поддержки ЯТЦ для переработки и применения при повторном изготовлении топлива. В реакторный корпус устанавливают свежий картридж с активной зоной, и затем перегрузочное оборудование удаляют с площадки. SSTAR (рис. 5.15) — это реактор с естественной циркуляцией. Низкое нейтронное поглощение свинцового теплоносителя позволяет при необходимости открыть доступ к стержням топливной решетки большого объема теплоносителя и таким образом уменьшить фрикционное падение давления в активной зоне и увеличить перенос тепла за счет естественной циркуляции теплоносителя. Теплоноситель проходит вверх через активную зону, размещенную у основания корпуса реактора, через трубу, расположенную высоко над активной зоной, а затем идет вниз через четыре сменных модульных теплообменника типа (Pb-to-SO<sub>2</sub>) и поступает в опускную камеру. Аварийное удаление теплоты обеспечивается воздушным охлаждением защитного корпуса, окружающего реакторный корпус. Комбинация расплавленного свинца ( $T_{\text{плав}} = 327\text{ °C}$ ) с температурой кипения  $1740\text{ °C}$  в качестве теплоносителя первого контура, нитридного топлива с расчетной температурой разложения в атмосфере, превышающей  $1350\text{ °C}$ , и переноса тепла первичного теплоноси-



теля естественной циркуляцией обеспечивают пассивную безопасность. Активная зона и теплообменники остаются под давлением окружающей среды, однофазный свинцовый теплоноситель первого контура и однофазная естественная циркуляция отводят энергию активной зоны во всех эксплуатационных и проектных аварийных условиях при высоких температурах.

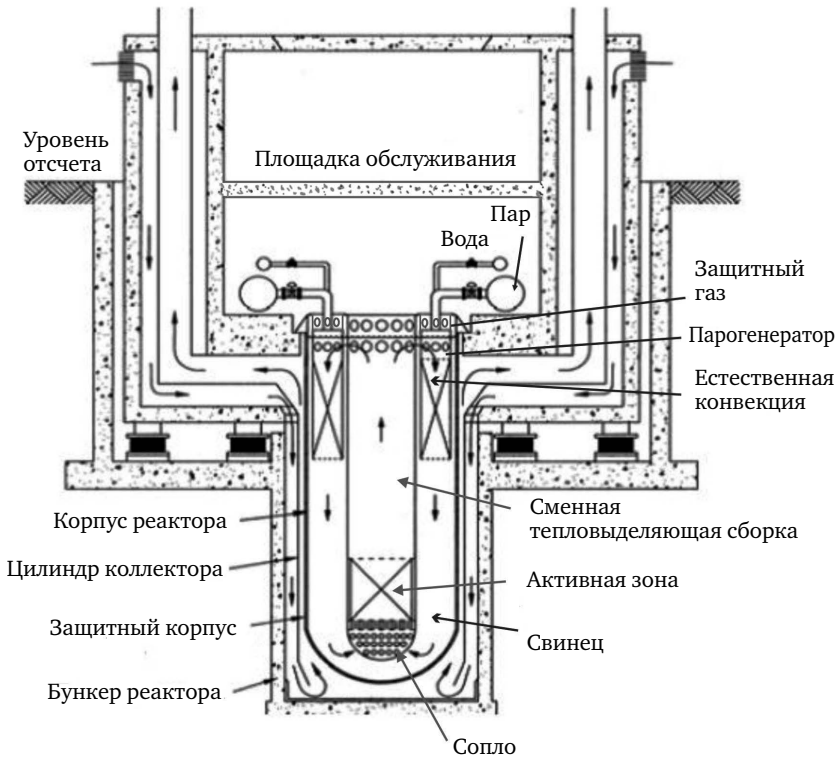


Рис. 5.15. Реактор SSTAR

ЛФР со свинцовым теплоносителем и нитридным топливом — это технологический путь к более высокотемпературным системам, позволяющим усовершенствованное преобразование энергии (циклы Брайтона) и в конечном счете — производство водорода посредством термохимического разложения воды. Текущей целью является достижение устойчивой пиковой температуры оболочки 650 °С.

Для улучшения экономических показателей SSTAR соединен с конвертером энергии по циклу Брайтона, где в качестве рабочей жидкости используется сверхкритический диоксид углерода ( $S\text{-CO}_2$ ). Эффективность установки в 44% рассчитана при температуре на входе в турбину 553 °С и температуре на выходе активной зоны 566 °С. Цикл  $S\text{-CO}_2$  обеспечивает более высокую эффективность, чем циклы Брайтона для гелия или иде-

ального газа или цикла Ренкина для насыщенного пара (при той же температуре). Турбина и компрессоры имеют малые размеры (длина турбины и ее диаметр без кожуха  $\sim 0,4$  м). Свинцовый теплоноситель не реагирует химически с рабочей жидкостью при температуре выше  $\sim 250$  °С, которая ниже температуры плавления свинца. Свинцовый теплоноситель не реагирует энергично с воздухом или водой. Внешний диаметр реакторного корпуса 3,23 м. Такой корпус достаточен для размещения активной зоны, радиального рефлектора толщиной 0,297 м, теплообменников и других компонентов и в то же время соответствует требованиям транспортабельности реактора и защитного корпуса по железной дороге, на барже и сухопутным транспортом.

Для обслуживания больших городов концепция SSTAR масштабируется до мощности 181 МВт электричества или 400 МВт тепловых (реактор STAR-LM). Его также предполагается использовать при производстве водорода (установка STAR-HE) с применением термохимического цикла разложения воды Са-Вг, когда будут разработаны конструкционные материалы для работы при температурах до 800 °С. В SSTAR и STAR-LM используются улучшенные ферритно-мартенситные конструкционные материалы, а также разработанный в России подход к контролю коррозии, включающий формирование и поддержание защитных окисных слоев через регулирование потенциала растворенного в теплоносителе кислорода. Это ускорит достижение готовности к развертыванию на рынке в более короткие сроки, чем разработка установки STAR-H2.

Более высокая выходная температура STAR-H2 предназначена для запуска термохимического цикла Са-Вг разложения воды с целью получения водорода. Неядерная часть (BoP) установки STAR-H2 состоит из трех каскадных циклов (разложение воды, цикл Брайтона S-CO<sub>2</sub>, опреснение воды), проводимых один за другим при последовательно более низких температурах, причем тепловая энергия, выделяющаяся в каждом цикле, используется для последующего цикла. Реактор поставляет в BoP 400 МВт тепловой энергии с высокой температурой (между 800 и 650 °С) через промежуточный контур с жидкосолевым теплоносителем. Стратегия, лежащая в основе проекта BoP, состоит в делении поступающей от реактора тепловой энергии на три части: наибольшая возможная часть используется для максимизации производства водорода; вторая — для производства электричества в цикле Брайтона необходимо не больше тепловой энергии, чем требуется для обеспечения электроэнергией BoP; оставшаяся часть тепловой энергии используется для опреснения воды. Экологический тепловой след минимизирован за счет преобразования в максимально возможной степени низкосортного тепла в питьевую воду, а хвосты рассола сбрасываются при температуре, лишь немного превышающей температуру окружающей морской воды. Цикл Са-Вг имеет три главных сегмента: сегмент эндотермического разло-

жения воды, где  $\text{CaBr}_2$  и пар реагируют при  $750^\circ\text{C}$ , образуя в результате  $\text{HBr}$  и  $\text{CaO}$ ; экзотермический сегмент «реброминации»  $\text{Ca}$ , где  $\text{CaO}$  и бром реагируют при  $600^\circ\text{C}$  и происходит регенерация  $\text{CaBr}_2$  для рециклирования с высвобождением теплоты и кислорода; сегмент плазменно-химического разложения  $\text{HBr}$ , где электрически направляемая энергия разлагает  $\text{HBr}$  при  $90^\circ\text{C}$ , чтобы восстановить бром для рецикла и высвободить водород. Вслед за плазматроном следует каскад, в котором водород очищается и сжимается до давления, соответствующего спецификации трубопровода. Морская вода, выходящая при  $100^\circ\text{C}$  из охладителя цикла Брайтона  $\text{S-CO}_2$ , передает тепловую энергию на завод опреснения воды. STAR-H2 развит на концептуальном уровне и рассчитан на достижение приблизительно 44%-го преобразования тепловой энергии в  $\text{H}_2$  (LHV); его производительность равна 160 т/сут водорода и по крайней мере  $8000\text{ м}^3/\text{сут}$  пригодной для питья воды.

Предполагается строительство демонстрационного испытательного реактора SSTAR. Для немедленного начала работ по прототипу проект SSTAR может быть масштабирован в сторону уменьшения пиковой температуры оболочки до  $550^\circ\text{C}$ , при которой могут быть использованы существующие материалы вместе с теплоносителем — эвтектикой свинец-висмут. Для этой максимальной температуры и существующих материалов управление коррозией, основанное на контроле потенциала растворенного кислорода, было подтверждено в лаборатории Los Alamos.

### 5.3. Концепция атомно-водородной энергетики

Разработанная в нашей стране в начале 70-х годов XX века концепция широкого использования производимого из воды с помощью ядерных реакторов водорода как энергоносителя в промышленности, в энергетике, на транспорте и в быту получила название «атомно-водородная энергетика» (АВЭ). Ядерная энергия обладает практически неограниченными ресурсами топлива. При производстве электричества, тепла и водорода ядерная энергетика оказывает наименьшее воздействие на окружающую среду в сравнении с использованием углеродных ресурсов.

Кроме того, по мере увеличения стоимости природных углеводородов, определяющей выбор технологии производства водорода, будет расти и доля альтернативных, в первую очередь, ядерных технологий в водородной энергетике.

При сжигании водорода в чистом кислороде единственными продуктами являются высокопотенциальное тепло и вода, а при горении водорода в воздухе образуется существенно меньшее количество загрязнителей воздуха, чем при сжигании минерального топлива.

Сегодня существует три основных способа производства водорода, не связанные напрямую с неизбежными значительными выбросами двуокиси углерода, и так оцененные за килограмм произведенного водорода в докладе US National Academy of Engineering:

- воздействие на природный газ с помощью пара, что позволяет связывать содержащийся в нем углерод для последующего хранения, себестоимость — 1,72 долл.;
- воздействие пара и кислорода на угольный порошок, что опять же позволяет связывать углерод — 1,45 долл.;
- электролиз воды — 3,93 долл..

Первые два способа, т.е. риформинг природного газа и угля, требуют для дальнейшего применения водорода потребления из атмосферы кислорода и, тем самым, делают атмосферное природопользование в энергетике неизбежным. Поэтому такие технологии являются экологически неприемлемыми.

Электролитический водород является наиболее доступным, но дорогим продуктом. Для разложения чистой воды при комнатных условиях требуется напряжение 1,24 В. Величина напряжения зависит от температуры и давления, от свойств электролита и других элементов электролизёра. В промышленных и опытно-промышленных установках реализован КПД электролизёра ~ 70–80%, в том числе для электролиза под давлением. Паровой электролиз — это разновидность обычного электролиза. Часть энергии, необходимой для расщепления воды, в этом случае вкладывается в виде высокотемпературного тепла в нагрев пара (до 900 °С), делая процесс более эффективным.

Важно также отметить, что молекулярный кислород имеет сугубо биогенное происхождение. В результате эволюционных динамических процессов в биосфере Земли были сформированы определенные условия (в том числе и поддержание определенного количества молекулярного кислорода в атмосфере) для саморегуляции, называемое гомеостазом, постоянство которых во времени требуется для нормального функционирования всех живых организмов, составляющих сегодняшнюю биосферу. Следовательно, необходимо и сбалансированное производство растениями атмосферного кислорода и его потребления природой, животными и человеком.

При увеличении добычи и сжигания органического топлива до 20 млрд т условного топлива в год, в том числе и водорода, промышленное потребление кислорода из атмосферы составит примерно 50 млрд т, что в совокупности с естественным потреблением превысит нижнюю границу его воспроизводства в природе. Во многих промышленно развитых странах эта граница давно уже пройдена.

В настоящее время крупнотоннажное производство водорода и водородосодержащих продуктов осуществляется в мире в основном путем паровой

конверсии природного газа-метана. В этом случае около половины исходного газа расходуется на проведение эндотермического процесса паровой конверсии. Кроме того, сжигание природного газа приводит к загрязнению окружающей среды продуктами его сгорания. С целью экономии газа и снижения нагрузки на окружающую среду была разработана технологическая схема паровой конверсии метана с подводом тепла от высокотемпературного гелиевого реактора. Ядерная технологическая часть комплекса при проведении паровой конверсии метана аккумулирует тепло, получаемое от высокотемпературного реактора, синтез-газ транспортируется к централизованному потребителю тепла, где в метанаторе проводится обратная реакция с выделением тепла. Это тепло передается распределенному потребителю в виде горячей воды и/или пара.

При использовании паровой конверсии метана в сочетании с ВТГР требуемая тепловая мощность ВТГР составляет в расчете на 5 млн т водорода около 6,5 ГВт. В перспективе, когда стоимость природного газа будет повышаться, доля водорода, производимого из воды, может быть доведена до 100 % за счет замыкания цикла восстановлением метана из промежуточного продукта — метанола, с использованием электроэнергии.

В тепловых реакторах ВТГР могут быть применены как замкнутые, так и открытые топливные циклы с использованием урана, плутония и тория. Для будущей крупномасштабной ядерной энергетики, когда потребуются расширенное воспроизводство ядерного горючего, уникальные возможности воспроизводства предоставляют быстрые гелиевые бридеры. Сочетание высокотемпературных реакторов с гелиевым теплоносителем как на тепловых (ВТГР), так и на быстрых (БГР) нейтронах удачно решает задачи ядерной энергетики будущего, как по ресурсу топлива, так и по расширению областей использования ядерной энергии. Общий КПД для варианта «термохимия + ВТГР» может достигать 45–48 %, в то время как КПД варианта с традиционными реакторами «электролиз + ЛВР» не превышает 25 %.

Преимущество термохимических процессов обусловлено наряду с указанным выше переходом с экстенсивных поверхностных систем разложения воды на электродах к интенсивным объемным процессам в химических реакторах. Одним из существенных ограничений крупномасштабного электролизного производства водорода является потребность в драгоценных металлах (платина, родий, палладий) для катализаторов, которая пропорциональна мощности и, следовательно, поверхности электродов. Например, для производства 5 млн т/год водорода необходимо создать электролизёры суммарной электрической мощностью более 30 ГВт, для их изготовления потребовалась бы вся производимая сегодня в мире платина.

По-видимому, в ближайшем будущем методы получения водорода с использованием природного газа будут основными.

В то же время изучение путей экологически чистого обеспечения развивающегося человеческого общества энергией показывает, что кардинальное решение этой глобальной проблемы необходимо связывать с разработкой и осуществлением концепции, предусматривающей крупномасштабное производство на базе атомной энергетики не только электроэнергии и тепла, но и водорода и последующее его использование для разнообразных нужд человека.

Атомно-водородная энергетика нацелена на расширение использования ядерной энергии в энергоемких отраслях химической, металлургической, строительной, топливной промышленности, а также на транспорте. К ним можно также отнести производство пресной воды и энергоснабжение распределенных потребителей. Такая энергетика сохранит нефть и газ для неэнергетических производств и обезопасит атмосферу от вредных выбросов продуктов сгорания. Важно, что развитие атомно-водородной концепции будет способствовать снижению риска распространения ядерных материалов, благодаря возможности поставок энергоресурсов в виде водорода и его производных вместо ядерных реакторов и ядерных материалов.

Тогда концепцию атомно-водородной энергетики (АВЭ) можно определить как *«вода на входе + чистая ядерная энергия => водород => кислород = чистая энергия + вода на выходе»*.

В далекой перспективе, возможно, к концу столетия, развитие водородной экономики может потребовать до половины мощностей ядерной энергетики, что, по одному из прогнозов, составляет более 2000 ГВт.

Темпы и структура развития ядерной энергетики должны отслеживать эти требования. Становление атомно-водородной энергетики потребует развития специальных инновационных технологий. Среди них — высокотемпературные реакторы, агрегаты для эффективного производства водорода из воды, водородный топливный элемент, хемотермические преобразователи. Учитывая топливные потребности ядерной энергетики таких масштабов, необходимым условием является внедрение реакторов-бридеров и замкнутого топливного цикла с расширенным воспроизводством ядерного горючего.

При освоении атомно-водородной энергетики должны быть решены проблемы водородной безопасности на всех звеньях обращения с водородом: при его производстве, хранении, транспортировке, использовании.

---

## 6. Термоядерная энергетика

---

### 6.1. Управляемый термоядерный синтез

---

Современные атомные станции, использующие процесс деления, лишь отчасти удовлетворяют мировые потребности в электроэнергии. Топливом для них служат естественные радиоактивные элементы уран и торий, распространенность и запасы которых в природе весьма ограничены; поэтому для многих стран возникает проблема их импорта.

Альтернативой атомным станциям, основанным на процессах деления, могут стать станции, основанные на процессах ядерного синтеза — термоядерные станции, «топливом» для которых может стать водород.

**Управляемый термоядерный синтез (УТС)** — синтез более тяжелых атомных ядер из более легких с целью получения энергии, который, в отличие от взрывного термоядерного синтеза (используемого в термоядерном оружии), носит управляемый характер [9]. Управляемый термоядерный синтез отличается от традиционной ядерной энергетике тем, что в последней используется реакция распада, в ходе которой из тяжелых ядер получаются более легкие ядра. При реакции УТС выделяется огромное количество энергии. Это обусловлено действующими внутри ядра чрезвычайно интенсивными ядерными силами, которые удерживают вместе входящие в состав ядра протоны и нейтроны. На расстояниях порядка одного ферми ( $10^{-13}$  см) эти силы многократно превосходят силы кулоновского отталкивания между протонами ядра. На больших расстояниях от ядра кулоновские силы преобладают. Поэтому, для осуществления реакции синтеза, легким ядрам нужно, преодолев кулоновский барьер, сблизиться на такое расстояние, на котором ядерные силы превосходят кулоновские. В обычных условиях кинетическая энергия ядер легких атомов слишком мала для того, чтобы они смогли преодолеть электростатическое отталкивание и вступить в ядерную реакцию. Заставить атомы сблизиться можно, сталкивая их на большой скорости или используя сверхвысокие давления и температуры.

Хотя ядерных реакций синтеза, приводящих к выделению энергии довольно много, для практических целей использования ядерной энергии, интерес представляют только реакции, приведенные в табл. 6.1. Все ядра, участвующие в этих реакциях за исключением трития стабильны. Тритий — это радиоактивный изотоп водорода с периодом полураспада 12,3 лет. В результате  $\beta$ -распада он превращается в  $\text{He}^3$ , испуская электрон. В отличие

от ядерных реакций деления, реакции синтеза не производят долгоживущих радиоактивных осколков тяжелых ядер, что дает принципиальную возможность создать «чистый» реактор, не обремененный проблемой длительного хранения радиоактивных отходов.

Главным компонентом термоядерного топлива, как следует из таблицы, является изотоп водорода дейтерий, который содержится в морской воде. Запасы его общедоступны и очень велики (мировой океан покрывает ~71 % площади поверхности Земли, а на долю дейтерия приходится около 0,016 % общего числа атомов водорода, входящих в состав воды). В литре обычной воды содержится примерно 0,03 г дейтерия, но при его участии в реакциях ядерного синтеза выделяется столько же энергии, сколько при сгорании 300 литров бензина. Существующих природных запасов дейтерия на Земле хватит, чтобы обеспечить человечество энергией около миллиарда лет.

Таблица 6.1

**Ядерные реакции, представляющие интерес  
для управляемого термоядерного синтеза**

| №  | Реакция                   | Энергетический выход, $q$ , (МэВ) |
|----|---------------------------|-----------------------------------|
| 1. | $D + T = He^4 + n$        | 17,6                              |
| 2. | $D + D = He^3 + n$        | 3,27                              |
| 3. | $D + D = T + p$           | 4,03                              |
| 4. | $D + He^3 = He^4 + p$     | 18,4                              |
| 5. | $p + B^{11} = 3He^4$      | 8,7                               |
| 6. | $Li^6 + n = He^4 + T$     | 4,8                               |
| 7. | $Li^7 + n = He^4 + T + n$ | -2,47                             |

Помимо доступности топлива, термоядерные источники энергии имеют следующие важные преимущества перед атомными станциями: 1) реактор УТС содержит гораздо меньше радиоактивных материалов, чем атомный реактор деления, и поэтому последствия случайного выброса радиоактивных продуктов менее опасны; 2) при термоядерных реакциях образуется меньше долгоживущих радиоактивных отходов; 3) УТС допускает прямое получение электроэнергии.

Все реакции, приведенные в табл. 6.1, кроме последней, происходят с выделением энергии в виде кинетической энергии продуктов реакций,  $q$ , которая указана в МэВ ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 11600 \text{ }^\circ\text{K}$ ). Две последние реакции играют особую роль в управляемом термоядерном синтезе — предполагается их использовать для производства трития, которого на Земле исчезающе мало.

Ядерные реакции синтеза 1–5 обладают относительно большой скоростью реакций, которую принято характеризовать сечением реакции,  $\sigma$ .



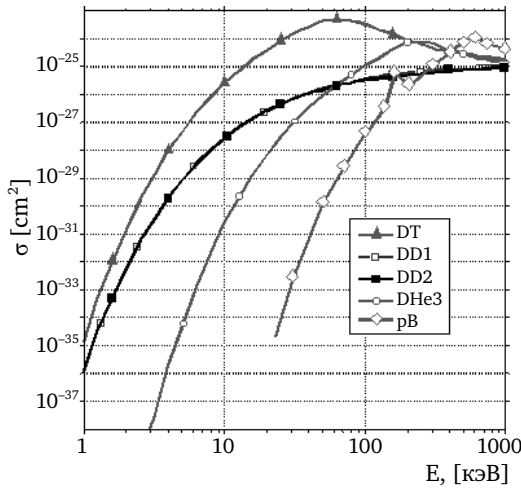


Рис. 6.1. Сечения некоторых термоядерных реакций из табл. 6.1

Сечения реакций из табл. 6.1 показаны на рис. 6.1 как функция энергии сталкивающихся частиц в системе центра масс [10].

Из-за наличия кулоновского отталкивания между ядрами сечения реакций при низкой энергии частиц ничтожно малы, и поэтому при обычной температуре смесь изотопов водорода и других легких атомов практически не реагирует. Для того, чтобы любая из этих реакций имела заметное сечение, сталкивающимся частицам нужно иметь большую кинетическую энергию. Тогда частицы смогут преодолеть кулоновский барьер, сблизиться на расстояние

порядка действия ядерных сил и прореагировать. Например, максимальное сечение для реакции дейтерия с тритием достигается при энергии частиц около 80 кэВ, и для обеспечения достаточно большой скорости реакций, соответствующая ей температура должна быть порядка ста миллионов градусов,  $T = 10^8$  °К.

Самый простой способ получения энергии ядерного синтеза — использовать ускоритель ионов и бомбардировать, например, ионами трития, ускоренными до энергии 100 кэВ, твердую или газовую мишень, содержащую ионы дейтерия. Однако инжектируемые ионы слишком быстро замедляются, сталкиваясь с холодными электронами мишени, и не успевают произвести энергию достаточную для того, чтобы покрыть энергетические расходы на их ускорение, несмотря на огромную разницу в исходной (порядка 100 кэВ) и произведенной в реакции энергии (порядка 10 МэВ). Другими словами, при таком способе производства энергии коэффициент воспроизводства энергии  $q = P_{\text{синтез}}/P_{\text{затрат}}$  будет меньше 1.

Для того чтобы увеличить  $q$ , можно подогреть электроны мишени. Тогда быстрые ионы будут терять энергию медленнее и  $q$  будет расти. Однако положительный выход достигается только при очень высокой температуре мишени — порядка нескольких кэВ. При такой температуре инжекция быстрых ионов уже не принципиальна, в смеси существует достаточное количество энергичных ионов, которые сами вступают в реакции. Другими словами, в смеси будут происходить термоядерные реакции.

Скорость термоядерных реакций можно рассчитать, проинтегрировав сечение реакции, показанное на рис. 6.1, по равновесной максвелловской

функции распределения частиц. В результате можно получить скорость реакций  $K(T)$ , которая определяет число реакций, происходящих в единице объема  $n_1 n_2 K(T)$ , и, следовательно, объемную плотность выделения энергии в реагирующей смеси

$$P_{fus} = q n_1 n_2 K(T), \quad (1)$$

где  $n_1 n_2$  — объемные концентрации реагирующих компонент,  $T$  — температура реагирующих частиц,  $q$  — энергетический выход реакции, приведенный в табл. 6.1.

При высокой температуре, характерной для реагирующей смеси, смесь находится в состоянии плазмы, т. е. состоит из свободных электронов и положительно заряженных ионов, взаимодействующих между собой за счет коллективных электромагнитных полей. Самосогласованные с движением частиц плазмы электромагнитные поля определяют динамику плазмы и, в частности, поддерживают ее квазинейтральность. С очень большой точностью, плотность зарядов ионов и электронов в плазме равны между собой,  $n_e = Z n_z$ , где  $Z$  — заряд иона (для изотопов водорода  $Z = 1$ ). Ионная и электронная компоненты обмениваются энергией за счет кулоновских столкновений и при параметрах плазмы, типичных для термоядерных приложений, их температуры примерно равны.

Для поддержания высокой температуры смеси необходимо скомпенсировать целый ряд энергетических потерь. Прежде всего, это потери на тормозное излучение, испускаемое электронами при столкновении с ионами [11]:

$$P_b(W/m^3) = 5,3 \cdot 10^{-37} \cdot n_e \cdot n_z Z^2 \sqrt{T(keV)}. \quad (2)$$

Мощность тормозного излучения, также как и мощность термоядерных реакций в смеси, пропорциональна квадрату плотности плазмы и, поэтому, отношение  $P_{fus}/P_b$  зависит только от температуры плазмы. Тормозное излучение, в отличие от мощности термоядерных реакций, слабо зависит от температуры плазмы, что приводит к наличию нижнего предела по температуре плазмы, при которой мощность термоядерных реакций равна мощности тормозных потерь,  $P_{fus}/P_b = 1$ . При температуре ниже пороговой мощность тормозных потерь превосходит термоядерное выделение энергии, и поэтому в холодной смеси положительный выход энергии невозможен. Кроме того, поскольку мощность тормозного излучения сильно зависит от заряда ионов, наименьшую предельную температуру имеет смесь дейтерия с тритием, хотя и в этом случае температура смеси должна превышать 3 кэВ ( $3,5 \cdot 10^7$  °К). Пороговые температуры для DD и DHe<sup>3</sup>-реакций примерно на порядок выше, чем для DT-реакции. Для реакции протона с бором тормозное излучение при любой температуре превышает выход

реакции, и поэтому для использования этой реакции нужны специальные ловушки, в которых температура электронов ниже, чем температура ионов, или же плотность плазмы настолько велика, что излучение поглощается рабочей смесью [12].

Кроме высокой температуры смеси, для положительного выхода реакций нужно, чтобы горячая смесь просуществовала достаточно долго и реакции успели произойти. В любой термоядерной системе с конечными размерами существуют дополнительные к тормозному излучению каналы потери энергии из плазмы (например, за счет теплопроводности, линейчатого излучения примесей и др.), мощность которых не должна превышать мощность термоядерной реакции. В общем случае, дополнительные потери энергии можно охарактеризовать энергетическим временем жизни плазмы  $\tau$ , определенным таким образом, что отношение  $3nT/\tau$  дает мощность потерь из единицы плазменного объема. Очевидно, что для положительного выхода необходимо, чтобы термоядерная мощность превышала мощность дополнительных потерь,  $P_{fus} > 3nT/\tau$ , что дает условие на минимальное произведение плотности на время жизни плазмы,  $n\tau$ . Например, для DT-реакции необходимо, чтобы

$$n\tau > 5 \cdot 10^{19} \text{ с/м}^3. \quad (3)$$

Это условие принято называть критерием Лоусона. В том виде, в каком он записан выше, критерий практически не зависит от термоядерной системы и является обобщенным необходимым условием положительного выхода.

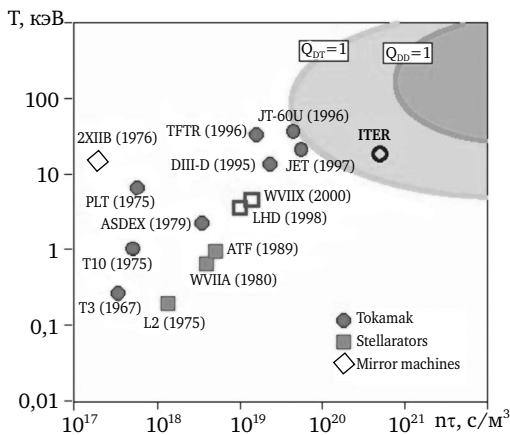


Рис. 6.2. Область с положительным выходом ядерной реакции на плоскости T- $n\tau$ . Показаны достижения различных экспериментальных установок по удержанию термоядерной плазмы

Критерий Лоусона для других реакций из табл. 6.1 на один-два порядка выше, чем для DT-реакции, выше и пороговая температура. Близость устройства к достижению положительного выхода принято изображать на плоскости T- $n\tau$ , которая показана на рис. 6.2.

Видно, что DT-реакции более легко осуществимы — они требуют существенно меньшей температуры плазмы, чем DD-реакции и накладывают менее жесткие условия на ее удержание. Современная термоядерная программа нацелена на осуществление управляемого DT-синтеза.

Таким образом, управляемый термоядерный синтез, в принципе, возможен и основная задача термоядерных исследований — это разработка практического устройства, которое могло бы конкурировать экономически с другими источниками энергии.

Все сконструированные до настоящего времени устройства можно разделить на два больших класса: 1) стационарные или квазистационарные системы, основанные на магнитном удержании горячей плазмы; 2) импульсные системы. В первом случае, плотность плазмы невелика и критерий Лоусона достигается за счет эффективного удержания энергии в системе, т. е. большого энергетического времени жизни плазмы. Поэтому, системы с магнитным удержанием имеют характерный размер плазмы порядка нескольких метров и относительно низкую плотность плазмы,  $n \sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$  (это примерно в  $10^5$  раз ниже, чем плотность атомов при нормальном давлении и комнатной температуре).

Идея устройства для удержания высокотемпературной плазмы с помощью сильного магнитного поля была высказана в 1950 г. академиками И. Е. Таммом и А. Д. Сахаровым. Первые экспериментальные исследования систем, названных токамаками (сокращение от «тороидальная камера с магнитными катушками»), начались в 1956 г.

Принцип устройства токамака (ТМ) ясен из рис. 6.3. Плазма создается в тороидальной вакуумной камере, которая служит замкнутым витком вторичной обмотки трансформатора. При пропускании нарастающего во времени тока в первичной обмотке трансформатора 1 внутри вакуумной камеры 5 создается вихревое продольное электрическое поле. При не очень большой начальной плотности топливной смеси происходит ее электрический пробой и вакуумная камера заполняется плазмой с последующим нарастанием большого продольного тока  $I_p$ . В современных крупных токамаках ток в плазме составляет несколько миллионов ампер. Этот ток создает собственное полоидальное (в плоскости поперечного сечения плазмы) магнитное поле  $B_q$ . Кроме того, для стабилизации плазмы и изоляции ее от стенок камеры используется сильное продольное магнитное поле  $B_z$ , создаваемое с помощью специальных обмоток тороидального магнитного поля. Именно комбинацией тороидального и полоидального магнитных полей обеспечивается устойчивое удержание высокотемпературной плазмы.

Возможность нагрева плазмы до очень высоких температур связана с тем, что в сильном магнитном поле траектории заряженных частиц выглядят как спирали, навитые на линии магнитного поля. Благодаря этому электроны и ионы длительное время удерживаются внутри плазмы. И только за счет столкновений и небольших флуктуаций электрического и магнитного полей энергия этих частиц может переноситься к стенкам в виде теплового потока. Эти же механизмы определяют величину диффузионных потоков. Эффективность магнитной термоизоляции плазмы характеризует-

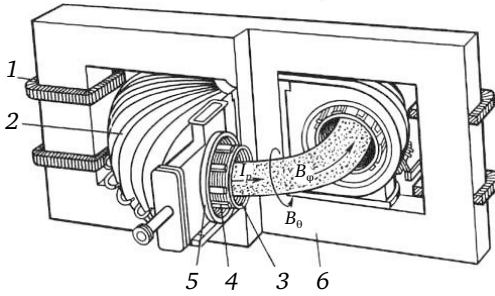


Рис. 6.3. Схема токамака:

- 1 — первичная обмотка трансформатора; 2 — катушки тороидального магнитного поля; 3 — лайнер, тонкостенная внутренняя камера для выравнивания тороидального электрического поля; 4 — катушки полоидального магнитного поля; 5 — вакуумная камера; 6 — железный сердечник (магнитопровод)

ся энергетическим временем жизни  $m_E = W/P$ , где  $W$  — полное энергосодержание плазмы, а  $P$  — мощность нагрева плазмы, необходимая для поддержания ее в стационарном состоянии.

Величину  $\tau$  можно рассматривать также как характерное время остывания плазмы, если мощность нагрева внезапно отключается. В спокойной плазме потоки частиц и тепла к стенкам камеры создаются за счет парных столкновений электронов и ионов. Эти потоки вычисляются теоретически с учетом реальных траекторий заряженных частиц в магнитном поле токамака.

Плазма любого токамака автоматически подогревается за счет джоулева тепла от протекающего по ней тока. Джоулева энергосодержания достаточно для получения температуры в несколько миллионов градусов. Для целей управляемого термоядерного синтеза нужны температуры  $> 10^8$  °К, поэтому все крупные токамаки дополняются мощными системами нагрева плазмы. Для этого используются либо электромагнитные волны различных диапазонов, либо прямая инжекция быстрых частиц в плазму. При нагреве ионов с помощью быстрых частиц обычно используются мощные пучки нейтральных атомов. Такие пучки не взаимодействуют с магнитным полем и проникают глубоко внутрь плазмы, там они ионизируются и захватываются магнитным полем токамака.

С помощью дополнительных методов нагрева температуру плазмы удастся поднять до  $> 3 \cdot 10^8$  °К, что вполне достаточно для протекания интенсивной термоядерной реакции. В разрабатываемых токамак-реакторах нагрев плазмы будет осуществляться альфа-частицами высоких энергий, возникающими при реакции слияния ядер дейтерия и трития.

**Стационарный токамак.** Обычно ток в плазме протекает только при наличии вихревого электрического поля, создаваемого за счет увеличения магнитного потока в индукторе. Индукционный механизм поддержания тока ограничен во времени, так что соответствующий режим удержания плазмы является импульсным. Однако импульсный режим не является единственно возможным, нагрев плазмы может использоваться и для поддержания тока, если наряду с энергией в плазму передается и импульс, разный для разных компонент плазмы. Неиндукционное поддержание тока облегчается за счет генерации тока самой плазмой при ее диффузионном

расширении к стенкам (бутстрэп-эффект). Бутстрэп-эффект был предсказан неоклассической теорией и подтвержден затем экспериментально. Эксперименты показывают, что плазма токамака может удерживаться стационарно, и главные усилия по практическому освоению стационарного режима направлены на повышение эффективности поддержания тока.

**Дивертор, управление примесями.** Для целей управляемого термоядерного синтеза требуется очень чистая плазма на основе изотопов водорода. Удержание плазмы магнитным полем не является абсолютным, и часть горячих заряженных частиц продолжает выходить на стенку камеры за счет диффузии поперек магнитного поля, а также при срыве в плазме. Кроме этого, магнитное поле никак не задерживает излучение и нейтральные частицы, которые также передают на стенку значительную часть энергии из плазмы. Поэтому между плазмой и первой стенкой токамака во время разряда идет достаточно сильный теплообмен. Потоки частиц и излучений на первую стенку токамака очень высоки уже при температуре электронов в плазме существенно ниже оптимальных 10 кэВ. Из-за этого, помимо разрядной камеры, необ-

ходим специальный приемник теплового потока из плазмы на стенку — диафрагма-лимитер (рис. 6.4, а), либо специальное устройство, называемое дивертором. Его основные функции: уменьшить взаимодействие плазмы со стенкой и помешать примесям проникнуть в центр плазменного шнура. В современных токамаках используется сложная диверторная конфигурация (рис. 6.4, б), создаваемая катушками полоидального магнитного поля. Эти катушки создают вертикальную компоненту магнитного поля, которая при взаимодействии с основным током плазмы не позволяет плазменному витку выбраться на стенку по направлению большого радиуса. При этом замкнутые магнитные поверхности сохраняются только внутри сепаратрисы, снаружи ее силовые

линии уходят внутрь диверторных камер, где происходит нейтрализация потоков плазмы, вытекающих из основного объема. В диверторных камерах удается смягчить нагрузку от плазмы на диверторные пластины за счет дополнительного охлаждения плазмы при атомарных взаимодействиях. Всего в мире было построено около 300 токамаков.

Следующим шагом в исследованиях по осуществлению УТС должен стать ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), Междуна-

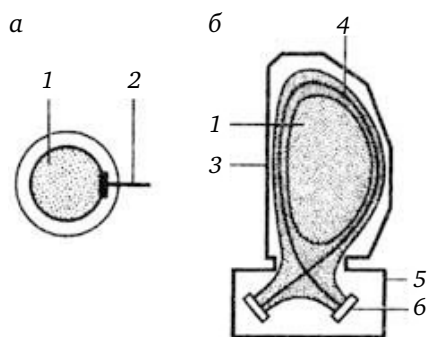


Рис. 6.4. Поперечный разрез плазмы круглого сечения (а) и вертикально вытянутого с образованием диверторной конфигурации (б):

1 — плазма; 2 — лимитер; 3 — стенка камеры; 4 — сепаратриса; 5 — диверторная камера; 6 — диверторные пластины

родный Термоядерный Экспериментальный Реактор. На этом реакторе планируется провести исследование поведения высокотемпературной плазмы (пылающая плазма с  $Q \sim 30$ ) и конструктивных материалов для промышленного реактора. Окончательной фазой исследований станет DEMO-прототип промышленного реактора, на котором будет достигнуто воспламенение и продемонстрирована практическая пригодность новых материалов. Самые оптимистичные прогнозы завершения фазы DEMO — 30 лет. Учитывая ориентировочное время на построение и введение в эксплуатацию промышленного реактора, нас отделяет  $\sim 40$  лет от промышленного использования термоядерной энергии.

Проект ITER начал разрабатываться с 1988 года. Детальные инженерные разработки привели к таким результатам: при проектной мощности в 1,5 ГВт стоимость первой станции 7,5 млрд долл. с перспективой удешевления на 40%. Атомная электростанция деления такой мощности (два реактора ВВЭР) стоит 2 млрд долл. Цена «термоядерной» энергии планируется в 7 центов за кВт·ч. Для сравнения цена электроэнергии в Калифорнии (США) — 12 центов, в Японии — 36 центов.

В проекте ITER принимают участие Россия, США, Китай, ЕС, Республика Корея, Индия и Япония. Поскольку реактор будет построен на территории Евросоюза, то он будет финансировать 40% стоимости проекта. Остальные страны-участницы финансируют по 10% проекта. Первоначально общая стоимость этой программы оценивалась в 13 млрд евро. Из них 4,7 млрд будет затрачено на капитальное строительство демонстрационной установки. Термоядерная мощность реактора ITER составит 500 МВт (при затрате энергии на входе системы всего около 50 МВт). В последующем стоимость увеличилась до 15 млрд евро, аналогичная сумма потребуется для проведения исследований.

На рис. 6.5 изображена принципиальная конструкция токамака ITER. Для оценки размеров внизу на чертеже (справа) помещен силуэт человека.

В рамках проекта ITER будут испытаны и отработаны наиболее важные технологии устройств и компонент термоядерного реактора, а также испытаны бланкеты для наработки трития.

Основные параметры и программа создания ITER приведены в табл. 6.2 и 6.3.

Таблица 6.2

**Основные параметры первого экспериментального термоядерного реактора-токамака ITER**

| Параметр                            | Значение                        |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| Большой/малый радиус тора ( $A/a$ ) | 8,14 м/2,8 м                    |
| Конфигурация плазмы                 | с одним тороидальным дивертором |
| Плазменный объем                    | 2000 м <sup>3</sup>             |

Окончание табл. 6.2

| Параметр                                | Значение                      |
|---|-------------------------------|
| Ток в плазме                            | 21 МА                         |
| Тороидальное магнитное поле             | 5,68 Тл (на радиусе R=8,14 м) |
| $\beta$                                 | 3%                            |
| Полная мощность термоядерных реакций    | 1,5 ГВт                       |
| Нейтронный поток на первой стенке       | 1 МВт/м <sup>2</sup>          |
| Длительность горения                    | 1000 с                        |
| Мощность дополнительного нагрева плазмы | 100 МВт                       |

Таблица 6.3

**Основные этапы создания реактора ITER**

| Исходная дата | Новая дата | Период   |
|---------------|------------|--|
| 2007–2019     | 2010–2022  | Период строительства реактора  |
| 2026          | 2029       | Первые реакции термоядерного синтеза   |
| 2019–2037     | 2022–2040  | Ожидаются эксперименты, по истечении которых проект будет закрыт               |
| После 2040    | 2043       | Реактор станет производить электроэнергию (при условии успешных экспериментов) |

В связи с экономической ситуацией возможна задержка еще на 3 года, что возможно приведет к необходимости доработки проекта. Это приведет к общей задержке примерно на 5 лет.

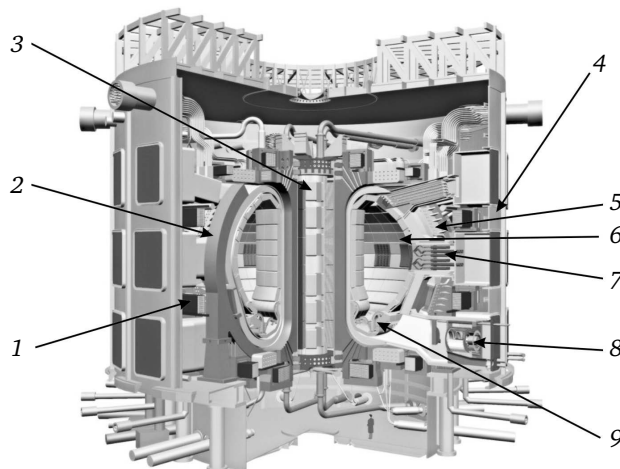


Рис. 6.5. Принципиальная конструкция токамак ITER:

1 — катушки полоидального магнитного поля из Nb-Ti сплава; 2 — катушки тороидального магнитного поля, Nb<sub>3</sub>Sn; 3 — центральный соленоид (6 модулей, Nb<sub>3</sub>Sn); 4 — криостат; 5 — вакуумная камера (9 секторов); 6 — бланкет (440 модулей); 7 — патрубки вакуумной камеры; 8 — крионасосы; 9 — дивертор (54 кассеты)



**Импульсные системы.** В импульсных системах с инерционным удержанием плазмы, выполнение критерия Лоусона достигается не за счет длительного удержания плазмы, а за счет увеличения ее плотности в результате сжатия смеси. Если при сжатии удастся достичь требуемой температуры 10–50 КэВ, а плотность смеси после ее сжатия будет достаточно велика, то она успеет прореагировать за время инерционного разлета смеси. Такие системы, которые фактически используют микровзрывы небольшого количества реагирующей смеси, называются системами с инерционным удержанием. Основная физическая задача в этом направлении управляемого термоядерного синтеза — получение высоких степеней сжатия в таком малом количестве топлива, которое позволит использовать выделившуюся термоядерную энергию без разрушения камеры.

В импульсных системах критерий Лоусона может быть достигнут за счет сжатия термоядерных мишеней лазерным или рентгеновским излучением и создания смеси с очень высокой плотностью. Время жизни в импульсных системах мало и определяется временем свободного разлета мишени. Основная физическая задача в этом направлении УТС заключается в снижении полной энергии взрыва до уровня, который позволит создать практический термоядерный реактор.

Оба типа систем уже вплотную подошли к созданию экспериментальных машин с положительным выходом энергии  $Q_{\text{fus}} > 1$ , в которых будут проверены основные элементы будущих термоядерных реакторов.

Исторически, одними из первых таких систем были быстрые Z-пинчи, в которых требуемое сжатие смеси предполагалось получить, пропуская большой электрический ток через разреженный газ, состоящий из смеси дейтерия с тритием. Предполагалось, что давление магнитного поля, создаваемого током, будет сжимать смесь внутри токового канала до плотностей, приводящих к выполнению критерия Лоусона. Подобные эксперименты, в которых ток в смеси создавался разрядом конденсаторной батареи, интенсивно проводились в различных странах в начале 50-х годов [14]. И хотя Z-пинчи не смогли достичь ожидаемых параметров смеси, они существенно продвинули наше понимание физических процессов, происходящих в горячей термоядерной плазме. Оказалось, что сжатие плазменного шнура в Z-пинчах ограничено развитием плазменных неустойчивостей, которые при имеющихся в то время мощностях не позволяли получить положительный термоядерный выход. В то время неудачи Z-пинчей заметно охладили интерес к подобным системам, хотя в настоящее время интерес к таким системам растет.

Импульсные системы для осуществления управляемого термоядерного синтеза получили свое второе рождение после изобретения в 1960 г. лазеров, способных в коротких импульсах генерировать огромные мощности. Теоретические расчеты показывают, что с их помощью термоядерный

синтез можно осуществить и без применения магнитных ловушек. Для этого осуществляется быстрое сжатие специально приготовленной мишени (шарика из дейтерия радиусом около 1 мм) до столь высоких плотностей, что термоядерная реакция успевает завершиться прежде, чем произойдет испарение топливной мишени. Сжатие и нагрев до термоядерных температур можно производить сверхмощными лазерными импульсами, со всех сторон равномерно и одновременно облучающими топливный шарик (рис. 6.6 и 6.7). При мгновенном испарении его поверхностных слоев вылетающие частицы приобретают очень высокие скорости, и шарик оказывается под действием больших сжимающих сил. Они аналогичны движущим ракету реактивным силам, с той лишь разницей, что здесь эти силы направлены внутрь, к центру мишени.

В лазерном реакторе УТС маленький шарик, содержащий дейтерий и тритий, облучается со всех сторон несколькими лазерными пучками одновременно. За счет бурного испарения частиц с его поверхности шарик сжимается, в результате чего температура и плотность внутри него повышаются до уровня, необходимого для термоядерной реакции.

Этим методом можно создать давления порядка  $10^{11}$  МПа и плотности, в 10000 раз превышающие плотность воды. При такой плотности почти вся термоядерная энергия высвободится в виде небольшого взрыва за время  $\sim 10^{-12}$  с. Происходящие микровзрывы, каждый из которых эквивалентен 1–2 кг тротила, не вызовут повреждения реактора, а осуществление последовательности таких микровзрывов через короткие промежутки времени позволило бы реализовать практически непрерывное получение полезной энергии. Для инерциального удержания очень важно устройство топливной мишени. Мишень в виде концентрических сфер из тяжелого и легкого

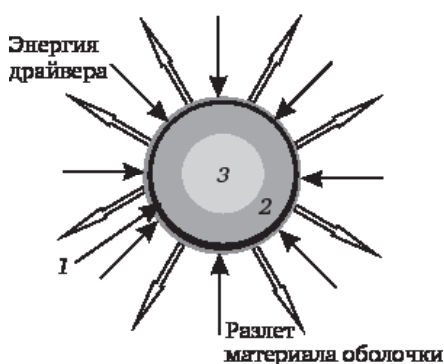


Рис. 6.6. Мишень для инерционного синтеза состоит из полый оболочки (1), слоя твердой замороженной ДТ-смеси (2) и ДТ-газа низкой плотности в центре мишени (3)

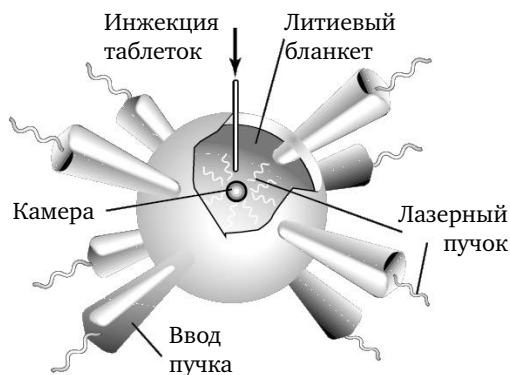


Рис. 6.7. Схема реализации управляемого лазерного термоядерного синтеза

материалов позволит добиться максимально эффективного испарения частиц и, следовательно, наибольшего сжатия.

Расчеты показывают, что при энергии лазерного излучения порядка мегаджоуля ( $10^6$  Дж) и КПД лазера не менее 10% производимая термоядерная энергия должна превышать энергию, израсходованную на накачку лазера. Термоядерные лазерные установки имеются в исследовательских лабораториях России, США, Западной Европы и Японии. В настоящее время изучается возможность использования вместо лазерного луча пучка тяжелых ионов или сочетания такого пучка со световым лучом.

Благодаря современной технике такой способ инициирования реакции имеет преимущество перед лазерным, поскольку позволяет получить больше полезной энергии. Недостаток заключается в трудности фокусировки пучка на мишени.

**Топливный цикл термоядерного реактора.** В большой степени он не зависит от конкретного устройства системы.

Теплотворная способность термоядерного топлива во много раз выше, чем не только у обычного, но и у ядерного топлива АЭС. Действительно, при синтезе 1 г DT-смеси выделяется примерно в 20 млн раз больше энергии, чем при сгорании 1 г угля, и в 8 раз больше, чем при полном делении 1 г урана.

В термоядерном реакторе предполагается производить реакции 6, 7 из табл. 6.1. Первый из двух компонентов участвующих в DT-реакции, дейтерий — это стабильный, широко распространенный, как указывалось выше, изотоп водорода. В отличие от дейтерия, трития на Земле практически нет. Поэтому, тритий должен нарабатываться в самом реакторе из изотопов лития,  $Li^6$  и  $Li^7$ . Для этого предусмотрена специальная оболочка, изготавливаемая из материала, содержащего литий, окружающая рабочую камеру и называемая бланкетом термоядерного реактора.

Сгорающий при синтезе тритий пополняется в литиевом бланкете, так что реактор работает, по существу на дейтерии и литии. Запасы этих элементов на нашей планете настолько велики, что при прогнозируемых темпах потребления их должно хватить на многие сотни лет.

По составу бланкета термоядерные реакторы делятся на чистые и гибридные. В бланкете чистого реактора воспроизводится лишь тритий. В гибридном же реакторе бланкет наряду с литием содержит исходные материалы для получения делящихся нуклидов —  $U^{238}$  или  $Th^{232}$ . Образующиеся при их облучении нейтронами  $Pu^{239}$  или  $U^{233}$  служат топливом для реакторов деления.

В обоих случаях энергия термоядерных реакций, происходящих в плазме, выносится в основном энергичными нейтронами (14,1 МэВ) и ионами гелия —  $\alpha$ -частицами (3,5 МэВ). Нейтроны покидают плазму и, пройдя через первую стенку реактора, поглощаются в бланкете, передавая ему свою энергию. Выделяемое в бланкете тепло снимается теплоносителем первого контура охлаждения и используется для получения электроэнергии, как

на АЭС. Обладающие электрическим зарядом  $\alpha$ -частицы интенсивно передают свою энергию плазме, разогревая ее.

В чистом термоядерном реакторе единственная полезная «продукция» — это электроэнергия, а в гибридном реакторе к ней добавляются делящиеся нуклиды.

Принципиальная схема термоядерного реактора, работающего на смеси дейтерия с тритием показана на рис. 6.8.

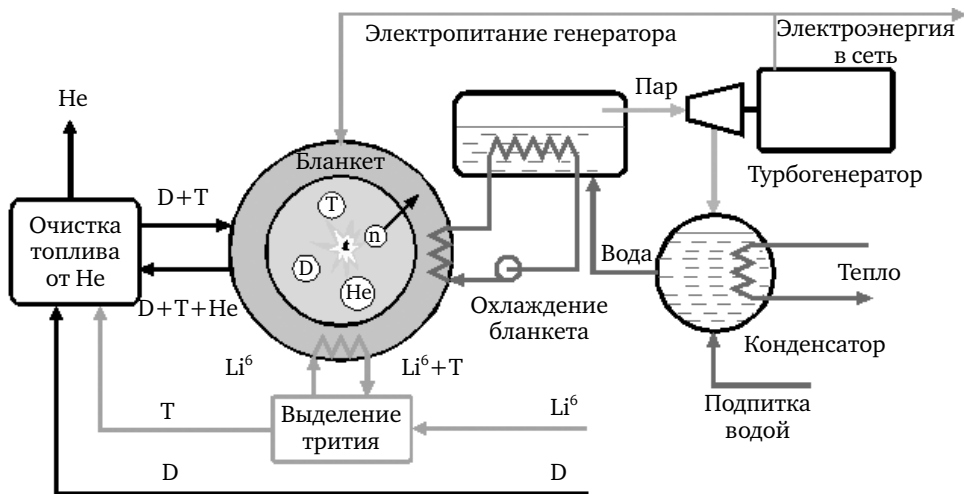
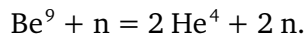


Рис. 6.8. Схема основных технологических контуров термоядерного реактора, работающего на смеси дейтерия (D) и трития (T)

Реактор требует снабжения дейтерием и литием. Оба изотопа лития широко распространены в природе в процентном отношении  $\text{Li}^6 : \text{Li}^7 = 7,5\% : 92,5\%$  и, как видно из табл. 6.1, оба способны производить тритий. В случае использования  $\text{Li}^6$ , в blankets будет выделяться дополнительная энергия в количестве 4,8 МэВ на каждый произведенный атом трития. На практике в blankets предполагается располагать смесь изотопов лития и бериллий, который будет использоваться для размножения нейтронов в реакции



Содержание материалов в blankets будет подобрано таким образом, чтобы оптимизировать выход трития.

Возможны разные схемы использования лития в blankets. Один из вариантов использует окислы лития. Тритий удаляется из blankets при его нагреве потоком горячего гелия, а потом извлекается из гелия в цехе по очистке топлива. Инженерные проработки blankets показывают, что можно полу-

чить коэффициент воспроизводства трития на уровне 1.1, что представляется достаточным для снабжения реактора [12]. Прорабатывались и другие схемы, которые используют жидкометаллический литий. В этом случае литий, помимо наработки трития, может выполнять роль теплоносителя первого контура. На схеме, представленной на рис. 6.8, литиевый цикл показан условно, в виде отдельного литиевого контура. Объединяя DT-реакцию с реакцией 6 из табл. 6.1 можно записать:



Таким образом, термоядерный реактор будет сжигать дейтерий и литий, а в результате реакций будет образовываться инертный газ гелий.

Термоядерный реактор будет потреблять очень небольшое количество лития и дейтерия. Например, реактор с электрической мощностью 1 ГВт будет сжигать около 100 кг дейтерия и 300 кг лития в год. Если предположить, что все термоядерные электростанции будут производить  $5 \cdot 10^{20}$  Дж в год, т. е. половину будущих потребностей электроэнергии, то общее годовое потребление дейтерия и лития составят всего 1500 и 4500 т. При таком потреблении, содержащегося в воде дейтерия (0,015%) хватит на то, чтобы снабжать человечество энергией в течение многих миллионов лет. Если бы удалось освоить DD-реакцию, то термоядерная энергетика имела бы фактически неограниченные энергетические ресурсы. Для DT-цикла энергетические ресурсы ограничены имеющимися запасами лития. По оценкам [9], разведанные рудные запасы лития составляют  $8-10 \cdot 10^6$  т. Только этих запасов хватит на многие сотни лет. Кроме того, литий, хотя и в меньшем количестве, чем дейтерий, содержится в морской воде со средней концентрацией  $1,7 \cdot 10^{-7}$  и общим количеством, превышающим примерно в  $10^3$  раз разведанные рудные запасы. Оценки показывают, что затраты на производство топлива для термоядерной энергетике дают малый вклад в стоимость производимой энергии.

В наиболее оптимальной смеси, содержащей равные количества дейтерия и трития, термоядерная реакция «зажигается» при температуре свыше 50 миллионов градусов. Нагрев плазмы до такой температуры представляет собой хотя и трудную, но вполне разрешимую задачу: ведь плотность плазмы в реакторе примерно в 100 тыс. раз меньше плотности газа при атмосферном давлении. Следующим шагом будет переход к другим перспективным топливам таким, как DD, DHe<sup>3</sup> или pB. Каждое из этих перспективных топлив имеет свои преимущества по отношению к DT-реакции.

Основные преимущества DD-реакции заключаются в наличии огромных природных ресурсов дейтерия на Земле и отсутствии необходимости воспроизводства трития. Хотя в DD-реакции меньшая доля энергии выносится в виде нейтронов, тем не менее, в DD-реакторе, так же как и в DT-реакторе, будет происходить активация первой стенки.

Еще меньше нейтронов производит  $DHe^3$  смесь, в которой нейтроны рождаются в результате DD-реакций. Оптимизация состава смеси и ее температуры позволяет уменьшить нейтронный поток на порядок величины по сравнению с DT-реакцией, что существенно снижает требования к стойкости материалов первой стенки.  $DHe^3$ -реакция имеет относительно высокое сечение, но в то же время требует больших температур смеси. Недостатком этой реакции является практическое отсутствие  $He^3$  на Земле, что делает освоение этой реакции в земных условиях практически безнадежным делом. В то же время, этого изотопа много на поверхности Луны, и некоторые проекты, пользуясь тем, что потребление не велико, предлагают добывать это топливо на Луне и доставлять его на Землю. Этот цикл можно замкнуть энергетически даже с учетом энергии затрачиваемой на доставку топлива, хотя сомнительно, что эта схема будет осуществлена в ближайшем обозримом будущем.

Активация материалов реактора принципиально отсутствует в безнейтронной реакции 5 из табл. 6.1, происходящей в смеси водорода с бором. Все продукты этой реакции являются заряженными частицами, которые имеют очень малый пробег в твердом теле и могут удерживаться магнитными и электрическими полями. Последнее открывает принципиальную возможность создания слабоактивируемых реакторов и устранения низкоэффективного теплового цикла из производства электроэнергии. В случае pB-реакций электроэнергия, в принципе, может получаться с помощью прямого преобразования энергии заряженных частиц в электрическую энергию с КПД гораздо большим, чем в тепловом цикле. К сожалению, эти реакции имеют еще меньшие сечения, чем DD или  $DHe^3$  реакции и требуют специальных условий для получения положительного выхода [13]. Поэтому, освоение полностью безнейтронных топлив дело далекого будущего.

Таким образом, будущие термоядерные реакторы имеют достаточные запасы топлива для обеспечения потребностей человечества в энергии в течение многих сотен лет, а в случае некоторых реакций и многих десятков тысяч лет. Термоядерная энергетика будет потреблять очень небольшое количество исходных материалов и не потребует развития широкомасштабного производства топлив. Сам топливный цикл будет использовать лишь малую часть производимой энергии и соответственно топливная составляющая в цене электроэнергии будет незначительной. Как исходные составляющие рабочей смеси, так и конечные продукты реакций не являются радиоактивными веществами и не требуют длительного хранения. Эти обстоятельства выгодно отличают термоядерную энергетика, как от обычных ядерных реакторов деления, так и электростанций, сжигающих органические топлива.

Основная проблема осуществления управляемого термоядерного синтеза заключается в создании практичного устройства, способного обеспечить выполнения условия Лоусона при достаточно высокой температуре смеси.

## 6.2. Холодный ядерный синтез

Как указывалось в разделе, посвященном анализу УТС, реакции ядерного синтеза между различными изотопами водорода, идущие с выделением энергии, показаны в табл. 6.1. Для того чтобы ядерный синтез мог произойти, реагирующие ядра должны сблизиться на расстояние порядка радиуса действия ядерных сил, а это в свою очередь требует преодоления кулоновского барьера между заряженными частицами. Поэтому вышеуказанные реакции в обычных условиях идут только при сообщении ядрам достаточной кинетической энергии: либо в ускорителе, либо с помощью высокого нагрева в атомном взрыве или в мощном газовом разряде (например, реакция 3). Однако неправильно думать, что ядерные реакции 1–7 происходят лишь тогда, когда кинетическая энергия ядер превышает высоту кулоновского барьера. В действительности указанные реакции начинают идти с заметной вероятностью при значительно меньших энергиях за счет квантовомеханического туннельного проникновения через кулоновский барьер. Действительно, высота кулоновского барьера составляет для реакций 1–7 сотни кэВ, а между тем, например, реакция 4 наблюдается на ускорителях уже начиная с энергий порядка 1–10 кэВ и выше. Точно так же термоядерные реакции, происходящие, например, при температуре  $T = 10^8$  К (что соответствует средней энергии частиц  $\sim 10$  кэВ), идут в основном за счет подбарьерных переходов, поскольку при этих температурах число частиц, обладающих кинетической энергией, превышающей кулоновский барьер, незначительно.

Попытки использовать эти эффекты для осуществления более дешевого, чем УТС, способа производства энергии предпринимаются давно, однако предположение о возможности холодного ядерного синтеза (ХЯС) до сих пор не нашло надежного подтверждения и являются предметом постоянных спекуляций, однако эта область науки активно изучается.

Под холодным ядерным синтезом [16, 17] обычно понимают реакцию слияния ядер изотопов водорода при температуре  $T_f \leq 10^3$  К (*cf* — cold fusion), существенно меньшей, чем в термоядерных реакциях. Согласно наиболее распространенному в научной и околонаучной литературе определению, низкоэнергетические ядерные реакции (общепринятая аббревиатура LENR, т. е. low energy nuclear reactions) — это такие ядерные реакции, при которых трансмутация химических элементов протекает при сверхнизких энергиях и не сопровождается появлением жесткого ионизирующего излучения.

Холодный ядерный синтез окружен многолетними спорами ученых и изобретателей всего мира. С одной стороны, возможность таких реакций доказана теоретически и подтверждена экспериментально. С другой стороны,

официальное признание открытия требовало практических многократных подтверждений, которые удавались редко. Официальное признание откладывалось.

В результате, многие сообщения об осуществлении реакций холодного синтеза или LENR, а вместе с ними классические научные работы, оказались причислены к разряду лженауки. Например, под определение LENR подпадает электронный захват, открытый Л. У. Альварецом в 1937 году [16]. Обратная реакция, так называемый  $\beta$ -распад в связанное состояние, также, несомненно, относится к LENR-процессам. Первое упоминание о нем датировано 1947 годом. Теория  $\beta$ -распада в связанное состояние была создана в 1961 г.

В 1957 г. в ядерном центре в Беркли было открыто явление мюонного катализа ядерных реакций синтеза в холодном водороде. Группу экспериментаторов возглавлял все тот же Л. У. Альварец. Другими словами, согласно данным [16], как «низкоэнергетическая трансмутация химических элементов», так и «холодный ядерный синтез» были открыты одним и тем же ученым. За эти открытия он и был удостоен Нобелевской премии по физике в 1968 г.

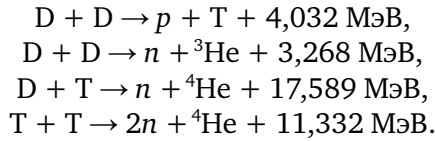
Мюонный катализ (англ. muon catalyzed fusion, MCFusion, MCF), состоит в следующем [16, 17]: отрицательно заряженный мюон (нестабильная частица с временем жизни  $\tau_\mu = 2,2 \cdot 10^{-6}$  с и массой  $m_\mu = 206,769 m_e$ ), попадая в смесь изотопов водорода, образует там мезоатомы  $p\mu$ ,  $d\mu$  и  $t\mu$ , которые, сталкиваясь затем с молекулами  $H_2$ ,  $D_2$  и  $T_2$  (а также HD, HT и DT), образуют мезомолекулы  $pp\mu$ ,  $pd\mu$ ,  $pt\mu$ ,  $dd\mu$ ,  $dt\mu$  и  $tt\mu$  (или, точнее, мезомолекулярные ионы  $(pp\mu)^+$ ,  $(pd\mu)^+$  и т. д.).

Согласно постулату Бора на электронной орбите в атоме водорода должно помещаться целое число электронных полувольт  $2\pi R = n\lambda/2$ . Для нижней орбиты ( $n = 1$ ) отсюда следует, что скорость орбитального движения электрона равна:  $v = \hbar/mR$  ( $\hbar = h/(2\pi)$ ). Подставляя это выражение в первое соотношение, получаем для радиуса Бора  $R$  известный результат:  $R = \hbar^2/m \cdot e^2$ . При значении постоянной Планка  $\hbar = 10^{-27}$  эрг·с и массе электрона  $m = 9,1 \cdot 10^{-28}$  г получаем  $R = 5,3 \cdot 10^{-9}$  см. Таков размер обычного атома водорода.

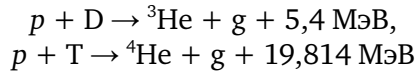
Поскольку мюон примерно в 200 раз тяжелее электрона, то размеры мезомолекул во столько же раз меньше размеров молекулярных ионов  $H_2^+$ ,  $HD^+$  и т. д., в которых ядра удалены друг от друга в среднем на расстояние в две атомные единицы  $\sim 2r_0 = 2\hbar^2/m_e \cdot e^2 \sim 10^{-8}$  см. В мезомолекулах ядра удалены на расстояние примерно в две мезоатомные единицы  $\sim 2r_\mu = 2\hbar^2/m_\mu \cdot e^2 \sim \sim 5 \cdot 10^{-11}$  см. На такое расстояние сближаются ядра изотопов водорода при кинетической энергии  $\sim 3$  кэВ, что соответствует температуре  $\sim 30$  миллионов градусов, которая сравнима с температурой, достигнутой в современных термоядерных установках.



После образования мезомолекул  $dd\mu$ ,  $dt\mu$  и  $tt\mu$  чрезвычайно быстро, за время  $\tau = 10^{-9}$ – $10^{-12}$  с, происходит слияние их ядер за счет сильного взаимодействия в реакциях



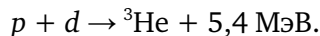
В мезомолекулах  $pd\mu$  и  $pt\mu$  сравнительно малая скорость ( $\sim 10^6 \text{ с}^{-1}$ ) реакций



определяется электромагнитным взаимодействием.

Поскольку эти реакции в мезомолекулах идут в присутствии мюона  $\mu^-$ , то для каждой из них возможны два исхода, а именно, мюон может или освободиться, или же образовать мезоатом гелия. Свободный мюон может инициировать следующую реакцию синтеза, а мюон, захваченный ядром гелия (а частицей) — нет. Таким образом, число реакций синтеза  $X_c$ , инициируемое одним мюоном, ограничено величиной коэффициента прилипания мюона к гелию ( $\sim 0,5$ – $1\%$ ).

Впервые на способность мезонов вызывать ядерные реакции указал английский ученый Ф. Франк в 1947 г. Любопытно, как возникла эта идея. Мюон и  $\pi$ -мезон, наблюдавшиеся в космических лучах, принимали сначала за одну частицу. В 1947 г. в фотоэмульсиях были обнаружены необычные треки: из точки остановки первоначального мезона выходил другой трек, интерпретированный как рождение новой частицы в результате распада старой. Но это мы сейчас знаем о распаде мезона на мюон и нейтрино. А тогда необходимо было проанализировать и другие возможности. Кинетическая энергия мюона в таком распаде составляет, как теперь известно, 4,1 МэВ. Тогда по трекам эта энергия оценивалась в 5,5 МэВ. А это очень близко к энерговыделению реакции синтеза протия и дейтерия:

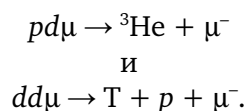


Франку введение новой частицы для интерпретации необычных треков в фотоэмульсиях показалось слишком фундаментальным предположением, поэтому он искал другие интерпретации этим опытам. Один из вариантов, которые он рассмотрел, заключался в следующем. В точке остановки образуется мезоатом. В силу своей нейтральности он может близко подой-

ти к ядру дейтерия и образовать мезомолекулу, в которой произойдет указанная реакция синтеза. Освободившийся мюон унесет при этом почти всю выделившуюся энергию, что и объясняет появление нового трека. Однако сам Франк считал, что из-за ничтожного содержания дейтерия в веществе фотоэмульсии такой процесс маловероятен, и пришел все-таки к выводу что его надо интерпретировать как распад  $\pi$ -мезона. Но замечание Франка относительно малой вероятности  $pd$ -синтеза при малой концентрации дейтерия оказалось неверным. Впоследствии подобный процесс был обнаружен экспериментально в природной смеси изотопов водорода, где содержание дейтерия всего 1/600.

В 1948 г. А. Д. Сахаров, узнав о работе Франка, предложил пути практического применения использования мюонов. Рассматривая вопрос о ядерных реакциях, вызываемых мюонами в жидком дейтерии или смеси дейтерия и трития, он обнаружил, что если образуются мезомолекулы  $dd\mu$  и  $dt\mu$ , то почти мгновенно легкие ядра вступят в реакцию синтеза. При этом мюон освободится, вновь образует мезоатом и мезомолекулу, вызывая новую реакцию синтеза и т. д. Иными словами, мюон может стать катализатором ядерных реакций синтеза. Тогда эта работа была помещена в отчете Физического института АН СССР, но о ней практически никто не знал.

В 1954 г. Я. Б. Зельдович выполнил первые расчеты этого процесса, включая механизм образования мюонных молекул, согласно которому  $\mu$ -атом водорода при столкновении с ядром атомарного водорода связывается в мюонную молекулу путем передачи энергии связи мезомолекулы атомному электрону (именно таков механизм образования мезомолекул  $pp\mu$ ,  $pd\mu$ ,  $tt\mu$ ). Одновременно он указал на то, что наличие в мезомолекулах возбужденных уровней с малой энергией связи может приводить к существенному увеличению вероятности их образования. В 1957 Л. У. Альварец с сотрудниками впервые экспериментально обнаружил реакции мезонного (мюонного) катализа



К началу 80-х гг. мезонный катализ ядерных реакций синтеза в водороде и дейтерии был хорошо изучен как экспериментально, так и теоретически.

В более поздних экспериментах, показано, что число реакций, вызываемых мюоном, может быть велико, более 100. При этом на один мюон выделяется сотня с лишним нейтронов и 2–3 ГэВ энергии. Но при этом, на производство мюона надо затратить в ускорителе никак не меньше 6–12 ГэВ. Это значит, что сам по себе мюонный катализ энергетически невыгоден. К тому же мы затрачиваем «хорошую» электрическую энергию, а получаем тепловую, которую еще надо преобразовывать. Там тоже неминуе-

мы потери, потому что КПД обычных электростанций находится на уровне 40%. В итоге мюонный катализ коммерчески невыгоден даже при 500 синтетах или больше. По этой причине принято считать, что мюонный катализ может эффективно использоваться не для производства энергии непосредственно, а как источник быстрых нейтронов.

Мезокаталитические реакторы имеют ряд преимуществ перед термоядерными. Доля «дорогой» энергии синтеза, производимой на них, может составлять 1% от полной произведенной энергии, а на термоядерных реакторах доля «дорогой» энергии составляет несколько процентов. Кроме того, в мезокаталитических реакторах отсутствуют некоторые технические трудности, имеющиеся в термоядерных установках. Поэтому можно надеяться, что мезокаталитический реактор окажется конкурентоспособным. Так ли это — покажет будущее. У термоядерного реактора, в свою очередь, есть одно важное преимущество: у него выше коэффициент усиления. Ведь, по существу, любой гибридный реактор является усилителем мощности. Вкладывая некоторую мощность в плазму либо в мезокаталитический реактор, потом эту мощность усиливаем за счет деления урана в blankets и за счет того, что образовавшийся плутоний питает реакторы-сателлиты. Оценки показывают, что мюонный катализ может стать экономически выгодным, если при рабочих условиях (температурах порядка 200–300 °C и давлении порядка 1000 атм) удастся добиться тех самых 150 циклов на один мюон, которые уже получены при гораздо более низких температурах и искусственно созданных благоприятных условиях.

Новый этап исследований в области низкотемпературного ядерного синтеза начался в 1989 году, когда физико-химики Мартин Флейшман и Стэнли Понс объявили о том, что им удалось заставить дейтерий превратиться в гелий при комнатной температуре в приборе для электролиза тяжелой воды [18]. Флейшман и Понс использовали электроды, сделанные из палладия. Палладий, как указывалось ранее, отличается уникальной способностью поглощать большое количество водорода или дейтерия. Число атомов дейтерия, поглощаемых в палладиевой пластине, может сравниться с числом атомов самого палладия.

Установка для электролиза Флейшмана — Понса представляла собой небольшой стеклянный цилиндрический стакан, заполненный тяжелой (дейтериевой) водой, погруженный в сосуд Дьюара. В воду коаксиально погружался палладиевый катод прямоугольной формы из пористого палладия, способного абсорбировать молекулы дейтерия  $D_2$ . Проволочный анод из платины размещался по периметру сосуда. В крышке сосуда располагались отверстия для поддержания уровня электролита и вывода продуктов электролиза, а также нагревателя воды и замера ее температуры. В результате экспериментов Понс и Флейшман обнаружили выход тепла, на 50% превышающий затраты электроэнергии.

При прохождении электрического тока через тяжелую воду образовывались положительно заряженные ионы дейтерия, которые под действием сил электростатического притяжения устремлялись к отрицательно заряженному электроду из палладия, насыщенному дейтерием, и проникали в него. При этом, как утверждали экспериментаторы, ионы сближались с уже находящимися в электродах атомами дейтерия на расстояние, достаточное для протекания реакции ядерного синтеза.

Доказательством протекания реакции должно быть выделение энергии — в данном случае это увеличение температуры воды и регистрация потока нейтронов. Флейшман и Понс заявили, что в их установке наблюдалось и то и другое. Сообщение физиков вызвало чрезвычайно бурную реакцию научного сообщества и прессы. СМИ расписывали прелести жизни после повсеместного внедрения холодного ядерного синтеза, а физики и химики по всему миру принялись перепроверять их результаты.

Во многих лабораториях смогли повторить эксперимент Флейшмана и Понса. Эксперименты говорили о том, что при реакции выделялось не только аномально большое количество тепла (в миллион раз превышающего тепловой эффект от любой химической реакции), но и гелий и тритий (получить которые химическим путем невозможно). Однако постепенно стало выясняться, что при одних и тех же начальных условиях разные ученые получают совершенно несхожие результаты. С самого начала над этой темой висело одно из самых серьезных обвинений в науке — неповторимость эксперимента. Иногда датчики фиксировали эффект, но уже в следующем эксперименте никакого эффекта нет. А даже если и есть, то в другой лаборатории он, в точности повторенный, не воспроизводится. На протяжении десятков лет холодный синтез проявлял поразительную капризность и упорно продолжал мучить своих исследователей неповторимостью экспериментов [19, 20].

За прошедшее время было опубликовано более 3000 статей [21] и предложено около 50 теоретических моделей для интерпретации полученных результатов. В многочисленных статьях описаны эксперименты, в которых наблюдались изменения элементного состава вещества при таких слабых внешних воздействиях на дейтерированные материалы, что с точки зрения современной теоретической физики не может объяснить наблюдавшиеся явления ядерных реакций в конденсированных средах. Тем не менее, в экспериментах с дейтерированными веществами выделяется тепло, регистрируется эмиссия нейтронов, трития и гелия. Элементный состав вещества при этом меняется. Эти факты могут подтвердить немногие счастливицы. Другим же исследователям не удастся получить каких-либо устойчивых результатов. Незначительная модификация конструкции экспериментальной установки и предельно малые вариации условий эксперимента влекут за собой кардинальные изменения результатов измерений. Тем не менее ис-

следование этих явлений продолжается во всех развитых странах, регулярно проходят международные конференции (прошло уже около двадцати).

Вскоре после выступления Флейшмана и Понса по распоряжению президента Буша Наблюдательным Советом исследований в энергетике (Energy Research Advisory Board — ERAB) Министерства энергетики США (Department of Energy — DOE) была собрана группа экспертов по холодному ядерному синтезу, чтобы рассмотреть выявленные противоречия холодного ядерного синтеза. Группа приняла за основу вводящие в заблуждение сообщения из Калифорнийского технологического института, Харуэлла (Harwell, Англия) и Массачусетского технологического института (МТИ). Сообщения из всех трех источников были отрицательные, и ERAB высказался против любых правительственных инвестиций в холодный ядерный синтез. Это имело далеко идущие последствия, которые серьезно препятствовали, но не остановили исследования в данной области.

Важно отметить, что привлечение средств на исследования для многих ученых стало даже более важным, чем сами исследования. Так, Центр по исследованию горячего ядерного синтеза при МТИ, финансируемый из государственного бюджета, стал одним из самых громких голосов против холодного синтеза. Однако при повторном рассмотрении результатов, полученных МТИ, была обнаружена подтасовка записей. Промежуточные записи эксперимента, как оказалось, содержали информацию о выделении чрезмерного количества тепла, в то время как в окончательной версии отчета, представленной институтом, эффект был подкорректирован, чтобы скрыть этот факт. Обнаруживший подлог исследователь Евгений Малоу, главный научный журналист МТИ, уволился в знак протеста. Сами же Флейшман и Понс были вынуждены из-за травли эмигрировать из США во Францию.

После этой истории многие серьезные исследователи прекратили работы по поиску путей осуществления холодного ядерного синтеза (ХЯС).

В нашей стране события развивались аналогичным образом; и отношение к холодному ядерному синтезу установилось подобное тому, как рекомендованное ERAB в США. Более того, комиссия по борьбе с лженаукой при президиуме АН СССР во главе с академиком Э. П. Кругляковым, объявила ХЯС и LENR лженаукой. Любопытно, что и новый президент РАН академик В. Е. Фортов тоже относит ХЯС и LENR к области лженаук.

Резко отрицательное отношение к финансированию работ в области ХЯС или LENR и у нас, и за рубежом можно объяснить тем, что успешное развитие работ в этом направлении неизбежно привело бы к серьезному сокращению финансирования работ в области горячего ядерного синтеза.

Здесь уместно вспомнить, что еще в 1957 году советский исследователь И. С. Филимоненко предложил новый способ получения энергии за счет реакции ядерного синтеза гелия из дейтерия. И. С. Филимоненко, работая в НПО «Красная звезда» в области космической техники, открыл эффект вы-

деления тепла в электроде с добавками палладия при электролизе тяжелой воды. Это открытие заинтересовало И. В. Курчатова, С. П. Королева и маршала Г. К. Жукова и в результате их ходатайства по секретному постановлению Совета Министров СССР и ЦК КПСС № 715/296 от 23.07.1960 г. целый ряд предприятий и организаций был привлечен к выполнению работ по «теплому синтезу».

Открытие планировалось использовать при разработке термоэмиссионных источников энергии для космических аппаратов, где боролись два направления: традиционный реактор на базе обогащенного урана «Топаз» и гидролизная установка И. С. Филимоненко ТЭГЭУ. Однако после смерти Курчатова разработку начали «ужимать», а после смерти Королева — закрыли вообще. Победило традиционное направление, а И. С. Филимоненко был уволен. Все работы Филимоненко были остановлены в 1968 году.

Понятно, что успешное развитие работ по термоэмиссионным преобразователям могло существенно повлиять на финансирование работ в области «обычной» ядерной энергетике. Причина еще и в том, что с 1958 года И. С. Филимоненко вел научно-исследовательскую работу по оценке радиационной опасности атомных и тепловых электростанций и испытаний ядерного оружия, а также применения ядерных энергетических установок на космических кораблях. В докладе, представленном ЦК КПСС, ему удалось доказать опасность и остановить программу запуска в то время космических кораблей с ядерной установкой на Юпитер и Марс. Атомное лобби не могло оставить без внимания такую деятельность. Все эти события и привели к остановке работ по исследованию «теплого синтеза». Однако после сенсационного заявления Флейшмана и Понса в 1989–1990 гг. в НПО «Луч» в Подольске Московской области работы И. С. Филимоненко все же были возобновлены и воссозданы три термоэмиссионных установки ТЭГЭУ мощностью по 12,5 кВт каждая. Позднее, на фоне скандала с Флейшманом и Понсом, эти работы были прекращены окончательно [22, 23].

За время проведения работ была изготовлена одна установка, прототипом которой стала известная установка «Топаз», но в качестве источника энергии использовалась тяжеловодная схема И. С. Филимоненко с низкоэнергетической ядерной реакцией. В отличие от «Топазов», в ТЭГЭУ выделяющий элемент представлял собой не ядерный реактор, а установку ядерного синтеза при низких температурах ( $T = 1150$  °C), сроком работы 5–10 лет без заправки топливом (тяжелой водой). Реактор представлял собой металлическую трубу диаметром 41 мм и длиной 700 мм, изготовленную из сплава, содержавшего несколько граммов палладия. 17 января 1992 г. подкомиссия Моссовета по экологическим вопросам промышленности, энергетике, транспорта изучала проблему ТЭГЭУ И. С. Филимоненко, посетила ФГУП НПО «Луч», где ей была продемонстрирована установка и документация на нее.

В 1992 году в печати появилось сообщение «Демонстрационная термоэмиссионная установка для ядерного синтеза». Но надежды подкомиссии не оправдались, высшие органы власти и управления Российской Федерации не обратили внимание на уникальные разработки выдающегося ученого. И. С. Филимоненко умер 26 августа 2013 г. на 89 году жизни.

Тема ХЯС снова вызвала ажиотаж в 2002 году в научных дискуссиях и прессе. На сей раз с претензией на открытие выступили физики из США Рузи Талейархан (Rusi Taleyarkhan) и Ричард Лейхи (Richard T. Lahey, Jr.). Они заявили, что смогли добиться необходимого для реакции сближения ядер, используя не палладий (одни его образцы давали эффект, другие нет), а эффект кавитации.

Кавитацией называют образование в жидкости полостей, или пузырьков, заполненных газом. Образование пузырьков может быть, в частности, спровоцировано прохождением через жидкость звуковых волн высокой интенсивности. При определенных условиях пузырьки лопаются, выделяя большое количество энергии. В момент «взрыва» температура внутри пузырька достигает десяти миллионов градусов — что сравнимо с температурой на Солнце, где свободно происходит ядерный синтез.



Рис. 6.9. Схема установки Талейархана

Талейархан и Лейхи пропускали звуковые волны через дейтерированный ацетон, в котором легкий изотоп водорода (протий) был заменен на дейтерий. Им удалось зарегистрировать поток нейтронов высокой энергии, а также образование гелия и трития — еще одного продукта ядерного синтеза (рис. 6.9).

Несмотря на красоту и логичность экспериментальной схемы, научная общественность восприняла заявления физиков более чем прохладно. На ученых обрушилось огромное количество критики, касающейся постановки эксперимента и регистрации потока нейтронов. Талейархан и Лейхи провели опыт с учетом полученных замечаний — и снова получили тот же результат.

Тем не менее авторитетный научный журнал «Nature» в 2006 году опубликовал статью, в которой высказывались сомнения в достоверности результатов. Фактически, ученых обвинили в фальсификации. В университете Пердью, куда перешли работать Талейархан и Лейхи, было проведено независимое расследование. По его итогам был вынесен вердикт: эксперимент поставлен верно, ошибки или фальсификации не обнаружено.

Несмотря на это, пока в «Nature» не появилось опровержения статьи, вопрос о признании кавитационного ядерного синтеза научным фактом повис в воздухе.

Несмотря на это, пока в «Nature» не появилось опровержения статьи, вопрос о признании кавитационного ядерного синтеза научным фактом повис в воздухе.

Следующее сообщение об успешной публичной демонстрации установки пришло из Университета Осаки в мае 2008 года. Группа японских физиков под руководством профессора Есиаки Араты (Yoshiaki Arata) создала особые структуры, наночастицы — специально подготовленные кластеры, состоящие из нескольких сотен атомов палладия. Главная особенность этих нанокластеров состоит в том, что они имеют внутри пустоты, в которые можно закачивать атомы дейтерия до очень высокой концентрации. И когда эта концентрация превысит определенный предел, дейтроны сближаются друг с другом на расстояние действия ядерных сил и начинается реакция ядерного синтеза. Эта реакция идет сразу по нескольким каналам, основной из которых — слияние двух дейтронов в атом гелия-4 с выделением тепла. В своей работе они также использовали палладий. Точнее, смесь палладия с оксидом циркония. «Дейтериевая емкость» этой смеси, по утверждениям исследователей, еще выше, чем у палладия. Ученые пропускали дейтерий через ячейку, содержащую эту смесь. После добавления дейтерия температура внутри ячейки поднялась до 70 °С. В этот момент, по их мнению, в ячейке происходили ядерные и химические реакции. После того, как поступление дейтерия в ячейку прекращалось, температура внутри нее оставалась повышенной еще в течение 50 часов (рис. 6.10).

Интересно, что кроме предсказанных теорией трития и гелия, в реакторе обнаруживались ионы меди, серебра, хрома, цинка, платины и других металлов, которых быть там просто не должно. Причем все эти металлы были представлены своими стабильными, а не радиоактивными изотопами.

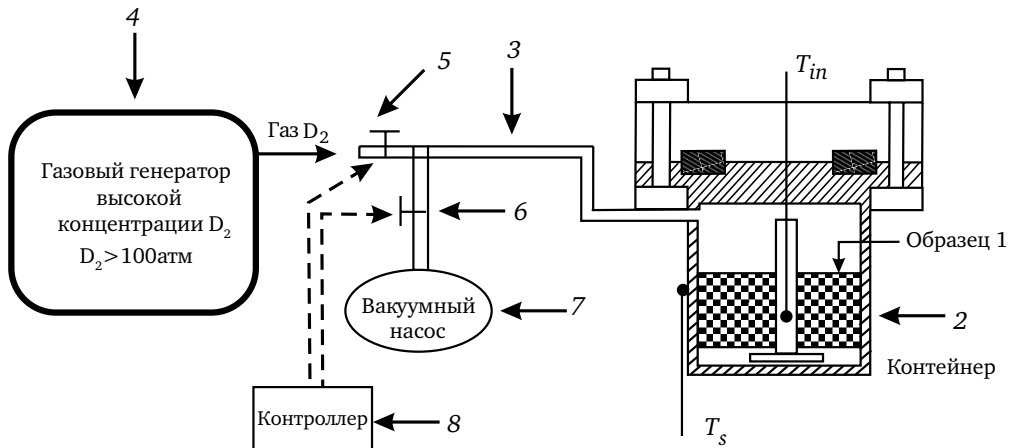


Рис 6.10. Схема установки японских физиков:

- 2 — контейнер из нержавеющей стали, содержащий образец 1, представляющий собой засыпку (в палладиевой капсуле) из окиси циркония с покрытием из палладия ( $ZrO_2-Pd$ );  $T_{in}$  и  $T_s$  — положения термометров, измеряющих температуру образца и контейнера, соответственно



Объяснить эти факты можно тем [27], что в отличие от столкновения «голых» ядер в горячей плазме, где энергия столкновения должна преодолеть кулоновский барьер, препятствующий слиянию ядер, при проникновении ядра дейтерия в кристаллическую решетку металла, кулоновский барьер между ядрами модифицируется экранирующим действием электронов атомных оболочек и электронами проводимости.

Кроме того, атом дейтерия благодаря «рыхлости» ядра, в 125 раз превышающей объем протона, содержит электрон, который в S-состоянии не летает вокруг ядра, как в планетарной модели, а колеблется линейно, пролетая сквозь ядро, приводит к исчезновению заряда ядра в этот момент. Говорят о том, что атом дейтерия часть времени находится в состоянии «динейтрона», в котором он способен проникать в другие ядра, в том числе в ядро другого дейтрона. Дополнительным фактором, влияющим на вероятность сближения ядер в кристаллической решетке, служат колебания.

### Тепловой генератор Росси

Энергогенератор, созданный скандально известным изобретателем Андреа Росси, ждет получения лицензии и начала коммерческого распространения под маркой E-Cat. Энергетический катализатор (Energy Catalyze (E-Cat)) — так было названо изобретение [24, 25].

Как сообщают разработчики технологии E-Cat, первый LENR-генератор для домашнего пользования мог бы стать доступным уже в 2013 г. — после прохождения сертификации. Скорее всего, это будет компактный (размером с два принтера) блок мощностью около 10 кВт, который сможет снабжать жилище дешевым теплом.

Над этой темой до Росси работал итальянский ученый Пиантелли, который собрал целый коллектив научных сотрудников различных университетов. Они выявили простоту механизма данного явления — металлический порошок + водород. Трубка нагревалась, выделяя несколько десятков

ватт энергии.

Именно Росси увидел в этих экспериментах коммерческий потенциал и настолько поверил, что продал дом и все деньги вложил в дальнейшие исследования. Он пригласил в напарники Серджио Фокарди — профессора Болонского университета, который был участником группы Пиантелли, и за три года их усилий была создана ячейка с 12 кВт энергии на выходе (рис. 6.11). Об этом было

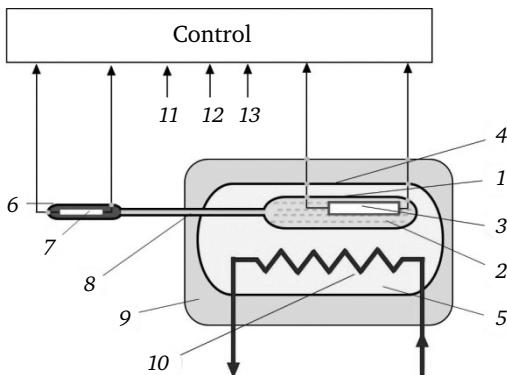


Рис. 6.11. Устройство теплового генератора Росси

объявлено 15 января 2011 года на болонской пресс-конференции, на которой присутствовал загадочный инвестор, пообещавший купить за два миллиона евро (именно столько стоил дом Росси) установку, мощностью 1 МВт.

Скопировав основные идеи у Пиантелли, Росси дополнил их секретным катализатором, который предположительно найден опытным путем и держится в строжайшей тайне. Известно только, что его стоимость не более 10% стоимости смеси.

В прочном корпусе реактора 1 размещен нанопорошок никеля 2, возможно, с добавкой некоего катализатора. Электронагреватель 3 служит для первоначального разогрева порошка при пуске устройства, он расположен внутри корпуса или снаружи реактора при условии надежного теплового контакта с корпусом. После запуска выделяемое реактором тепло воспринимается теплоносителем 5, в качестве которого используется минеральное масло для низкотемпературных версий, расплав соли или металлический сплав для высокотемпературных исполнений аппарата. Для функционирования устройства необходим водород, который получается в регенераторе водорода 6. При работе реактора расходуется очень небольшое количество водорода, буквально микрограммы в час, но от его давления зависит интенсивность тепловыделения реактора. Поэтому главным требованием к регенератору водорода является обратимость процесса газовыделения и зависимость давления в системе от температуры собственного нагревателя регенератора водорода 7.

Таким условиям отвечают гидриды некоторых металлов, например, гидрид магния. Один кубический сантиметр этого порошка вмещает водорода по весу в полтора раза больше, чем его содержится в таком же объеме сжиженного водорода, а гидрид железо-титанового сплава, например, диссоциирует при температурах всего 320–370 К с низкой теплотой образования. Трубка 8 соединяет регенератор водорода с закрытым теплоизоляцией 9 реактором. Отбор тепла осуществляется через теплообменник 10, по которому пропускается теплоноситель в виде воды или перегретого пара. Устройство контроля и управления, получая информацию от датчиков температуры и давления 11–13 поддерживает тепловыделение реактора на нужном уровне путем регулирования температуры регенератора водорода.

Сначала Андреа Росси назвал свою технологию холодным ядерным синтезом, в котором в качестве топлива выступает никель. Из-за этих звучных слов многие ученые сочли Росси шарлатаном, поскольку к холодному ядерному синтезу официальная наука все еще относится с подозрением. В настоящее время работу установки Росси предпочитают объяснять низкоэнергетической ядерной реакцией (LENR), в которой никель соединяется с водородом и трансмутирует в медь. Это экзотермический (с выделением тепла) ядерный процесс высвобождает энергию около 10 МэВ, что намного больше энергии, выделяемой в процессе сжигания водорода — 1,5 эВ.

Таким образом, технология E-Cat может производить в миллион раз больше энергии, чем самые энергоэффективные химические процессы. При этом обилие никеля в земной коре делает E-Cat одним из самых дешевых источников энергии, который к тому же не загрязняет окружающую среду.

К началу 2012 года работы по генератору Росси постепенно приняли свой функционально законченный вид, как некая единица, пригодная для широкого использования во многих областях хозяйственной деятельности.

По заявлению Андреа Росси, один генератор мощностью 1 МВт уже работает на американском военном объекте, правда он не уточнил, на каком именно. На фотографии генератор выглядит, как набор из 52 небольших блоков (аналогичных будущим «домашним»), помещенных в стандартный транспортный контейнер. Стоимость этой установки составляет 1,5 млн

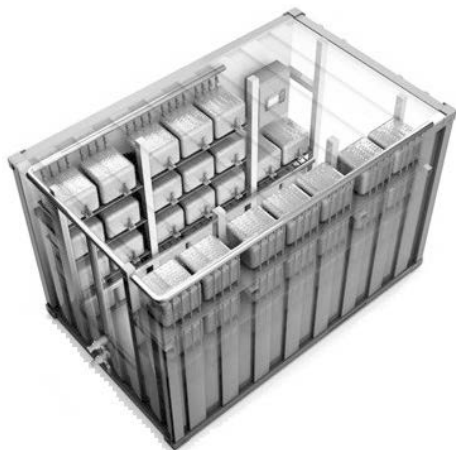


Рис. 6.12. Генератор E-Cat мощностью 1 МВт

долларов, а срок службы — до 30 лет. Для сравнения дизель-генератор аналогичной мощности стоит около 1 млн долларов, срок его службы в несколько раз меньше, причем он выделяет гораздо больше шума, по сравнению с 50 дБ у E-Cat. Установка состоит из 52 параллельных модулей, которые потребляют небольшое количество порошка никеля и водород (под давлением около 15 бар). Генератор производит около 1 МВт тепловой мощности в виде горячей воды/пара, которые можно использовать для отопления или выработки электроэнергии (рис. 6.12).

Недавно ведущий ученый исследовательского центра Лэнгли (NASA Langley Research Center) Дэннис Бушнелл (Dennis Bushnell) выступил в пользу итальянцев. В интервью EV World он обратился к теме низкоэнергетических ядерных реакций как наиболее интересных и перспективных альтернативных технологий в стадии разработки, способных теоретически решить все наши энергетические и климатические проблемы. Среди прочего Дэннис говорил о никель-водородном реакторе Росси.

Однако Бушнелл категорически отказался считать выявленный процесс холодным ядерным синтезом, как и другие сходные с ним эксперименты в области LENR. В рамках разных проектов Бушнелл работал не только на NASA, но и на американское министерство обороны, ВВС и так далее. По информации PES Network, Бушнелл полагает, что вместо ХЯС в классическом понимании тут имеет место  $\beta$ -распад, идущий в соответствии с теорией Видома — Ларсена (Widom Larsen theory).

По ней экзотические электроны, называемые тяжелыми поверхностными плазмонными поляритонами, объединяются с протонами, образуя нейтроны с очень низким импульсом. Эти нейтроны могут проникнуть в ядра атомов никеля (или другого металла), чтобы произвести ядерное превращение с выделением энергии.

Сторонники этой теории утверждают, что описанная реакция — вовсе не ядерный синтез, а только лишь захват нейтронов, и она не нарушает законов физики. Но суть в любом случае проста — некий механизм позволяет в конечном счете протону «обойти» кулоновский барьер, чтобы проникнуть в ядро атома и создать другой химический элемент (у Росси якобы из никеля получается медь). А вот как именно это происходит и происходит ли — так и неясно окончательно.

В ходе экспериментов, проведенных в мае 2012 года, LENR-генератор подтвердил свою работоспособность, хотя некоторые ученые «традиционно» сомневаются в их результатах и считают выводы ученых-экспериментаторов Джузеппе Леви (Bologna University), Эвелин Фосчи (Bologna, Italy), Торбьерна Хартмана и его коллег из Уппсальского университета недостаточно объективными.

Тем не менее, известный исследователь низкоэнергетических ядерных реакций Джед Ротвелл дал положительное заключение по поводу последних публикаций об исследовании устройства Андреа Росси. Ротвелл отмечает, что экспериментаторы не брались за теоретизирование по поводу природы реакции в установке Росси, а лишь подтвердили, что установка действительно работает и вырабатывает энергию, причем много энергии. При испытаниях тепловая энергия достигла 25 кВт·ч, хотя при тех же условиях химическая реакция никеля и водорода в гидрид никеля даст не более 0,15 Вт·ч тепловой энергии. Это полностью исключает механизм получения тепла с помощью химии. Но, главное, никель переходит в медь и железо, которые служат основным доказательством трансмутации атомных ядер. Дефект массы ядер новых элементов и является источником колоссальной избыточной тепловой энергии.

Проведенные анализы изотопного состава «родившихся» у Росси меди и железа показали их полное совпадение с природными. Однако если реакция происходит с протоном, то возможен только один вариант такой ядерной реакции, добавляющей по одной единице к атомному весу и заряду: никель-62 превращается в медь-63. Поэтому никакому железу взяться неоткуда.

Если бы шла какая-то реакция, то в никеле должна была бы образовываться медь-63 и ничего другого. По наличию этого чистого изотопа меди можно было бы подтвердить прохождение такой реакции [26, 27].

Какие физические процессы протекают в генераторе Росси остается пока загадкой.

За годы, прошедшие с момента сообщения Флейшмана и Понса учеными осознан масштаб возможных технологических применений ХЯС: он грандиозен и сравним с современным использованием нашей цивилизацией электромагнетизма, который, как оказалось, позволяет управлять и ядерными процессами. Уже сейчас невозможно представить будущее России и всей цивилизации без практических применений ХЯС.

В Японии, Китае, Англии, Италии и Франции исследования ХЯС финансируются государством, не говоря уже о США, где интенсивные секретные работы в этой области ведутся уже второе десятилетие. В основном они проводятся в лабораториях военно-морских и военно-воздушных сил. Руководители ВПК надеются создать новые автономные силовые установки, а также обеспечить своим странам монопольное положение в производстве современных вооружений ядерного и лучевого характера. Их союзниками выступают топливно-энергетические компании, желающие поставить альтернативную энергетику под свой контроль. Таким образом, в мировой среде наших оппонентов и конкурентов происходит объединение усилий военных, бизнеса и науки.

Так, в мае 2007 г. Пентагон объявил о выделении грантов на исследования процессов ХЯС. Эксперты же минобороны Англии с 2005 г. считают, что эти исследования обладают наивысшим приоритетом для обеспечения безопасности их страны.

---

## 7. Получение водорода с помощью альтернативных источников энергии

---

**С**олнечная тепловая энергия. Вода распадается на водород и кислород при температуре 2730 °С. Достигнуть этой температуры можно с помощью параболического отражателя или линзы, которая фокусирует солнечные лучи. По словам Роя Макалистера, президента американской Водородной Ассоциации, 31 000 км<sup>2</sup> в солнечном климате может обеспечить достаточно солнечного света для обеспечения энергией всех США. Однако количество воды, необходимое каждый год, равнялось бы объему озера Мид позади Дамбы Ховера. Морской воды было бы достаточно. При сжигании одной тонны водорода производится 9 тонн воды. 50% солнечного света находятся в высокотемпературном инфракрасном спектре. Тепловой распад воды кажется самым простым методом создания водорода из воды.

Джон Эрикссон разрабатывал так называемые «двигатели солнца» в 1880-х гг. Тысячи таких двигателей были проданы, чтобы качать воду, пока они не были заменены электрическими двигателями и механической энергией.

Параболическая тарелка может быть легко и дешево изготовлена. Солнечное излучение сосредоточено в точке, располагаемой выше центра тарелки. Ее называют «точкой фокусировки» солнечного концентратора. Тарелка сделана из термостойкого материала. Нагревается циркулирующая жидкость, которая поворачивает турбину для производства электроэнергии. Чем больше диаметр тарелки, тем больше количество произведенной энергии.

Проект солнечного концентратора, состоящего из параболической тарелки, паровой турбины (двигателя Стирлинга) и электрогенератора успешно реализован в США.

Параболический концентратор диаметром 3 метра вырабатывает 4–5 кВт; 6,4 метра — 25–30 кВт. КПД таких установок 28–30%. В штате Аризона летом можно получить с помощью таких установок 1,2 кВт·ч/м<sup>2</sup>; зимой — 0,62 кВт·ч/м<sup>2</sup>. Эксплуатационные расходы — 5,00 долл./кВт.

Согласно Полу Клаймасу из Лаборатории Sandia, это — «доказанный, и эффективный способ произвести солнечное электричество, разработанное специально для промышленности, с технической и финансовой поддержкой Sandia...»

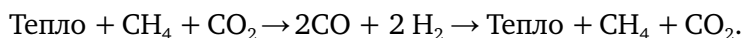
С помощью солнечных концентраторов можно обеспечивать необходимым теплом термохимические циклы и другие высокотемпературные мето-

ды получения водорода. Теоретически солнечный концентратор позволяет осуществлять прямое термическое разложение воды — термолиз.

Корпорация Макдоннелл Дугласа строила «концентратор, фокусирующий в одной точке» для Южной Калифорнийской Компании Эдисона в сотрудничестве с Энергетическим научно-исследовательским институтом. Устройство использует двигатель Стерлинга, чтобы производить 25 кВт электричества. В испытаниях генератор преобразовал 28 % солнечных лучей в электроэнергию. Фотогальванические элементы обычно эффективны не более, чем на 12 %. Устройство использует принцип сфокусированной точки на крупном масштабе. Отражатель состоит из зеркальных панелей, установленных на земле. Каждую панель можно перемещать отдельно. Компьютер в течение всего дня выравнивает всю область, чтобы сохранять точку фокусирования. В месте фокусировки температура достигает 1000 °С (1800 °F) в ясный день, чтобы произвести 10 мВт энергии. Растворимые соли переносят теплоту в термические резервуары для хранения. Если облака закрывают солнце в течение времени более, чем 30 минут, производство останавливается, пока солнце вновь не появится. Два новых резервуара были добавлены в 1992 г., что позволило продолжать выработку энергии во время облаков. С климатом Южной Калифорнии, устройство может эксплуатироваться 60% времени.

Солнечные коллекторы отслеживают солнце с самого восхода и до заката. Линейная система фокусировки использует желоб, который сосредотачивает солнечный свет по линии. Рой Макалистер, изучающий солнечные коллекторы, сделал вывод, что параболический коллектор в форме тарелки сосредотачивает солнечные лучи более эффективно.

Рой Макалистер описал способ хранения тепловой энергии без потерь. Тепло преобразовывает метан и углекислый газ в угарный газ и водород. Тепло, сохраненное в этой форме, может транспортироваться от солнечных областей до отдаленных местоположений, которые испытывают недостаток в обильной солнечной энергии. С помощью подходящего катализатора эти два газа могут быть повторно объединены в их первоначальную форму с выделением тепла. Пример реакции:



Швейцарская компания Clean Hydrogen Producers (CHP) разработала технологию производства водорода из воды при помощи параболических солнечных концентраторов. Площадь зеркал установки составляет 93 м<sup>2</sup>. В фокусе концентратора температура достигает 2200 °С. Вода начинает разделяться на водород и кислород при температуре более 1700 °С.

За световой день 6,5 часов (6,5 кВт · ч/м<sup>2</sup>) установка CHP может разделять на водород и кислород 94,9 литров воды. Производство водорода составит 3800 кг/год (около 10,4 кг/день).

Израильский Weizmann Institute of Science в 2005 г. испытал технологию получения не окисленного цинка в солнечной башне. Оксид цинка в присутствии древесного угля нагревался зеркалами до температуры 1200 °С на вершине солнечной башни. В результате процесса получался чистый цинк. Далее цинк можно герметично упаковать и транспортировать к местам производства электроэнергии. На месте цинк помещается в воду, в результате химической реакции получается водород и оксид цинка. Оксид цинка можно еще раз поместить в солнечную башню и получить чистый цинк.

Технология прошла испытания в солнечной башне канадского Institute for the Energies and Applied Research.

Такие возобновляемые энергоресурсы, как энергия ветра, теплота верхних слоев океана, гидроэнергия, геотермальная энергия и энергия приливов могут быть использованы для получения водорода после преобразования энергии первичных источников в электроэнергию [9].

**Из энергии ветра.** Департамент энергетики США (DOE) и Национальная исследовательская энергетическая лаборатория (NREL) с 2006 г. проводит исследовательские работы «Водород из ветра». Построена водородная заправочная станция с ветрогенератором мощностью 100 кВт. Исследования должны сравнить методы производства водорода гидролизом из энергии ветра и энергии из промышленной электрической сети. Ветро-гидролизная система установлена в Национальном ветряном технологическом центре, принадлежащем NREL. Будут сравниваться различные технологии гидролиза воды, хранения, их стоимости.

Согласно расчетам NREL в ближайшем будущем себестоимость производства водорода из энергии ветра составит 4,03 долл. за кг водорода. В долгосрочной перспективе себестоимость водорода снизится до 2,33 долл. за кг водорода.

США смогут ежегодно производить из энергии ветра 4 класса и выше 154 млрд кг водорода.

**Из мусора.** Разрабатываются различные новые технологии производства водорода. Например, в октябре 2006 г. Лондонское водородное партнерство опубликовало исследование о возможности производства водорода из муниципального и коммерческого мусора. Согласно исследованию, в Лондоне можно ежедневно производить 141 тонну водорода как пиролизом, так и анаэробным сбраживанием мусора. Из муниципального мусора можно производить 68 тонн водорода.

141-й тонны водорода достаточно для работы 13750 автобусов с двигателями внутреннего сгорания, работающими на водороде. В Лондоне в настоящее время эксплуатируется более 8000 автобусов.

**Химическая реакция воды с металлами.** В 2007 г. Университет Purdue (США) разработал метод производства водорода из воды при помощи алюминиевого сплава.



Сплав алюминия с галлием формируется в pellets. Pellets помещают в бак с водой. В результате химической реакции производится водород. Галлий создает вокруг алюминия пленку, предотвращающую окисление алюминия. В результате реакции создается водород и оксид алюминия.

Из одного фунта алюминия можно получать более 2 кВт·ч энергии от сжигания водорода и более 2 кВт·ч тепловой энергии во время реакции алюминия с водой. В будущем, при использовании электроэнергии атомных реакторов 4-го поколения, себестоимость водорода, получаемого в ходе реакции, станет эквивалентна цене бензина 3 долл. за галлон.

Автомобиль среднего размера с двигателем внутреннего сгорания с 350 фунтами (158 кг) алюминия на борту может проехать 350 миль (560 км). В будущем стоимость поездки составит 63 долл., включая стоимость восстановления оксида алюминия на атомной электростанции 4-го поколения.

**Из биомассы** водород получается термохимическим или биохимическим способами. При термохимическом методе биомассу нагревают без доступа кислорода до температуры 500–800 °С (для отходов древесины), что намного ниже температуры процесса газификации угля. В результате процесса выделяется H<sub>2</sub>, CO и CH<sub>4</sub>.

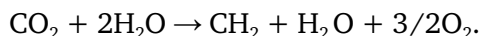
Себестоимость процесса 5–7 долл. за килограмм водорода. В будущем возможно снижение до 1,0–3,0 долл.

В биохимическом процессе водород вырабатывают различные бактерии, например *Rodobacter spheroides*.

Возможно применение различных ферментов для ускорения производства водорода из полисахаридов (крахмал, целлюлоза), содержащихся в биомассе. Процесс проходит при температуре 30 °С при нормальном давлении. Себестоимость водорода около 2 долл. за кг.

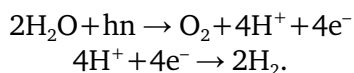
**Биохимическое производство водорода.** Многообещающей и перспективной альтернативой промышленным процессам получения водорода является разложение воды с использованием солнечной энергии в процессах фотосинтеза и биооконверсии.

В течение фотосинтеза зеленые растения и морские водоросли (микроскопические одноклеточные растения) преобразовывают углекислый газ, воду и солнечный свет (зеленый свет с длиной волны 500 нм) в углеводы, воду и кислород.



Солнечный свет поглощается светочувствительным пигментом, например белком хлорофилла. С помощью активных центров этого белка энергия передается электронам, источником которых служит некоторое донорное вещество. Затем, как и при фотосинтезе, электроны через промежуточное

соединение ферродоксин доставляются к ионам водорода, восстановление которых до молекулярного состояния происходит под действием катализатора биологической природы:



Исследования в области биологических методов получения водорода носят пока поисковый характер. Ученые калифорнийского университета в Беркли (UC Berkeley) 1999 г. обнаружили, что если водорослям не хватает кислорода и серы, то процессы фотосинтеза у них резко ослабевают, и начинается бурная выработка водорода.

Водород может производить группа зеленых водорослей, например *Chlamydomonas reinhardtii*. Водоросли могут производить водород из морской воды или канализационных стоков.

Специалисты, проводя эксперименты с сине-зелеными водорослями, пришли к выводу, что для обеспечения тепловых потребностей города с населением 1 млн человек и расходом 10 кВт на душу населения потребуется плантация площадью 17,5 км<sup>2</sup>. Такая оценка излишне оптимистична, хотя будущее биохимического производства водорода сулит быть блестящим.

При выращивании морских водорослей в качестве «энергетического урожая» необходимо поддерживать высокую температуру. Ненужное тепло от градирен ядерного реактора на 100 МВт поддержит 4047 гектар водоема с морскими водорослями. Этот водоем приведет к 4,5 кг органического вещества на квадратный метр. Поставка дополнительного углекислого газа увеличивает норму на 50 %, 22680 кг морских водорослей могут быть разумно преобразованы в 10 кВт·ч метана.

Фотохимические процессы, основанные на использовании энергии солнечного света, дают наиболее долговечное решение проблемы снабжения нашей планеты вторичной формой энергии в наиболее экологически приемлемом виде и практически без ограничений по масштабу, и поэтому заслуживают самого пристального внимания.

**Расчетная оценка характеристик комбинированной энергоустановки.** Государственным научным центром РФ «Физико-энергетический институт» (ГНУ РФ ФЭИ) разработана комбинированная энергоустановка электрической мощностью 7,5 кВт, включающая ветрогенератор (ВГ), электролизёр, ресивер водорода и батарею топливных элементов (БТЭ). Рассмотрены и проанализированы 2 режима работы: первый, когда вся электроэнергия, вырабатываемая ВГ, идет в электролизёр для производства водорода, который накапливается в ресивере. Из ресивера водород поступает в БТЭ, обеспечивая ее непрерывную работу и генерацию электрической мощности и тепла для потребителя. Показано, что достоинством этого режима яв-

ляется постоянная работа БТЭ, а недостатком — большая потребная мощность ВГ, а значит, и стоимость всей установки. Второй режим работы, когда часть (7,5 кВт) электрической мощности ВГ (если есть ветер и он работает) подается прямо потребителю, а остальная ее часть подается в электролизёр для выработки и накопления в ресивере водорода. Когда ВГ не работает (нет ветра), включается БТЭ, которая генерирует электрическую мощность 7 кВт и тепло для потребителя, используя водород из ресивера. Достоинство этого режима — умеренная потребная мощность ВГ и, соответственно, стоимость установки. Недостатки — отсутствие тепла в режиме, когда электроэнергия поступает потребителю прямо с ВГ; необходимость часто включения-выключения БТЭ, что снижает его ресурс.

ГНЦ РФ ФЭИ занимается разработкой твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) планарного типа и энергоустановок (ЭУ) на их основе с 1996 г.

В настоящее время в ГНЦ РФ ФЭИ ведется разработка и совершенствование, в основном, двух технологий планарных ТОТЭ (с точки зрения несущего элемента): с несущим электролитом и с несущим анодом.

ТОТЭ с несущим электролитом. Основой ТОТЭ является планарный газоплотный твердооксидный электролит из YSZ толщиной 250–400 мкм, на который с двух сторон нанесены пористые электроды толщиной, как правило, 20–50 мкм: анод (кермет NiO — YSZ) и катод из манганита лантана-стронция  $\text{La}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{MnO}_3$  (LSM). В ФЭИ разработана технология получения газоплотного YSZ-электролита, которая позволяет получать изделия с высокой ионной проводимостью, стабильностью и воспроизводимостью электрофизических свойств, возможностью формирования электродных покрытий различными способами. С целью отработки конструкции и технологии ТОТЭ на специальном лабораторном стенде были проведены испытания более двухсот единичных элементов этого типа при температурах до 950 °С. Максимальная плотность электрической мощности ТОТЭ, достигнутая при этих испытаниях, составила  $\sim 700$  мВт/см<sup>2</sup> при рабочей температуре 950 °С.

Ведутся работы по дальнейшему совершенствованию этой технологии, в частности, в направлении дальнейшего снижения внутренних поляризационных и омических потерь в ТОТЭ, что позволит довести плотность электрической мощности до 1000 мВт/см<sup>2</sup>. Разрабатывается технология создания каталитически активных пористых слоев на границах раздела «электрод — твердый электролит».

ТОТЭ с несущим анодом и тонкопленочным электролитом. Ведущей тенденцией последних лет является стремление к максимально возможному снижению стоимости изготовления ТОТЭ и батарей за счет удешевления используемых материалов и технологий, что позволило бы в ближайшие несколько лет перейти к коммерциализации ЭУ на ТОТЭ. В настоящее время

наиболее перспективным направлением представляется создание батареи на основе планарного ТОТЭ с несущим анодом и тонкопленочным (5–20 мкм) твердым электролитом с рабочей температурой 750–800 °С. Переход в эту область рабочих температур позволяет изготавливать почти все основные компоненты батареи ТОТЭ (кроме самого ТОТЭ) из металлических сплавов, что существенно повышает технологичность изготовления батареи и снижает ее стоимость. Основой ТОТЭ в этом случае является сравнительно толстый (до 1000 мкм) анодный диск из кермета NiO — YSZ, на который нанесены тонкие слои твердого электролита (YSZ) и катода (LSM + YSZ). В ГНЦ РФ ФЭИ разработана технология получения анодных дисков на основе кермета NiO — YSZ с регулируемой пористостью и хорошей проводимостью, которая обеспечивает требуемую технологическими нормами последовательность термической обработки при формировании покрытий твердого электролита и катода, возможность формирования многослойного анода («активного слоя» и коллектора). Эта технология обеспечивает повышенную термостойкость ТОТЭ и воспроизводима в промышленном масштабе. Отработка этой технологии началась в ФЭИ сравнительно недавно.

В настоящее время на экспериментальных образцах планарных ТОТЭ с несущим анодом достигнута плотность электрической мощности ~ 300 мВт/см<sup>2</sup> при рабочей температуре ~ 800 °С. Ведется дальнейшее совершенствование этой перспективной технологии. На рис. 7.1 (слева) планарный ТОТЭ с несущим анодом и тонкопленочным электролитом. Справа показана разработанная в ГНЦ РФ ФЭИ металлическая биполярная пластина (БИП), которая является одним из ключевых компонентов батареи планарных ТОТЭ.

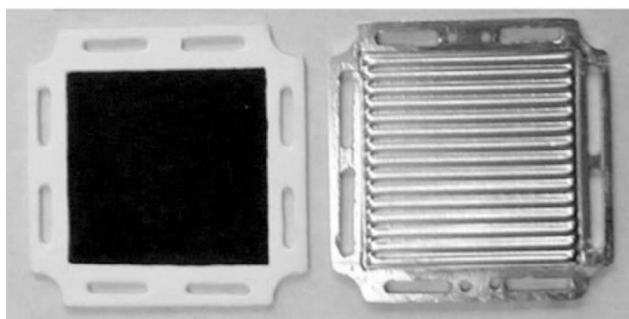


Рис. 7.1. Планарный ТОТЭ и биполярная пластина конструкции ГНЦ РФ ФЭИ

Помимо коммутации ТОТЭ в последовательную электрическую цепь, БИП осуществляет герметичное разделение полостей топлива и окислителя, а также подвод топлива и окислителя к электродам ТОТЭ и отвод от них газообразных продуктов электрохимических реакций. Разрабатываемая БИП

снабжена газоплотным защитным покрытием и токосъемами с деформируемым контактным слоем, что позволит обеспечить ее высокую коррозионную стойкость в окислительной среде при высокой температуре и существенно снизить электрические потери при коммутации элементов.

На базе планарного ТОТЭ с несущим электролитом в ФЭИ в 2001–2002 гг. создан и испытан ряд 3- и 5-элементных батарей с диаметром элемента до 60 мм. Испытания батарей проводились на лабораторном стенде, продолжительность испытаний около 200 ч, топливо — водород. При температуре

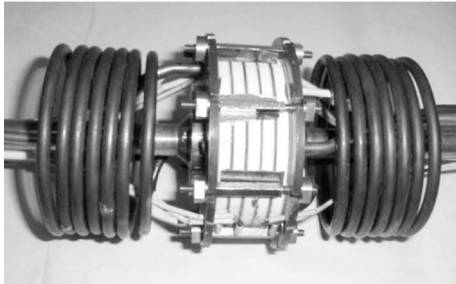


Рис. 7.2. Батарея планарных ТОТЭ с несущим электролитом конструкции ГНЦ РФ ФЭИ перед испытаниями

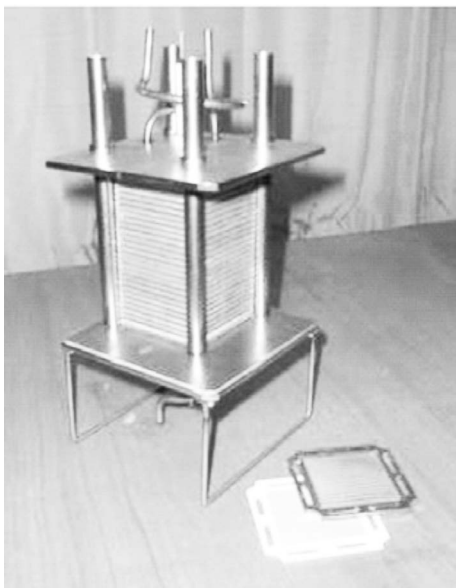


Рис. 7.3. Макет батареи на основе планарных ТОТЭ с несущим анодом и металлическими БИП

950 °С достигнута максимальная выходная мощность 5-элементной батареи ~ 30 Вт при средней плотности электрической мощности ~ 260 мВт/см<sup>2</sup>. На рис. 7.2 показана 5-элементная батарея (вместе с теплообменниками). Созданы несколько специальных стендов для проведения испытаний.

Основная проблема при испытаниях батарей ТОТЭ с несущим электролитом — значительные электрические потери в элементах токосъема и коммутации элементов в батарее. Следует отметить, что и зарубежные разработчики сталкиваются с этой серьезной проблемой.

Одним из путей решения этой проблемы является создание батареи на основе планарных ТОТЭ с несущим анодом и металлическими БИП на рабочую температуру 750–800 °С. В настоящее время в ГНЦ РФ ФЭИ ведется разработка такой батареи с числом элементов от 30 до 40 шт. (рис. 7.3). Проведены успешные испытания 5-элементных макетов такой батареи [32].

Помимо работ по основным технологиям собственно ТОТЭ, в ГНЦ РФ ФЭИ разработан также ряд технологий, связанных с созданием батарей ТОТЭ. В частности, разрабатывается технология специальных стеклоприпоев для пайки топливных элементов и батарей ТОТЭ. Разработана техноло-

гия и создано устройство для электростатического нанесения тонких пленок электролита и защитных покрытий. Налаживается опытное изготовление керамических элементов планарных ТОТЭ, использующее современные высокопроизводительные технологии: литье на движущуюся ленту (tape-casting), напыление по трафарету (screenprinting) и ряд других. При необходимом финансировании оно может быть быстро развернуто для промышленного производства.

Создается база для проведения демонстрационных и ресурсных испытаний ЭУ. В настоящее время смонтированы элементы стендовой системы «Каскад» для подготовки топлива и подогретого воздуха для испытаний ЭУ мощностью до 10 кВт. Разрабатывается оригинальный преобразователь постоянного тока в переменный (инвертор) для ЭУ с КПД более 95 %. К сожалению, из-за недостаточного финансирования эти работы приостановлены.

Одним из интересных и перспективных применений топливных элементов, которые сейчас интенсивно исследуются, является включение их в состав энергоустановок, использующих такие возобновляемые источники энергии, как ветры или приливы. Особенностью этих источников является непостоянство их действия, что сильно затрудняет их использование для энергоснабжения потребителей, требует применения различных аккумулирующих устройств.

Принципиальная схема комбинированной энергоустановки (КЭУ) небольшой мощности, включающей батарею топливных элементов (БТЭ), ветрогенератор (ВГ), электролизёр (ЭЛ), ресивер (РС) приведена на рис. 7.4. Такая установка могла бы, например, использоваться в качестве автономного источника энергоснабжения в тундре или в горах, где постоянно дуют сильные ветры.

Запишем основные расчетные соотношения:

Электрический КПД БТЭ равен:

$$\eta_{\text{БТЭ}} = 3600N_{\text{БТЭ}} / (G_{\text{H}_2}H_V), \quad (1)$$

где  $H_V$  — объемная теплота сгорания водорода, кДж/нм<sup>3</sup>.

Из соотношения (1) легко получить формулу объемного расхода водорода для БТЭ:

$$G_{\text{H}_2} = 3600N_{\text{БТЭ}} / (\eta_{\text{БТЭ}}H_V). \quad (2)$$

Электрическая мощность электролизёра, производящего поток водорода, будет равна:

$$N_{\text{эл}} = \alpha G_{\text{H}_2}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — энергопотребление электролизёра, кВт · ч/нм<sup>3</sup>.

КПД электролизёра равен:

$$\eta_{эл} = H_v / 3600\alpha. \quad (4)$$

Так, для  $\alpha = 3,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{нм}^3$   $\eta_{эл} = 0,77$ .

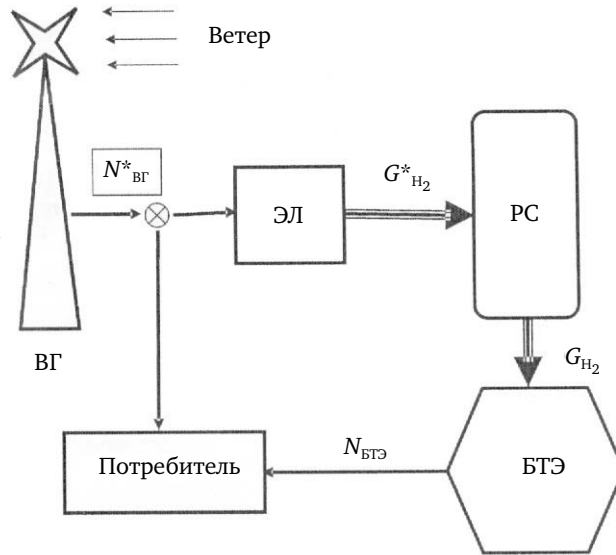


Рис. 7.4. Структура комбинированной энергоустановки  $N_{ВГ}^*$  — электрическая мощность ВГ (меняется в зависимости от скорости ветра);  $G_{H_2}^*$  — поток водорода от электролизёра (меняется в зависимости от мощности ВГ);  $G_{H_2}$  — объемный расход водорода из емкости (определяется электрической мощностью БТЭ);  $N_{БТЭ}$  — выходная электрическая мощность БТЭ

Рассчитаем  $G_{H_2}$  и  $N_{эл}$  в зависимости от  $\eta_{БТЭ}$  при  $N_{БТЭ} = 7,5 \text{ кВт}$  и  $\alpha = 3,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{нм}^3$

Таблица 7.1

Результаты расчетов

| Параметр  | Количество расчетов |       |       |       |
|---|---------------------|-------|-------|-------|
|   | 1                   | 2     | 3     | 4     |
| $N_{БТЭ}$ , кВт   | 7,50                | 7,50  | 7,50  | 7,50  |
| $\eta_{БТЭ}$  | 0,29                | 0,35  | 0,40  | 0,45  |
| $G_{H_2}$ , нм <sup>3</sup> /ч  | 8,39                | 6,95  | 6,08  | 5,40  |
| $N_{эл}$ , кВт  | 32,70               | 27,10 | 23,70 | 21,10 |
| Номинальная электрическая мощность ВГ $N_{ВГ}$ при $\psi = 0,4 \text{ кВт}$ | 82,00               | 68,00 | 59,00 | 53,00 |

Как следует из табл. 7.1, при непрерывном режиме работы батареи топливных элементов с заданной электрической мощностью  $N_{\text{БТЭ}} = 7,5$  кВт при  $\eta_{\text{БТЭ}} = 0,29$  (29%) для обеспечения БТЭ топливом ( $\text{H}_2$ ) необходим электролизёр мощностью не менее 32,7 кВт. Отметим, что при увеличении  $\eta_{\text{БТЭ}}$  потребная мощность электролизёра снижается.

В реальности мощность электролизёра должна быть еще выше, так как он будет работать только тогда, когда есть подача электроэнергии от ВГ, т. е. постоянно в течение, например, года. Поэтому величину  $N_{\text{эл}} = 32,7$  кВт следует рассматривать как среднее значение мощности электролизёра за год. Однако чтобы этого достичь, номинальная мощность электролизёра должна быть существенно выше.

Рассмотрим на примерах несколько схем построения КЭУ и их характеристики.

Схема № 1. Вся электроэнергия, вырабатываемая ВГ, идет в электролизёр для производства водорода, который затем поступает в ресивер и там накапливается. Из ресивера водород поступает в БТЭ, обеспечивая ее непрерывную работу БТЭ генерирует электроэнергию (7,5 кВт) и тепло для потребителя.

Для непрерывной работы БТЭ мощностью 7,5 кВт с КПД = 29% в течение года (~ 8800 ч) необходимо (см. табл. 7.1)  $8,39 \text{ нм}^3/\text{ч} \cdot 8800 \text{ ч} = 73\,832 \text{ нм}^3$  водорода.

При этом к электролизёру необходимо подвести  $32,7 \text{ кВт} \cdot 8800 \text{ ч} = 287\,760 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  электроэнергии, которую должен выработать ВГ.

Годовую выработку электроэнергии ВГ характеризуют т. н. мощностным фактором  $\psi$  (Capacity factor), т. е. отношением фактически выработанной энергии за год к тому ее количеству, которое ВГ мог бы выработать при непрерывной работе на номинальной мощности в течение года. По литературным данным  $\psi$  обычно составляет 0,25–0,30. Наилучшее значение  $\psi$  достигает ~ 0,4 (по данным American Wind Energy Association, 1998).

Таким образом, чтобы за год выработать 287 760 кВт·ч электроэнергии даже при  $\psi = 0,4$ , ВГ должен иметь номинальную мощность  $32,7/0,4 = 82$  кВт. При  $\psi = 0,25$ –0,3 номинальная мощность ВГ будет составлять примерно 110–130 кВт. При этом мы полагаем, что передача энергии от ВГ к электролизёру происходит без потерь. Значения  $N_{\text{ВГ}}$  для различных КПД батареи топливных элементов приведены в последней строке табл. 7.1.

Чтобы обеспечить указанную мощность ветрогенератора, необходимо поставить или один ВГ мощностью 100–130 кВт, или 10–11 испанских ветроустановок ВК–12 компании «Vogna» номинальной мощностью по 12 кВт, или, например, 7–8 российских ветроустановок, производимых АО «Торнадо» (г. Истра, Московская область) мощностью по 16 кВт. Очевидно, последние два варианта вряд ли приемлемы.

Сделаем стоимостные оценки этой схемы (по российским и иностранным источникам, а также материалам из интернета: EWEA, Publications, THE ECONOMICS OF WIND ENERGY).



Удельная стоимость ветрогенераторов (или удельные капитальные затраты) оценивается величиной  $\sim 1000$  евро за 1 кВт установленной мощности. Например, ветрогенератор «Vogpaу» мощностью 12 кВт стоит 11 733 евро. Оценочная удельная стоимость электролизёра  $\sim 1000$  долл. за  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ , т. е. электролизёр производительностью  $\sim 8,4 \text{ м}^3/\text{ч}$  может стоить примерно 8400 долл.

Обзор мировых данных по энергоустановкам на твердополимерных топливных элементах (см. например доклад В. Н. Фатеева «Топливные элементы с твердополимерным электролитом: проблемы и перспективы», ИАЭ им. Курчатова, 2000 г.) показывает, что в ближайшие несколько лет их цена может снизиться до 1000–1500 долл. за 1 кВт установленной мощности, т. е. это означает, что цена установки в 7,5 кВт составит 7500–11 250 долл. США.

К сожалению, мы не смогли найти данных по стоимости ресиверов водорода, однако полагаем, что емкости для хранения водорода под давлением стоят недешево.

Что касается вместимости ресиверов для аккумуляции водорода, то, например, стандартный ресивер ВЭУ-20 1У 01 емкостью  $20 \text{ м}^3$  при давлении 10 атм может вместить  $200 \text{ м}^3$  водорода, которых хватит всего на 24 ч ( $200/8,39$ ) работы БТЭ, что, конечно, мало.

Стандартный ресивер емкостью  $80 \text{ м}^3$  при давлении 9 атм может вместить  $720 \text{ м}^3$  водорода на 86 ч работы БТЭ.

Например, для обеспечения работы БТЭ в течение недели требуется  $1400 \text{ м}^3$  водорода, т. е. 7 ресиверов емкостью  $20 \text{ м}^3$  или 2 ресивера емкостью  $80 \text{ м}^3$ .

Схема № 2. Часть энергии ВГ (если есть ветер и он работает) подается прямо потребителю (7,5 кВт), а остальная ее часть подается в электролизёр для выработки и накопления в ресивере водорода. Когда ВГ не работает (нет ветра), включается БТЭ, которая генерирует электрическую (7,5 кВт) и тепловую мощность для потребителя, используя водород из ресивера.

Положим, что  $\psi = 0,4$ . Упрощая ситуацию, будем считать, что 40% времени в году ВГ работает на номинальной мощности ( $8800 \text{ ч} \cdot 0,4 = 3520 \text{ ч}$ ), а остальные 60% ( $5280 \text{ ч}$ ) — простаивает ввиду отсутствия ветра. Таким образом, за 3250 ч работы ВГ должен выработать  $7,5 \text{ кВт} \cdot 3250 \text{ ч} = 24 375 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  электроэнергии для потребителя и такое количество электроэнергии для электролизёра, чтобы произвести водорода на 5280 ч работы БТЭ при мощности 7,5 кВт в период отсутствия ветра, т. е.  $5280 \cdot 8,39 = 44 299 \text{ м}^3$ . Это количество электроэнергии равно  $172 766 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  ( $44 299 \cdot 3,9$ ). Таким образом, за 3250 ч ВГ должен произвести  $197 141 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  ( $24 375 + 172 766$ ) электроэнергии, а его номинальная мощность должна составлять 61 кВт ( $197 141/3250$ ). Это почти в два раза меньше, чем в случае схемы № 1.

И в заключение отметим достоинства и недостатки обеих рассмотренных схем.

Схема № 1. *Достоинство* — постоянная работа БТЭ с генерацией необходимого количества электричества и тепла для потребителя; *недостаток* — большая потребная мощность ВГ, а значит и стоимость всей установки.

Схема № 2. *Достоинство* — умеренная потребная мощность ВГ и, соответственно, стоимость установки; *недостаток* — отсутствие тепла в режиме, когда электроэнергия поступает потребителю прямо с ВГ, необходимость частого включения-выключения БТЭ, что снижает его ресурс.

---

## 8. Новые направления в получении водорода

---

### 8.1. Усовершенствование методов электролиза воды

---

Современный уровень техники электрохимического получения водорода делает этот метод достаточно экономичным для производства небольших количеств водорода, к качеству которого предъявляются высокие требования. Для того чтобы электролиз воды стал конкурентоспособным процессом и удовлетворял крупных потребителей водорода, а также для обеспечения его экономичности в решении проблем водородной энергетики, необходимо развивать и существенно совершенствовать технологию электролиза, снижать себестоимость электролитического водорода до уровня, не превышающего этот показатель при других методах его производства [5]. При этом необходимо решить ряд сложных технических и экономических задач. Наибольшее значение из них имеют:

- снижение удельных затрат электрической энергии на получение водорода и увеличение коэффициента полезного использования энергии, затрачиваемой на электролитическое разложение воды;
- увеличение единичной мощности электролизёров и повышение надёжности их работы;
- снижение удельных капитальных вложений для организации крупного производства водорода электролитическим разложением воды.

Разработка новых направлений развития технологии электролиза воды основана на результатах исследований этого процесса, проведенных в последние десятилетия в различных странах. В этих разработках также успешно используется большой опыт исследований в области топливных элементов.

К наиболее важным вопросам и техническим решениям, используемым при создании новых вариантов процесса электролитического разложения воды, относятся следующие:

- разработка электродов (анодов и катодов) с каталитически активной (активированной) поверхностью по отношению к процессам разряда кислорода на аноде и водорода на катоде для снижения перенапряжения на электродах;
- развитие рабочей поверхности электродов с целью интенсификации процесса и создания электролизёров большей мощности, разработка проницаемых для газов форм электродов и, в частности, по-

ристых электродов для вывода газов, выделяющихся на электродах, что позволит уменьшить расстояние между электродами. Это имеет особенно большое значение при использовании электролизёров, работающих с высокими плотностями тока. Так уменьшение потерь напряжения в электролите и диафрагме за счет снижения расстояния между электродами от 10 до 5 мм в таких электролизёрах позволяет повысить коэффициент полезного использования энергии на 5–8%. В новых процессах электролиза водяного пара и электролиза с твердым полимерным электролитом удалось снизить это расстояние до долей миллиметра;

- разработка электродов из оксидов металлов или их смесей для работы при высоких температурах, где металлические электроды не достаточно стойки;
- повышение рабочей температуры процесса электролиза в одних вариантах осуществления его до 120–200 °С и в других до 800–1000 °С, что открывает новые возможности для снижения затрат электрической энергии на процесс разложения воды;
- осуществление процесса электролиза при повышенном давлении, т. к. это приведет к значительному увеличению температуры;
- применение новых конструкционных и защитных материалов, стойких при длительной эксплуатации в коррозионно-активных средах при повышенных температурах. Для защиты деталей электролизёров от коррозии при контакте с электролитом находят применение перфторированные полимеры. Разрабатываются также и ионообменные мембраны на основе перфторированных полимеров.
- известен способ производства водорода, заключающийся в использовании глубинных высокотермальных вод в местах подводной вулканической деятельности для производства электроэнергии, подаваемой на электролиз воды, в результате которого получают водород. К недостаткам данного способа следует отнести сложность его аппаратного оформления.

## 8.2. Производство экологически чистых видов горючего для автомобильных топлив

---

По данным МАГАТЭ в настоящее время энергетический потенциал углеводородного сырья оценивается величиной  $55 \cdot 10^{12}$  МВт · ч при нынешнем ежегодном расходе  $3 \cdot 10^{10}$  МВт · ч. Оценки показывают, что с учетом роста расхода угля может хватить на 200–500 лет, а газа и нефти — всего

на 20–50 лет. Им нужна срочная замена, которую следует готовить уже в настоящее время. Одним из наиболее перспективных видов энергоносителей, способных с успехом заменить углеводородное сырье и обеспечить людей дешевой энергией на многие века в неограниченном количестве, является водородное топливо.

*«Перспективным топливом для двигателей внутреннего сгорания является водород... Перспективен электролиз воды для получения водорода, но при наличии дешевой электроэнергии...»* (Г. А. Терентьев, В. М. Тюков, Ф. В. Смаль. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. 1989 г., с. 223).

Но себестоимость получения водорода при электролизе воды с использованием энергии АЭС (КПД 27%) — 1427–1732 долл./т. Для сравнения, средние текущие издержки добычи нефти оцениваются в 44 долл./т. Отсюда в настоящее время водород при всех своих достоинствах является слишком дорогой заменой традиционным топливам и доступен только для ракетных топлив. Его стоимость в  $1500/44 = 34$  раза дороже традиционных топлив. При использовании энергии низкотемпературного ядерного синтеза стоимость водорода становится порядка 4,33 долл./т, т. е. его стоимость станет в 10 раз дешевле бензина. Таким образом, проблема замены углеводородных топлив водородом находит свое решение в использовании изобретений низкотемпературного ядерного синтеза: *«При успешном решении проблемы управляемых термоядерных реакций человечество было бы обеспечено практически неисчерпаемыми источниками энергии, превосходящими все остальные источники. В самом деле, в 1 литре воды содержится около 1/30 г дейтерия и его теплотворная способность в качестве термоядерного горючего эквивалентна примерно 300 л бензина.*

*В океанах Земли содержится около  $5 \cdot 10^{13}$  т дейтерия. При современном уровне энергетических потребностей запасов дейтерия на Земле могло бы хватить на 20 млрд лет».* (П. Е. Колпаков. Основы ядерной физики. — М., 1989, с. 328).

Реакции низкотемпературного ядерного синтеза осуществимы и позволяют превращать одно атомное ядро в другое, и при этом выделяется большое количество энергии. Так, например, если превратить атомное ядро азота-14 в атомное ядро кислорода-16, выделяется энергия порядка 23,79 МэВ. Преобразование 1 кг азота-14 в кислород сопровождается выделением  $3,9 \cdot 10^{10}$  ккал энергии. Этой энергии достаточно для разложения 6 тыс. т воды на кислород и водород.

*«Поскольку стоимость одного грамма дейтерия примерно в 100 раз меньше стоимости грамма урана-235, а его природные запасы практически неисчерпаемы, чего нельзя сказать о запасах делящихся веществ, широкое развитие работ по изысканию путей для осуществления управляемых реакций ядерного синтеза экономически оправдано».* (А. К. Вальтер, И. И. Залюбовский. Ядерная физика. — Харьков, 1991, с. 365).

Таким образом, если совместить получение ядерной энергии с помощью низкотемпературного ядерного синтеза с производством водорода путем электролиза воды, то при равных условиях себестоимость водорода окажется в 400–700 раз меньше, чем при использовании энергии АЭС (1 кг дейтерия способен выделить в 4–7 раз больше энергии, чем 1 кг урана-235). Откуда стоимость электролитического водорода становится  $1732/400 = 4,33$  долл./т.

Так, изобретение Евсюкова Г. А. [33] решает проблему обеспечения моторным топливом и указывает путь, как при помощи низкотемпературного ядерного синтеза, имеющего неограниченные запасы ядерного горючего, калорийность которого в миллионы раз превышает калорийность бензина, обеспечить будущим поколениям людей автомобильный транспорт дешевым экологически чистым горючим на многие века.

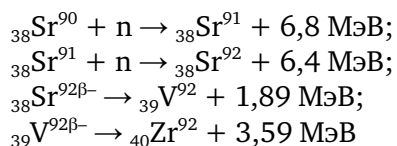
Более целесообразно для производства ядерной энергии в качестве реагента использовать нереализованные радиоактивные отходы ядерных реакторов, подлежащие утилизации, допустим, стронций-90, цезий-137 и др. В этом случае одновременно с производством водорода будет осуществляться производительная утилизация ядерных отходов, что отразится на еще большем снижении стоимости производимого водорода.

Другой важной задачей, решаемой данным изобретением, является снижение экологического загрязнения окружающей среды и активная утилизация ядерных отходов.

Предлагаемый способ включает следующие операции:

- 1) в ядерный реактор, предназначенный для низкотемпературного ядерного синтеза, загружают реагент (стронций-90);
- 2) подготавливают к работе ядерный реактор;
- 3) подготавливают к работе электролизёры;
- 4) включают в работу ядерный реактор и электролизёры.

В процессе работы ядерного реактора происходит облучение реагента нейтронами, производимыми основным генератором нейтронов, при этом осуществляется следующая цепочка ядерных реакций:



Итого: 18,68 МэВ.

На этом процесс радиационного захвата нейтронов не заканчивается, он может продолжаться многократно. Реагент при этом не расходуется и не теряет способность к радиационному захвату нейтронов. Цикл рабо-

ты реактора завершается после того, как ядром реагента (стронция-90) будет захвачено 40 медленных нейтронов, в результате чего оно превратится в стабильное ядро ксенона-130 в виде газообразного компонента, который будет откачан из активной зоны реактора. При этом будет выделена энергия порядка 314,3 МэВ. Таким образом, 1 кг реагента, состоящего только из ядер стронция-90, выделит энергию  $20,9 \cdot 10^{26}$  МэВ, что эквивалентно сжиганию 7,18 тыс. т бензина. Это в 4 раза больше той энергии, которую может выделить 1 кг урана-235.

Энергия выделяется за счет расхода нейтронов в процессе их радиационного захвата и изменения внутриядерных связей между нуклонами и преобразованием нуклонов. В приведенном примере израсходованы 2 нейтрона. Нейтроны производятся основным генератором нейтронов за счет облучения тяжелой воды гамма-квантами или другим способом. Таким образом, израсходовано 2 дейтерона. Захваченный нейтрон выделяет энергию порядка  $18,68/2 = 9,34$  МэВ. Чтобы разделить дейтерон на протон и нейтрон затрачивается энергия 2,2 МэВ, следовательно, каждый прореагировавший дейтерон отдает полезную ядерную энергию связи, равную  $9,34 - 2,2 = 7,14$  МэВ (1 МэВ соответствует  $2,83 \cdot 10^{-17}$  ккал).

Таким образом, израсходование 1 кг дейтерия может выделить  $8,2 \cdot 10^{10}$  ккал энергии, что в 4,1 раза больше чем 1 кг урана-235. Выделенная энергия ядерного синтеза улавливается теплоносителем и поступает в контур теплообмена, где превращается в электроэнергию с КПД 27%.

Наиболее перспективным способом получения водорода для энергетических целей являются различные методы разложения воды с использованием ядерной энергии низкотемпературного ядерного синтеза. Это особенно актуально, поскольку традиционные ископаемые горючие материалы не воспроизводятся, их запасы, цена, эксплуатационные и экологические показатели не могут конкурировать с электролизным водородом, полученным предлагаемым способом.

Установка для производства экологически чистого химического горючего, содержащая блок электролиза воды и получения водорода и кислорода, подключенный к источнику электрической энергии. Отличающаяся тем, что снабжена блоком преобразования энергии и блоком низкотемпературного ядерного синтеза с ядерным реактором, выполненным с возможностью осуществления реакций низкотемпературного ядерного синтеза и с возможностью использования в качестве энерговыделяющих элементов ядерных отходов, в том числе стронция-90. Установка включает основной генератор нейтронов, выполненный с возможностью производства нейтронов путем облучения тяжелой воды гамма-лучами, умножитель нейтронов и пусковой генератор нейтронов. Блок электролиза воды связан с блоком преобразования энергии и производства электрической энергии, источником которой он служит.

Установка предназначена, во-первых, для производства водорода и кислорода путем электролиза воды с использованием наиболее дешевой электроэнергии, производимой с помощью низкотемпературного ядерного синтеза. Такая установка обеспечена собственным независимым источником энергии и не требует расхода энергии извне. Во-вторых, задачей, которую решает установка, является улучшение экологической обстановки путем полезного расходования ядерных отходов, подлежащих утилизации и захоронению, и производство дешевых экологически чистых горючих материалов, потребность в которых с течением времени возрастает быстрыми темпами.

В ее состав входят (рис. 8.1):

- 1) блок низкотемпературного ядерного синтеза;
- 2) блок преобразования энергии и производства электроэнергии;
- 3) блок электролиза воды и получения водорода и кислорода.

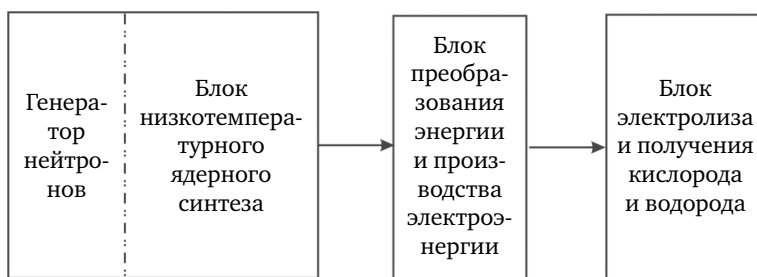


Рис. 8.1. Установка низкотемпературного ядерного синтеза

**Блок низкотемпературного ядерного синтеза** помещен в толстостенную бетонную конструкцию, служащую защитой обслуживающего персонала и окружающей среды от радиоактивных излучений, возникающих в активной зоне ядерного реактора. Он представляет собой ядерный реактор, предназначенный для выполнения реакций низкотемпературного ядерного синтеза, работает на тепловых нейтронах с графитовым замедлителем. Ядерным горючим (реагентом) служат отходы ядерных реакторов деления тяжелых атомных ядер, например, стронций-90. Состоит из следующих функциональных элементов (рис. 8.2):

- реагента 1, пластины которого равномерно распределены по рабочему объему активной зоны реактора;
- теплоносителя, циркулирующего по тонкостенным трубкам 6, трубки теплоносителя расположены в непосредственной близости от пластин реагента, по трубкам движется дистиллированная вода или жидкий металл, охлаждающие пластины реагента и отводящие тепловую энергию от реагента в теплообменник 7 (рис. 8.3);
- основного генератора нейтронов 3, представляющего собой систему тонких трубок, расположенных в промежутках между пластина-



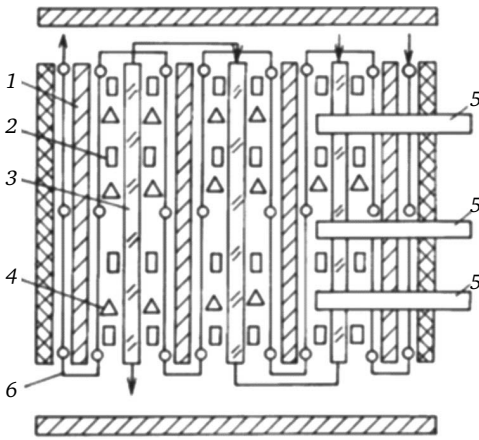


Рис. 8.2. Активная зона реактора:

1 — пластины исходного реагента (стронция-90); 2 — пластины замедлителя нейтронов (из графита); 3 — основной генератор нейтронов на тяжелой воде; 4 — умножитель нейтронов на тяжелых делящихся ядрах; 5 — пусковой генератор нейтронов; 6 — трубки, по которым циркулирует теплоноситель

представляющего собой графитовый наполнитель всего свободного пространства активной зоны реактора. Служит для уменьшения скорости быстрых нейтронов и увеличения сечения захвата нейтронов ядрами реагента;

- пускового генератора нейтронов 5, представляющего собой радиоактивный изотоп с большим периодом полураспада. Он устанавливается в специальные гнезда, расположенные в активной зоне в момент включения и инициирует начальный поток нейтронов, достаточный для возбуждения реакции синтеза и включения в работу основного генератора нейтронов.

Функционально работа реактора заключается в том, что пластины исходного реагента облучаются потоком медленных нейтронов, излучаемых основным генератором нейтронов. Нейтроны излучаются тяжелой водой при облучении ее потоком гамма-лучей, исходящих от исходного реагента в процессе осуществления реакций радиационного захвата нейтронов и преобразования нейтронов в протоны. Образованные генератором нейтроны прежде чем прореагировать проходят через умножитель и замедлитель, где увеличивается поток нейтронов до требуемой плотности и замедляется скорость нейтронов до требуемой энергии, соответствующей максимальному сечению радиационного захвата нейтронов в ядерном реакторе ядром исходного реагента.

ми реагента, по трубкам циркулирует тяжелая вода. В результате облучения гамма-лучами, исходящими от реагента, тяжелая вода излучает нейтроны, которые захватываются ядрами реагента, и происходит экзотермическая реакция синтеза;

- умножителя нейтронов 4, представляющего собой тяжелые атомные ядра, способные при захвате нейтронов делиться с излучением большего числа нейтронов, чем было захвачено. Делящиеся элементы умножителя располагаются между трубками основного генератора нейтронов и пластинами реагента и обеспечивают поддержание заданного уровня отдаваемой мощности реагентом или увеличение ее до необходимого значения;

- замедлителя нейтронов 2, пред-

Под действием радиационного захвата нейтронов в ядерном реакторе происходит низкотемпературный ядерный синтез нуклонов в ядрах реагента, состоящий в том, что избыточная часть накопившихся нейтронов превращается в протоны и объединяется с остальными захваченными нейтронами, образуя ядра дейтерия или гелия, которые затем сливаются с исходным ядром реагента. Происходит выделение энергии за счет увеличения энергии связи между нуклонами. В процессе реакции синтеза расходуются только нейтроны, служащие строительным материалом для увеличения состава ядра, но новые поколения нейтронов, как это происходит при делении тяжелых ядер, не рождаются. Поставлять нейтроны вынуждены с помощью специального (основного) генератора нейтронов. Одним из используемых в настоящее время типов генераторов нейтронов является генератор, состоящий из системы узких трубок, пронизывающих активную зону реактора, заполненных тяжелой водой.

В исходном состоянии тяжелая вода выведена из активной зоны и хранится в специальном резервуаре. В рабочем состоянии тяжелая вода прокачивается по трубкам, облучается потоком гамма-лучей, возникающих в процессе реакции синтеза, и производит новые поколения нейтронов для продолжения реакции синтеза. Нейтроны поступают в реагент, возбуждают реакции синтеза и принимают в них активное участие. Управление мощностью выделяемой энергии производят изменением количества тяжелой воды, находящейся в активной зоне. Чтобы уменьшить мощность, следует вытеснить из трубок часть тяжелой воды. В этом случае произойдет сокращение потока нейтронов и уменьшение актов синтеза ядер в единицу времени. Для увеличения мощности достаточно увеличить количество тяжелой воды в активной зоне. Для уменьшения непроизводительных расходов нейтронов активная зона ограничена отражателями нейтронов, в качестве которых используются графитовые пластины и графитовая обложка. Энергия, производимая такой установкой низкотемпературного ядерного синтеза, дешевле энергии, производимой современными АЭС, в 400–700 раз.

**Блок преобразования энергии и производства электроэнергии** представляет собой типовой контур преобразования ядерной энергии в электрическую с КПД порядка 27%. (рис. 8.3). Он включает в свой состав: 1 — генератор, теплообменник 7, циркуляционные насосы 8, турбогенератор 9, конденсатор 10, питательный насос 11, обслуживающие и вспомогательные системы.

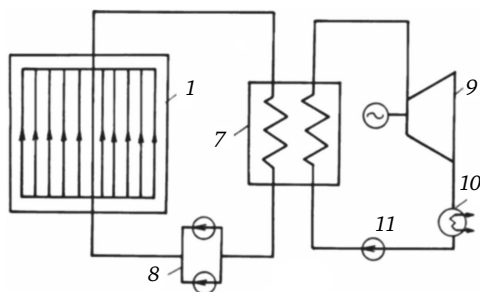


Рис. 8.3. Блок преобразования энергии и производства электроэнергии

**Блок электролиза воды и получения водорода и кислорода** содержит ряд электролизёров наиболее перспективных известных конструкций и вновь разрабатываемых типов и конструкций, а также емкости и средства для хранения, сжатия, сжижения газов и гидрирования металлов.

Наиболее простым и широко используемым в промышленности известным способом получения водорода является электролиз воды в щелочной среде (25–30% KOH). Этот процесс энергоемок: для получения 1 м<sup>3</sup> водорода и 0,5 м<sup>3</sup> кислорода требуется затратить около 6 кВт·ч электроэнергии. Поэтому для снижения стоимости производимого водорода следует использовать дешевую электроэнергию, производимую за счет низкотемпературного ядерного синтеза.

Еще до пропускания тока щелочь как сильный электролит диссоциирует на ионы KOH ⇌ K<sup>+</sup> + OH<sup>-</sup>. Вода как слабый электролит частично диссоциирует на ионы H<sub>2</sub>O ⇌ H<sup>+</sup> + OH<sup>-</sup>. Таким образом, в растворе содержатся ионы K<sup>+</sup>; H<sup>+</sup>; OH<sup>-</sup> (рис. 8.4).

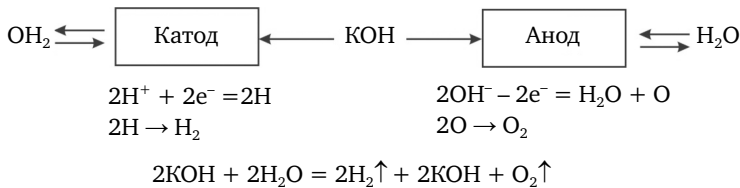


Рис. 8.4. Схема электролиза раствора KOH с угольными (нерастворимыми) электродами

При пропускании тока к катоду подходят ионы K<sup>+</sup> и H<sup>+</sup>, к аноду — ионы OH<sup>-</sup>. На катоде будут разряжаться ионы водорода (ионы K<sup>+</sup> труднее разряжаются).

На аноде отдача электронов происходит у ионов OH<sup>-</sup>. В результате электролиза на катоде выделяется водород, а в растворе возле катода ионы OH<sup>-</sup> с ионами K<sup>+</sup> образуют KOH.

На аноде выделяется кислород, а в растворе возле анода ионы H<sup>+</sup> с ионами OH<sup>-</sup> образуют H<sub>2</sub>O. При перемешивании электролита щелочь растворяется в воде, диссоциирует и процесс возобновляется. В таком случае продуктами электролиза будут только водород и кислород, т. е. будет происходить разложение воды электрическим током.

Необходимость замены традиционных видов моторного топлива на более перспективные подтверждается следующими известными положениями.

Традиционными видами топлива, интенсивно используемыми в настоящее время, подаренными природой человечеству, являются ископаемые природные органические вещества: нефть, уголь, природный газ. Несмотря на высокие эксплуатационные качества, большую энергоемкость и от-

носителем низкую стоимость имеется ряд аспектов, требующих неотложного решения. Основными из них являются:

1. Ограниченные запасы природных горючих материалов, количество которых неуклонно сокращается. Опубликованные оценки подтверждают, что ресурсы минерального топлива ограничены, и при сохранении существующих темпов развития энергетики они будут исчерпаны на протяжении ближайших десятилетий (нефть, горючие газы) или столетий (уголь).

2. Экологическое загрязнение окружающей среды от использования традиционных топлив слишком велико и наносит вред живым организмам и растениям. Действующий с марта 1992 г. закон об охране окружающей среды не стабилизировал экологическую ситуацию в стране. Более того, она продолжает ухудшаться. Некоторые города оказались в критическом, другие в катастрофическом положении. Самым экологически неблагополучным городом страны последних лет признан Норильск, где основным источником загрязнения окружающей среды является металлургический комбинат. Атмосфера города, а также почвы и окрестные водоемы перенасыщены вредными соединениями, в которые входят никель, медь, селен, кобальт, свинец и другие металлы. Воздушное загрязнение здесь усиливается также за счет высокой концентрации диоксида серы и окислов азота. В числе самых грязных городов не только России, но и всего мира вот уже долгое время остается и Москва. Основная часть вредных веществ в ее атмосферу поступает за счет автомобильных выхлопов, в составе которых — формальдегид, бензопирен и угарный газ. Свою долю в отравлении московской атмосферы вносят и промышленные предприятия, и в первую очередь нефтеперерабатывающий завод в Капотне. В списке 35 самых загрязненных населенных пунктов нашей страны находятся также Санкт-Петербург, Волгоград, Нижний Новгород, Чапаевск, Новокуйбышевск, Томск, Нижний Тагил, Липецк, Магнитогорск и ряд других городов. Содержание вредных примесей в воздухе здесь превышает предельно допустимые нормы в десятки раз, что, естественно, укорачивает жизнь и сильно подрывает здоровье его жителей. И на конференции ООН по окружающей среде, состоявшейся в Рио-де-Жанейро, Россия была названа в группе самых неблагополучных в экологическом отношении стран на планете.

3. Выбор альтернативного экологически чистого горючего. Для замены традиционного вида топлива следует подобрать из всех существующих такое альтернативное топливо, которое удовлетворяло бы в большей мере ряду требований:

- по своим запасам должно многократно превышать запасы традиционных видов топлива;
- месторождения запасов топлива должны быть легко доступны для их массового использования и приближены к месту использования;

- стоимость топлива не должна заметно превышать стоимость традиционных видов топлива;
- экологические показатели должны существенно превосходить аналогичные показатели традиционных видов топлива (автомобиль или электромобиль не должны загрязнять окружающую среду);
- иметь высокие технические и эксплуатационные свойства, не уступающие аналогичным для традиционных топлив.

Среди известных альтернативных топлив наиболее подходящим видом топлива является водород, полученный электролизом воды, используя наиболее дешевую энергию низкотемпературного ядерного синтеза.

*«Водород является экологически чистым энергоносителем и может производиться за счет возобновляемых источников энергии. Типичными примерами применения новых водородных технологий являются автотранспорт с низким или нулевым выбросом вредных веществ в атмосферу и жилые дома с автономным энергообеспечением»* (Журнал «Энергия», 1996, 5, с. 19. «Водород-96»).

*«Перспективен электролиз воды для получения водорода, но при наличии дешевой электроэнергии. Этим способом производят некоторое количество водорода в Норвегии и АРЕ, ведутся работы во Франции по получению водорода различными методами с использованием дешевой электроэнергии АЭС в ночное время»* (Г. А. Терентьев, В. М. Тюков, Ф. В. Смаль. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. 1989, с. 223).

*«Интерес к водороду как моторному топливу обусловлен его высокими энергетическими показателями, отсутствием вредных веществ в продуктах сгорания и, главное — практически неограниченной сырьевой базой. Водород характеризуется наиболее высокими энергомассовыми показателями среди химических топлив»* (там же, с. 176).

Заявленный способ позволяет снизить стоимость электролизного водорода в 400–700 раз, что делает водород дополнительно к его известным достоинствам еще и наиболее экономически выгодным из всех имеющихся видов современных топлив.

### **Формула изобретения**

1. Способ производства экологически чистого химического горючего путем электролиза воды с получением водорода и кислорода, отличающийся тем, что осуществляют реакции низкотемпературного ядерного синтеза в ядерном реакторе, в качестве исходного реагента используют радиоактивные отходы ядерных реакторов и дейтерий для производства нейтронов, ядерный синтез осуществляют путем радиационного захвата реагентом медленных нейтронов, выделяемую ядерную энергию преобразуют в электрическую, которую используют для осуществления электролиза воды.

2. Установка для производства экологически чистого химического го-

рючего, содержащая блок электролиза воды и получения водорода и кислорода, подключенный к источнику электрической энергии, отличающаяся тем, что снабжена блоком преобразования энергии и получения электрической энергии и блоком низкотемпературного ядерного синтеза с ядерным реактором, выполненным с возможностью осуществления реакций низкотемпературного ядерного синтеза и с возможностью использования в качестве энерговыделяющих элементов ядерных отходов, в том числе стронция-90, и включающим основной генератор нейтронов, выполненный с возможностью производства нейтронов путем облучения тяжелой воды гамма-лучами, умножитель нейтронов и пусковой генератор нейтронов, причем блок электролиза воды связан с блоком преобразования энергии и производства электрической энергии, источником которой служит последний.

### 8.3. Фотогальванические процессы

**Солнечный электрический водород.** Различные научно-исследовательские работы демонстрируют как функции солнечных элементов и элементов электролиза могут быть объединены в одном устройстве, используя один или более фотоэлектродов или фотокатализаторов. Свет, падающий на фотоэлектрод, производит электрический потенциал (напряжение) на поверхности полупроводника и электролита. Этот потенциал способствует разложению воды на водород и кислород. Газы произведены вместе, поэтому необходимо некоторое средство разделения.

Длины волн сильного ультрафиолетового света имеют достаточно энергии для распада воды. Этот процесс неэффективен, потому что ультрафиолетовый свет составляет только 8% солнечного излучения.

**Фотоэлектроды.** Определенные химические элементы могут преобразовать более широкий спектр света в электролитическую энергию, что делает использование солнечного спектра более эффективным. Подходящие материалы содержат немного солей, органические красители, полупроводники, поглощающие более широкий спектр света (ширина запрещенной зоны должна быть более чем 2.3 электронные вольт). Некоторые разновидности морских водорослей обладают этими свойствами. Материалы фотоэлектрода вообще могут иметь одну или более из следующих проблем:

- фотокоррозия, вызывающая разложение из-за легкого повреждения электрода;
- несоответствие температур: фотогальванические процессы более эффективны при низкой температуре, электролитические реакции протекают при более высокой температуре;

- несоответствие напряжений: выходное напряжение фотоэлектрода (1,5 Вт) не соответствует напряжению, необходимому для электролиза (2,2 Вт).

Эти проблемы принудили некоторых исследователей сделать заключение, что использование множества солнечных элементов другими путями предпочтительно. Другие исследователи продолжают работать, оценив достоинства единственного процесса, который преобразует свет непосредственно в водородное топливо. В поиске веществ на роль фотоэлектродов, оксиды серы и фосфора определенно были исключены.

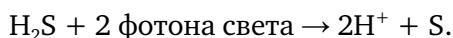
Смешивание оксида железа и диоксида титана с кремнием производит фотоанод. Оксид железа и оксид магния включает в себя фотокатод. Два электрода помещены в электролите с водой, при наличии света производится электролитический водород и кислород. Реакция обычно не нуждается во входном напряжении. Однако, что технически возможно, не обязательно экономично. Дешевый доступный процесс производства диоксида титана теперь не доступен.

В ходе экспериментов сравнили дешевый цинк и сульфид кадмия с другими веществами в виде пленки на диоксиде силикона с большим количеством платины, смешанной с сульфидом кадмия. Заключение было таким:

- эффективное фотографирование помогло произвести водород без участия благородного металлического катализатора;
- вещество для поверхностного покрытия цинка и сульфида кадмия не на столько важный элемент;
- необходим тесный контакт цинкового сульфида и кадмия.

В других экспериментах 1 гр (0,002 фунта) сульфида цинка, помещенного в электролит произвел 16 л водорода через 35 ч без заметной дезактивации фотокатализатора. При этом не было никакой потребности в платине, чтобы усилить перенос заряда.

**Электролиз сульфида водорода.** Некоторые вещества, содержащие водород легче подвергаются электролизу, чем вода. Например, сульфид водорода — производная природного газа, угля, и переработки нефти. На электролиз сульфида водорода требуется только 1/7 количества энергии, расходуемой на электролиз воды. Энергия, требуемая для распада сульфида водорода достаточно низкая, поэтому можно использовать свет как источник энергии для распада молекулы

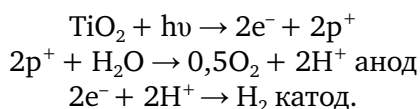


В одном эксперименте, определенный диапазон длины волны стимулирует сульфид кадмия, чтобы выпустить электрон, который способствует распаду водородного сульфида. Диоксид рубидия (0,1 % по массе) был смешан с сульфидом кадмия, чтобы сформировать катализатор. Катализатор

был растворен в 0,1 молях раствора сульфида натрия, освещенного галогенной лампой на 250 Вт, светящей через 15 см водяного столба для того, чтобы удалить инфракрасную часть спектра. В результате эксперимента получим следующее: предотвращает нагрев раствора; 25 мл раствора произвело 2,3 мл водорода за час; 90% сульфида водорода было превращено в водород. Удвоение количества диоксида рублидия увеличило производство водорода на 50%. При этом платина как электрический катализатор не понадобилась. Другие экспериментаторы, используя те же самые химические элементы обнаружили термодинамический коэффициент полезного действия равный 2,85%. Экспериментаторы сделали вывод:

*Кроме его важности для исследования солнечной энергии процесс мог бы использоваться в промышленных процедурах, где H<sub>2</sub>S или сульфиды сформированы как ненужный продукт, быстрое удаление которого и преобразование в топливо желательны. Кроме того, эти системы интригующим способом подражают функции фотосинтетических бактерий, которые часто используют сульфиды как электронные доноры для сокращения воды к водороду.*

**Фотохимическое производство водорода.** Получение водорода по методу фотолиза основано на способности поглощенного кванта света разрывать водородные связи в молекуле воды или других водородосодержащих соединениях [10]:



Эффективность его незначительна и в зависимости от вида ячейки составляет от 3 до 11%. Оценить экономические показатели этого метода пока довольно трудно.

Британская компания Hydrogen Solar разработала фотоэлектрохимический метод разложения воды Tandem Cell, при котором разложение воды на водород и кислород происходит в тонком слое между двумя фотоэлектродами, преобразующими солнечную энергию в электрический ток. КПД процесса авторы оценивают в 8%. Опытная установка фотохимического разложения воды площадью около 65 см<sup>3</sup>, работающая в лаборатории Hydrogen Solar, вырабатывает несколько килограммов водорода в день.

По оценке ученых, если КПД системы довести до 10% и покрыть такими панелями крышу гаража, то можно вырабатывать водород, достаточный для годового пробега автомобиля на топливных элементах в 17 тысяч километров.

**Системы солнечной энергии.** Texas Instruments имеют одну из немногих коммерческих фотоэлектрохимических программ. Бромистоводородная



кислота используются как фотоэлектрод с электролитом из серной кислоты и воды. Фотоэлектрод покрыт микросферами 0,25–0,40 мм в диаметре. Микросферы — фотоаноды и фотокатоды. Фотоаноды выделяют бром, в то время как водород появляется на фотокатодах. Электролит находится между двумя стеклянными листами; один лист имеет токопроводящее покрытие. Солнечный свет попадает через прозрачную сторону и производит водород с 7%-ым КПД.

Главный покупатель — Southern California Edison electric company (электрическая компания Эдисона в Южной Калифорнии). Панели могли располагаться на крышах домов. Однокиловаттовые панели могли вырабатывать 1/3 электричества, требуемого дому. Но неожиданно низкая цена энергии сократила спрос.

*Итог:* фотоэлектроды используют или полупроводниковый порошок, или сенсibilизатор, которые преобразовывают электроны водных молекул. По сравнению с электролизом при участии солнечного элемента, фотохимическое производство смешивает водород и кислород, разъедает электроды, и имеет низкую эффективность [11].

#### 8.4. Способ использования вещества мантии Земли для получения водорода

Еще в 80-х гг. XX в. доктор геолого-минералогических наук Ларин В. Н. предложил извлекать водород из глубин Земли, и для многих геологов это выглядело надуманной сенсацией, не имеющей под собой никаких оснований. В самом деле, откуда быть водороду в каменной тверди планеты? Однако высокое академическое совещание, состоявшееся в Геологическом институте в 1989 г., после доклада В. Н. Ларина и его обсуждения единодушно постановило: «Рекомендовать сверхглубокое бурение (до 10–12 км) в области современного рифтогенеза, поскольку таковое в пределах рифтовых зон вплоть до настоящего времени не проводилось. Предложить в качестве объекта Тункинскую впадину, где <...> бурение может иметь исключительно большое значение для энергетики и экологии, так как позволит оценить и проверить научно обоснованную возможность обнаружения принципиально нового и экологически чистого энергоресурса (тепла и водорода), который сможет составить конкуренцию традиционным энергетическим источникам <...> Для уточнения конкретного места бурения рекомендовать в сжатые сроки провести дополнительные геофизические исследования в Тункинской и Муя-Куандинской рифтогенных впадинах (гравиметрические, сейсмические, а также глубинное электромагнитное зондирование)».

Но вернемся к фактам, которые убеждают. В районе Тункинской впадины глубинное электромагнитное зондирование выявило на глубине 5–6 км обширную зону с аномально высокой электропроводностью, вещественная природа которой так и не была выяснена. Аналогичные зоны с аномальной проводимостью отмечаются во всех молодых рифтогенных структурах планеты, но на несколько больших глубинах, до 15–20 км. Геофизические исследования показали, что такие зоны снизу подпираются диапирами (выступами, рис. 8.5) аномальной мантии (с пониженными плотностью и скоростями сейсмических волн). Это глубинное аномальное вещество мантии Земли внедряется в виде языков в земную кору и подходит достаточно близко к поверхности.

Но в чем причина аномально высокой электропроводности? По мнению В. Н. Ларина, эти языки заполнены бескислородными соединениями и сплавами на основе кремния, магния и железа

(в пропорции 3:2:1), которые имеют именно такой, полупроводниковый характер проводимости. И если это предположение подтвердится бурением, то тогда мы действительно получим возможность качать из Земли «горячий» водород, ведь кремний и магний при взаимодействии с водой выделяют водород и тепло. Для этого достаточно пробурить две скважины — по одной закачивать воду, а по другой — отводить нужный нам газ (рис. 8.6). Вот вам и месторождение водорода и тепла в придачу. Таким способом можно будет производить водород, не только затрачивая минимум энергии, но еще и получать ее попутно и в больших количествах.

По предварительным оценкам, если прогноз о наличии бескислородных сплавов на доступных глубинах подтвердится, то с 10 км<sup>2</sup> территории мож-

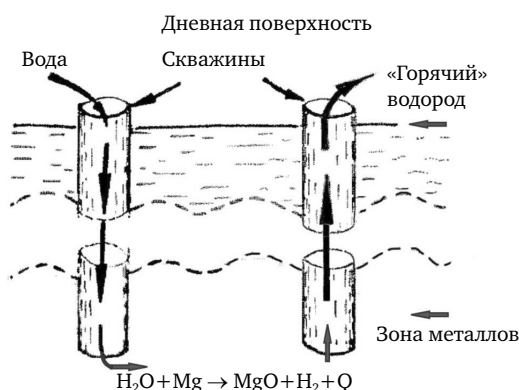


Рис. 8.5. Принципиальная схема получения «горячего» водорода

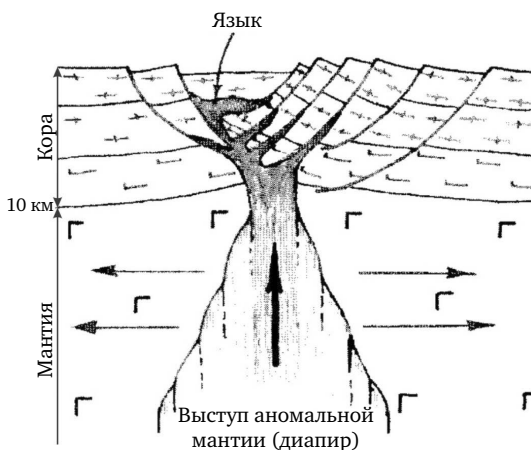


Рис. 8.6. Глубинное строение рифтовой зоны (поперечный разрез)

но будет получать по 100–200 млн т у. т. в год, и что в перспективе ожидаемый энергоноситель может оказаться конкурентоспособным на энергетическом рынке [17].

Задача, на решение которой направлено данное изобретение, состоит в повышении экономической эффективности водородной энергетики.

Технический результат, который может быть получен при реализации изобретения, заключается в снижении удельных энергетических затрат на производство водорода.

Указанный технический результат достигается тем, что согласно изобретению после входа скважины в мантийное вещество в нем формируют реакционную полость, выход водорода регулируют путем изменения объема находящейся в реакционной полости воды, при этом поверхность реакционной полости, участвующую в реакции, периодически регенерируют.

Данная совокупность признаков обеспечивает получение технического результата во всех случаях, на которые распространяется и спрашиваемый объем правовой охраны. В частности, формирование реакционной полости позволяет получить большую поверхность контакта воды с веществом мантии и, соответственно, увеличить выход водорода. Периодическая регенерация поверхности, участвующей в реакции, позволяет поддерживать эту поверхность в реакционном состоянии и даже увеличивать ее. Таким образом, при постоянных затратах энергии на бурение скважин, подачу воды и т. д. увеличивается выход водорода, что приводит к снижению удельных затрат энергии на его производство.

В частных случаях (в конкретных формах выполнения или при особых условиях его использования) изобретение характеризуется следующей совокупностью признаков:

- бурение скважин осуществляют с помощью турбобуров;
- бурят дополнительную скважину и реакционную полость образуют путем сбойки основной и дополнительной скважин;
- реакционную полость образуют путем расширения основной и/или дополнительной скважин;
- расширение скважины осуществляют посредством взрыва зарядов взрывчатых веществ;
- регенерацию реакционной поверхности осуществляют высоконапорным потоком воды;
- высоконапорный поток воды подают через форсунки, размещенные в реакционной полости, на дистанционно управляемых манипуляторах;
- в скважине или на выходе устанавливают сепаратор для разделения образующегося газообразного водорода и паров воды;
- тепловую энергию, выделяющуюся при производстве работ по получению водорода, утилизируют.

Способ использования вещества мантии Земли для получения водорода осуществляют следующим образом [34].

Современными методами поиска и разведки, например аэрокосмическими, производят поиск континентальных или океанических зон рифтогенеза. Из найденных зон выделяют зоны рифтогенеза, подпертые диапирами аномальной мантии. Наиболее перспективными с точки зрения постановки работ по получению водорода являются зоны рифтогенеза, подпертые диапирами аномальной мантии, у которых языки вещества мантии выходят в земную кору на глубину 3–5 км (до 10 км). По мере совершенствования методов глубокого и сверхглубокого бурения эта глубина может увеличиваться.

Установив перспективные зоны, подготавливают площадки для размещения бурового оборудования. Если перспективной признана океаническая зона рифтогенеза, то производят установку морской или океанической буровой платформы. После окончания подготовительных работ производят бурение, по меньшей мере, одной скважины в вещество мантии, основанной на технологии вращательного бурения, например, с помощью турбобуров или роторного бурения.

Спуск-подъем бурильной колонны осуществляют с удлинёнными «свечами» при максимальной механизации и автоматизации процесса. Удаление буровой мелочи осуществляют циркуляцией бурового раствора. В качестве буровых растворов в начале сооружения скважины используют растворы на водной основе. С повышением температуры в скважине от 240 до 300 °С переходят на нефтеэмульсионные, а свыше 300 °С применяют растворы на нефтяной основе. В зависимости от конкретных геолого-технических условий используют бурильные головки как шарошечного, так и истирающего типа.

По мере углубления сохранение устойчивости горных пород на стенках ствола скважины в условиях проявления горного и пластового давления достигают поддержанием необходимого противодействия столба бурового раствора и его качества, а при встрече пластов с низким давлением ствол скважины обсаживают колонной обсадных труб, которую цементируют.

Наиболее предпочтительным следует считать вариант, при котором бурятся несколько скважин — основная и дополнительные. Одну можно использовать для подачи воды, т. е. в качестве закачной, остальные — в качестве выдачных, по которым на поверхность отводится полученный в результате реакции водород. После входа скважин в вещество мантии стволы освобождают от бурового раствора и формируют реакционную полость, в которой собственно и будет происходить реакция интерметаллидов, содержащихся в веществе мантии, с водой и выделение водорода. Использование соленой (например, морской) воды повышает кинетику реакции.

Реакционная полость может быть образована путем сбойки закачной и выдачной скважин или путем расширения закачной и/или выдачной скважин. В свою очередь расширение скважины может быть осуществлено посредством взрыва зарядов взрывчатых веществ, спущенных на забой скважины.

Производят монтаж устьевого оборудования, предназначенного для герметизации устьев закачной и выдачной скважин, распределения и регулирования потока закачиваемой в них воды и получаемого водорода, соответственно. В качестве устьевого устанавливают трубные головки, колонные головки, запорную и регулируемую арматуру.

Затем осуществляют подачу воды в оборудованную закачную скважину и вывод на поверхность через оборудованную выдачную скважину газообразного водорода, образующегося в результате реакции интерметаллических соединений с водой. Для направления выделяющегося водорода в выдачную скважину ствол закачной скважины герметизируют у устья и перед ее сопряжением с реакционной полостью, обеспечивая только пропуск воды. В этом случае образующийся в результате реакции водород будет выходить через открытую с поверхности выдачную скважину.

Возможно также и оборудование выдачной скважины вакуумными установками, создающими разрежение в стволе выдачной скважины. В этом случае образующийся в результате реакции водород будет выходить в выдачную скважину под действием создаваемого разрежения.

Количество получаемого водорода (выход водорода) регулируют путем изменения объема подаваемой в скважину воды и, соответственно этому, изменения объема воды, находящейся в реакционной полости. Такое регулирование может быть осуществлено, например, уменьшением проходного сечения запорной арматуры на устье выдачной скважины и уменьшением потока возвращаемой воды при постоянной ее подаче в закачную скважину. В результате количество воды, вступающей в реакцию с интерметаллидами, в реакционной полости увеличивается и, соответственно, увеличивается выход водорода.

О необходимости увеличения или уменьшения количества находящейся в реакционной полости воды судят по количеству выделяющегося водорода.

По мере окисления интерметаллических соединений, находящихся на поверхности реакционной полости, поверхность, участвующую в реакции, периодически регенерируют. Регенерацию указанной поверхности осуществляют, например, высоконапорным потоком воды. Высоконапорный поток воды подают через форсунки, размещенные в реакционной полости, на дистанционно управляемых манипуляторах. Продукты окисления потоком подаваемой воды удаляют из реакционной полости и выводят на поверхность, где производят их утилизацию.

Для разделения образующегося газообразного водорода и паров воды в выданной скважине может быть установлен сепаратор.

Тепловую энергию, выделяющуюся при производстве работ по получению водорода, утилизируют любыми известными способами, например используют для производства электроэнергии или для обогрева промышленных и гражданских зданий.

## 8.5. Перспективы развития водородной энергетики на основе алюминия

Углеводородная энергетика остается в настоящее время приоритетной для мобильных, децентрализованных и автономных энергетических систем. С учетом ограниченности и невозполнимости природных ресурсов, сложной системы эксплуатации и экологических последствий применения углеводородных горючих актуальным является поиск новых альтернативных химических источников энергии. Разработка алюмоводородных технологий [37], основанных на получении водорода сжиганием алюминия в водных средах, и их применение в энергетических установках ликвидирует монополизм углеводородной энергетики.

По распространенности в природе алюминий занимает первое место среди металлов, содержание его в земной коре составляет 8,8%. В свободном состоянии в природе не встречается из-за высокой химической активности. Главная масса алюминия сосредоточена в бокситах, нефелинах, алунитах, каолинах и др. Наиболее ценная алюминиевая руда — бокситы, где содержится около 50% оксида алюминия. Производство алюминия заключается в получении оксида алюминия из алюминиевых руд щелочным, кислотным, электротермическим или комбинированными способами; получении первичного металла электролизом оксида алюминия (в специальных аппаратах — электролизёрах), растворенного в расплавленном криолите при температуре около 950 °С, и рафинировании этого металла. Особый интерес представляет порошкообразный алюминий, который получают в промышленных масштабах для различных областей промышленности, в том числе как компонент в производстве пиротехнических составов, взрывчатых веществ и топлив. Основным промышленным способом производства алюминиевого порошка является распыление жидкого алюминия.

Алюминий относится к химически активным металлам. На воздухе быстро покрывается тонкой и прочной окисной пленкой толщиной 50–100 мк, защищающей от дальнейшего окисления. Известно, что вода является окислителем для многих металлов. Особый интерес представляет реакция окисления водой алюминия, так как при этом выделяется большое количество водорода и тепловой энергии. Однако плотная оксидная пленка, образующаяся при контакте алюминия с кислородом воздуха, создает диффузионные ограничения окислению алюминия даже в кипящей воде.

Алюмоводородные технологии являются составной частью алюмоэнергетики и относятся к числу процессов с использованием возобновляемых ресурсов [35]. Замкнутый цикл движения алюминия как энергоносителя включает сжигание его в водных средах до оксида алюминия, восстановле-

ние оксида алюминия электролизом до алюминия и последующее его использование в качестве энергоносителя.

Алюмоводородные технологии являются базовыми для водородной энергетики, в том числе и для энергоустановок на топливных элементах. Применение алюмоводородных генераторов позволит решить проблему безопасности перспективных транспортных средств и подвижных агрегатов с водородными двигательными установками, работающими в настоящее время на жидком (криогенном) водороде. Алюминий является безопасным и эффективным источником получения водорода (один объем алюминия обеспечивает при сжигании в воде генерацию 3243 объемов водорода, а один объем жидкого водорода при газификации образует 850 объемов водорода) [36].

Применение алюминия как энергетического сырья обеспечивает возможность создания необходимых энергоресурсов, так как для его транспортировки и хранения не требуются специальные емкости и заправочные системы. Срок хранения алюминия практически неограничен, и его запасы по сравнению с углеводородными горючими являются компактными (плотность алюминия —  $2,7 \text{ г/см}^3$ ; плотность углеводородных горючих — менее  $0,8 \text{ г/см}^3$ ).

Известные в настоящее время способы [35, 36] не обеспечивают полноту окисления алюминия водой и являются малопродуктивными. Кроме того, в этих способах используются дорогостоящие порошки ультрадисперсного алюминия [36] и активированные сплавы алюминия [35]. Применение последних для получения водорода является неперспективным, так как это энергозатратные и малопродуктивные способы (электровзрыв, плазменная переконденсация и др.), а их стоимость в 100 и более раз выше стоимости порошков алюминия, выпускаемых в промышленных масштабах.

Для обеспечения сжигания алюминия в водных средах предлагается увеличить скорость диффузии за счет активации порошков алюминия путем замены прочной оксидной пленки на полимерную водорастворимую и применения воды при около- или сверхкритических параметрах ее состояния [37].

Активация алюминия может осуществляться, например, по технологии предварительного измельчения выпускаемых промышленностью алюминиевых порошков в среде водорастворимого полимера, что обеспечивает замену оксидной пленки на полимерную, которая хорошо защищает поверхность алюминия от окисления кислородом воздуха.

При попадании водной среды на полимерную пленку последняя растворяется, и частицы алюминия вступают в реакцию с молекулами воды.

При сверхкритических параметрах воды ( $T_{кр} = 374,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $p_{кр} = 217,6 \text{ атм.}$ ) почти полностью разрушаются водородные связи, и молекулы воды не проявляют взаимосвязанности [36]. Из полярной жидкости вода превращается

в неполярную среду, скорость диффузии возрастает, а ее окисляющая способность резко увеличивается. В водных средах при сверхкритических параметрах состояния коэффициенты диффузии очень велики, а сопротивление массообмену практически отсутствует, так что обеспечиваются все условия для быстрого протекания реакций.

Скорость реакций при сверхкритических параметрах водной среды соизмерима со скоростью аналогичных реакций при горении топлив на воздухе с температурой во фронте горения 2300–2800 К. При высокотемпературном сжигании в воздушных средах образуется большое количество оксидов азота, требующих нейтрализации, в то время как при сжигании в водных средах оксиды азота практически не образуются.

Предложенные два направления активации процесса окисления алюминия в водных средах могут быть реализованы как независимо, так и совместно. Например, химически пассивные, даже в кипящей воде, алюминиевые порошки будут окисляться с высокой скоростью в сверхкритической воде, а повышение реакционной активности алюминия за счет замены диффузионно-непроницаемой оксидной пленки на водорастворимую полимерную позволит обеспечить достаточно высокую степень его окисления при докритических параметрах состояния воды. При этом, чем выше активность алюминия, тем ниже давление и температура процесса по сравнению со сверхкритическими параметрами воды. Однако максимальная скорость и полнота окисления порошков алюминия обеспечиваются при сверхкритических параметрах состояния водной среды.

В результате теоретических расчетов и экспериментальных исследований установлено, что при сжигании 1 кг алюминия в водных средах, наряду с тепловой энергией (17,1 МДж), выделяется большое количество высокочистого водорода (1,2 нм<sup>3</sup>) и образуется более 2 кг особо чистых нанокристаллических оксидов и гидроксидов алюминия, рыночная стоимость которых — 50–400 долл. за кг.

В настоящее время разработаны и испытаны лабораторная и макетная установки для сжигания алюминия в водных средах, отработана опытная технология активации алюминия, наработана опытная партия активированного алюминия, проведены испытания по сжиганию алюминия в водных средах при до- и сверхкритических параметрах, подтверждающие высокую скорость (более 30 г Al/с) и полноту сгорания (более 99,9%).

Таким образом, сжигание алюминия в до- и сверхкритических водных средах можно рассматривать как эффективный способ получения водорода, обеспечивающий выделение в качестве побочных продуктов особо чистых нанокристаллических гидроксидов (бемит) и оксидов (корунд) алюминия. При условии реализации оксидов и гидроксидов алюминия как товарных продуктов сама технология получения водорода становится не затратной, а высокоэффективной.



---

## 9. Сравнение различных методов производства водорода

---

**В**одород может быть получен различными путями с использованием широкого диапазона технологий. Некоторые из них используют установившиеся промышленные процессы, тогда как другие находятся еще на лабораторной стадии; некоторые могут вводиться немедленно для развития системы снабжения водородом; другие требуют значительных исследований и развития (табл. 9.1, 9.2).

Таблица 9.1

Сравнение методов получения водорода

| Технология получения водорода            | Преимущества  | Недостатки  |
|--|---|---|
| Электролиз                               | Устоявшаяся и коммерчески доступная технология; детально изученный промышленный процесс, допускающий модуляцию; высокая чистота конечного продукта, удобен для получения водорода от воспроизводимых энергоисточников, компенсирует периодическую природу некоторых источников возобновляемой энергии | Высокие энергозатраты, конкуренция с прямым использованием возобновляемой электроэнергетики   |
| Конверсия углеводов                      | Хорошо изучен в больших масштабах; широко распространенный процесс; низкая стоимость продукта   | Маломасштабные устройства не имеют коммерческого значения; конечный продукт содержит примеси, требуется газоочистка; выбросы двуокси углерода; первичное топливо может использоваться непосредственно |
| Газификация твердого горючего и биомассы | Технология хорошо изучена для тяжелых углеводов в больших масштабах; может быть использована для твердых и жидких топлив; продемонстрирована газификация биомассы   | Маломасштабные устройства редки; конечный продукт требует интенсивной очистки перед использованием; конкуренция с синтетическими топливами из биомассы и угля   |

Окончание табл. 9.1

| Технология получения водорода           | Преимущества  | Недостатки   |
|---|---|--|
| Термохимические и комбинированные циклы | Принципиально возможно производство больших объемов при низкой стоимости и без выброса парниковых газов для тяжелой промышленности и транспорта | Процесс сложен, еще не имеет коммерческого значения, требуются долговременные исследования (порядка 10 лет) материалов, усовершенствования химической технологии; требуется высокотемпературный ядерный реактор (ВТЯР) или солнечные концентраторы |
| Биохимические процессы                  | Потенциально большой ресурс   | Малая скорость накопления водорода; требуются большие площади; наиболее подходящие объекты еще не найдены  |

Таблица 9.2

**Стоимость тонны товарного водорода при крупномасштабном производстве различными методами**

| Процесс производства водорода     | Источник энергии                       | КПД, %                | Температура, К | Стоимость, тыс. долл./т |
|-----------------------------------|--|-----------------------|----------------|-------------------------|
| Паровая конверсия                 | Природный газ                          | 60–75                 | 1100–1300      | 1,2–1,6                 |
| Парокислородная конверсия         | Природный газ                          | 67–70                 | 1100–1200      | 1,1–1,5                 |
| Целевое производство на НПЗ       | Нефтяные фракции, сухие газы НПЗ       | 67–70                 | 1100–1200      | 2,0–2,6                 |
| Из угля                           | Уголь                                  | 60–80                 | 1200–1400      | 2,0–2,4                 |
| Щелочной электролиз               | Электроэнергия базисная и «провальная» | 20–30                 | 350            | 3,9–5,1                 |
| ТПЭ (твердополимерный электролит) |  | 20–36                 | 450            | 2,5–3,2                 |
| Щелочной электролиз               | Электроэнергия от солнечных ЭС и ВЭУ   | $\geq 7$<br>$\geq 10$ | 350            | 7,0–10,0<br>10,0–30,0   |
| Высокотемпературный электролиз    | Электроэнергия и теплота от АЭС        | 40–42                 | 1000–1300      | 2,3–3,5                 |
| Термоэлектрохимические циклы      | Электроэнергия и теплота от ВТГР       | 35–45                 | 1100           | 1,6–6,7                 |
| Термохимические циклы             |  | $\geq 50$             | 1100–1300      | 1,5–7,4                 |
| Биохимические процессы            | Солнечная энергия                      | 10 <                  | 310–340        | >12                     |

Стоимость газообразного водорода определяется затратами на исходное сырье и энергетику, а так же методом производства. При производстве

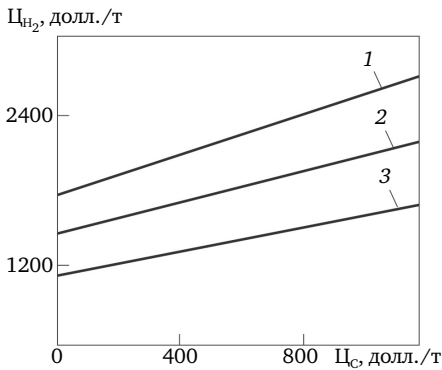


Рис. 9.1. Зависимость себестоимости водорода при парокислородной конверсии от стоимости сырья  $C_c$ :

1 — уголь; 2 — нефть;  
3 — природный газ

отличающиеся цифры, например: в проекте фирмы General Atomics расчетная стоимость водорода составляет 1,53 долл./кг при использовании высокотемпературного газоохлаждаемого реактора H<sub>2</sub>-MHR тепловой мощностью 2400 МВт с температурой теплоносителя 1100 К и общим КПД 42 % или 1,42 долл./кг при температуре 1200 К и КПД 52 % (для обоих вариантов принята норма дисконтирования 10,5 %).

водорода из природных топлив его стоимость линейно зависит от стоимости сырья (рис. 9.1).

Как уже отмечалось, при электролитическом способе получения водорода, его стоимость на 70–90 % зависит от затраты на электроэнергию, т. е. на стоимость водорода влияют параметры электролизёра и цена на электроэнергию (табл. 9.3).

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) могут явиться наиболее экономичным и мощным источником высокого потенциального тепла для производств водорода, но пока довольно сложно оценить его стоимость, в разных источниках приводятся сильно

Таблица 9.3

**Стоимость водорода, производимого методом электролиза в США**

| Стоимость электроэнергии, долл./ (кВт · ч) | Стоимость водорода, долл./кг |
|--|------------------------------|
| 0,02                                       | 1,34–1,75                    |
| 0,04                                       | 2,56–2,97                    |
| 0,08                                       | 5,51–6,05                    |

Доля стоимости урана в стоимости тепловой энергии, получаемой от атомного реактора, составляет 18 %. При удвоении цены на уран стоимость энергии повысится на 14 %, а при четырехкратном увеличении стоимости урана цена на энергию повысится на 40 %. Это указывает на относительную стабильность цен на тепло, получаемое от атомного реактора. Данные по природным горючим приведены в табл. 9.4.

Влияние цены первичных источников энергии на стоимость водорода можно видеть на следующем примере. Если принять стоимость водорода полученного паровой конверсией за 1, то при замене газа идущего на сжигание, теплом от реактора получим стоимость 0,8. При использовании теп-

ла реактора в термохимическом цикле стоимость того же количества водорода будет 0,41. Широкое использование тепла атомных реакторов сделает водородное горючее в будущем дешевле природного газа и нефти. Что касается капитальных вложений в оборудование на производство собственно водорода, то они не велики по сравнению со стоимостью оборудования АЭС и падают с ростом мощности по водороду. Полагают, что мощность атомной станции по производству водорода может в 1000 раз больше, чем станция для получения электроэнергии, что снизит стоимость водорода в пять раз.

Таблица 9.4

**Доля стоимости горючего в единице энергии,  
получаемой сжиганием этого горючего**

| Горючее           | Доля стоимости горючего, % |
|-------------------|----------------------------|
| Природный газ     | 48,0                       |
| Каменный уголь    | 81,5                       |
| Сырой бурый уголь | 41,0                       |
| Сухой бурый уголь | 67,0                       |
| Мазут             | 63,0                       |

---

## 10. Хранение водорода

---

При крупномасштабном использовании водорода требуются безопасные и эффективные системы его централизованного хранения [14]. Водород может храниться в жидком виде при его охлаждении до  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для охлаждения водорода до этой температуры требуется затратить около одной трети содержащейся в нем энергии ( $11\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг H}_2$ ), а для создания криогенных устройств необходимы специальные материалы и технологии. Водород может также быть запасен в виде газа. Этот процесс требует для сжатия водорода меньше энергии, чем для его ожижения (табл. 10.1). Водород в газовой фазе может быть накоплен в подземных полостях, месторождениях природного газа. Так, при испытаниях российских ЯРД для хранения использовались подземные емкости, водород в них содержался под давлением 90 атмосфер.

### 10.1. Классификация методов хранения водорода

---

В соответствии с классификацией департамента энергетики США, методы хранения водородного топлива можно разделить на 2 группы.

Первая группа включает физические методы, которые используют физические процессы (главным образом, компрессирование или ожижение) для перевода газообразного водорода в компактное состояние. Водород, хранимый с помощью физических методов, состоит из молекул  $\text{H}_2$ , слабо взаимодействующих со средой хранения. На сегодня реализованы следующие физические методы хранения водорода:

Сжатый газообразный водород:

- газовые баллоны;
- стационарные массивные системы хранения, включая подземные резервуары;
- хранение в трубопроводах;
- стеклянные микросферы.

Жидкий водород: стационарные и транспортные криогенные контейнеры.

Вторая группа включает химические методы, в которых хранение водорода обеспечивается физическими или химическими процессами его взаи-

модействия с некоторыми материалами. Данные методы характеризуются сильным взаимодействием молекулярного либо атомарного водорода с материалом среды хранения и являются следующими:

Адсорбционный водород:

- цеолиты и родственные соединения;
- активированный уголь;
- углеводородные наноматериалы.

Абсорбция в объеме материала (металлогидриды).

Химическое взаимодействие:

- алонаты;
- фуллерены и органические гидриды;
- аммиак;
- губчатое железо;
- водореагирующие сплавы на основе алюминия и кремния.

Таблица 10.1

#### Удельные показатели пяти способов хранения

| 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 низком давлении  | 0,39  | 1020  | —   |
| Газообразный водород при высоком давлении | 0,93  | 81  | 16,0  |
| Водород в гидридах                        | 1,16  | 22  | 76,9  |
| Жидкий водород                            | 10,50   | 14  | 7,0   |
| Криогенная адсорбция                      | 3,20  | 59  | 20,0  |

## 10.2. 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 подземными атомными взрывами. Доказана принципиальная возможность хранения газообразного водорода в соляных кавернах, создаваемых путем растворения соли водой через боровые скважины.

Для хранения газообразного водорода при давлении до 100 МПа используют сварные сосуды с двух- или многослойными стенками. Внутренняя

стенка такого сосуда выполнена из аустенитной нержавеющей стали или другого материала, совместимого с водородом в условиях высокого давления, внешние слои — из высокопрочных сталей. Для этих целей применяют и бесшовные толстостенные сосуды из низкоуглеродистых сталей, рассчитанных на давление до 40–70 МПа.

Широкое распространение получило хранение газообразного водорода в газгольдерах с водяным бассейном (мокрые газгольдеры), поршневых газгольдерах постоянного давления (сухие газгольдеры), газгольдерах постоянного объема (емкости высокого давления). Для хранения малых количеств водорода используют баллоны.

Следует иметь в виду, что мокрые, а также сухие (поршневые) газгольдеры сварной конструкции не обладают достаточной герметичностью. Согласно техническим условиям допускается утечка 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 выше — около 1,1% в сутки (считая на номинальный объем газгольдера).

Одним из наиболее перспективных способов хранения больших количеств водорода является хранение его в водоносных горизонтах. Годовые потери составляют при таком способе хранения 1–3%. Эту величину потерь подтверждает опыт хранения природного газа.

Газообразный водород можно хранить и перевозить в стальных сосудах под давлением до 20 МПа. Такие емкости подвозят к месту потребления на автомобильных или железнодорожных платформах, как в стандартной таре, так и в специально сконструированных контейнерах.

Для хранения и перевозки небольшого количества сжатого водорода при температурах от –50 до +60 °С используют стальные бесшовные баллоны малой емкости до 12 дм<sup>3</sup> и средней емкости 20–50 дм<sup>3</sup> с рабочим давлением до 20 МПа. Корпус вентиля изготавливают из латуни. Баллоны окрашивают в темно-зеленый цвет, они имеют красного цвета надпись «Водород».

Баллоны для хранения водорода достаточно просты и компактны. Однако для хранения 2 кг Н<sub>2</sub> требуются баллоны массой 33 кг. Прогресс в материаловедении дает возможность снизить массу материала баллона до 20 кг на 1 кг водорода, а в дальнейшем возможно снижение до 8–10 кг. Пока масса водорода при хранении его в баллонах составляет примерно 2–3% от массы самого баллона.

Большие количества водорода можно хранить в крупных газгольдерах под давлением. Газгольдеры обычно изготавливают из углеродистой стали. Рабочее давление в них обычно не превышает 10 МПа. Вследствие малой плотности газообразного водорода хранить его в таких емкостях выгодно лишь в сравнительно небольших количествах. Повышение же давления сверх указанного, например, до сотен мегапаскаль, во-первых,

вызывает трудности, связанные с водородной коррозией углеродистых сталей, и, во-вторых, приводит к существенному удорожанию подобных емкостей.

Для хранения очень больших количеств водорода экономически эффективным является способ хранения истощенных газовых и водоносных пластах. В США насчитывается более 300 подземных хранилищ газа.

Газообразный водород в очень больших количествах хранится в соляных кавернах глубиной 365 м при давлении водорода 5 МПа, в пористых водонаполненных структурах вмещающих до  $20 \cdot 10^6 \text{ м}^3$  водорода.

Опыт продолжительного хранения (более 10 лет) в подземных газохранилищах газа с содержанием 50% водорода показал полную возможность его хранения без заметных утечек. Слои глины, пропитанные водой, могут обеспечивать герметичное хранение ввиду слабого растворения водорода в воде.

В настоящее время газовая промышленность подготовлена к приему водорода и его смесей с другими горючими газами. Она располагает сетью газопроводов со значительно большей энергопередающей мощностью, чем в случае электрических сетей. Стоимость передачи водорода в несколько раз ниже стоимости передачи электроэнергии (рис. 10.1, 10.2).

Трубопроводный транспорт водорода обладает еще и тем преимуществом перед передачей электроэнергии, что водород легко накапливать и хранить в подземных и наземных хранилищах под давлением и передавать по газопроводам потребителям по их требованию в определенное время и в дозированных количествах. Сейчас в США функционирует около 1000 км во-

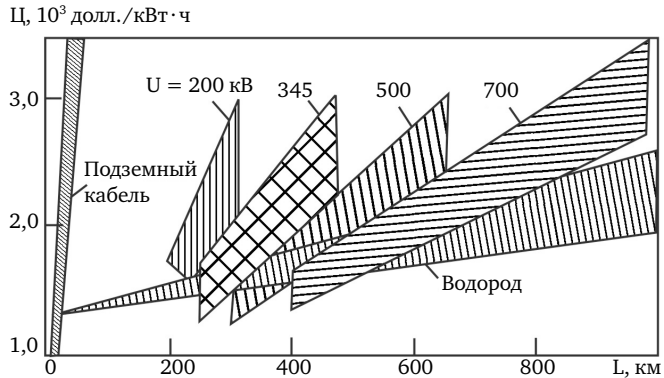


Рис. 10.1. Зависимость стоимости передачи энергии кабелем при заданном напряжении тока  $U$  и по водородопроводу от расстояния  $L$

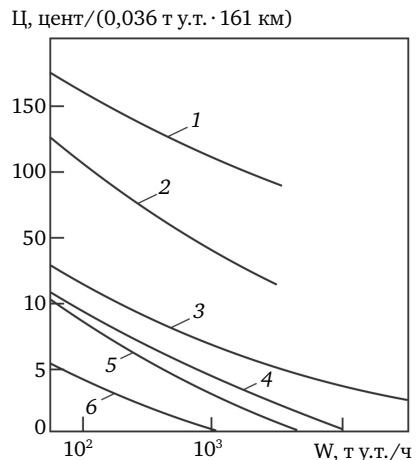


Рис. 10.2. Зависимость стоимости транспортирования энергии  $C$  от передаваемой мощности  $W$ : 1 — электроэнергия (по подземному кабелю); 2 — электроэнергия (по наземному кабелю); 3 — водород; 4 — метан; 5 — аммиак; 6 — нефть



дородных трубопроводов — в основном они проложены возле крупных потребителей этого газа, например нефтеперерабатывающих заводов. Длина самой протяженной «нитки» в мире (между Бельгией и Францией) 400 км. Защита трубопроводов от агрессивной среды и высокого давления требует немалых капиталовложений — около 600 000 долл. на 1 км, но готовый трубопровод — самый дешевый путь для доставки больших количеств водорода (табл. 10.2).

Таблица 10.2

**Издержки при транспортировании  
на дальние расстояния различных видов энергии**

| Энергоноситель                       | Издержки (центы/т у. т. · км) |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| Метан по трубопроводу                | 1,34                          |
| Водород по трубопроводу              | 1,48                          |
| Электроэнергия по высоковольтным ЛЭП | 9,46                          |
| Бензин в танкерах                    | 4,50                          |

Благодаря тому, что газопроводы природного газа фактически могут служить неограниченное время и могут быть в любое время использованы для транспортирования водорода и его смесей, большинство условий, которые понадобятся в будущем для распределения водорода, к настоящему времени уже созданы. Водород может стать самым дешевым способом передачи энергии на далекие расстояния.

### 10.3. Хранение жидкого водорода

Среди многих уникальных свойств водорода, которые важно учитывать при его хранении в жидком виде, одно является особенно важным. Водород в жидком состоянии находится в узком интервале температур: от точки кипения 20 К до точки замерзания 17 К, когда он переходит в твердое состояние. Если температура поднимается выше точки кипения, водород мгновенно переходит из жидкого состояния в газообразное.

Чтобы не допустить местных перегревов, сосуды, которые заполняют жидким водородом, следует предварительно охладить до температуры, близкой к точке кипения водорода, только после этого можно заполнять их жидким водородом. Для этого через систему пропускают охлаждающий газ, что связано с большими расходами водорода на захлаживание емкости.

Переход водорода из жидкого состояния в газообразное связан с неизбежными потерями от испарения. Стоимость и энергосодержание испаря-

ющегося газа значительны. Поэтому организация использования этого газа с точки зрения экономики и техники безопасности необходима. По условиям безопасной эксплуатации криогенного сосуда необходимо, чтобы после достижения максимального рабочего давления в емкости газовое пространство составляло не менее 5 %.

К резервуарам для хранения жидкого водорода предъявляют ряд требований:

- конструкция резервуара должна обеспечивать прочность и надежность в работе, длительную безопасную эксплуатацию;
- расход жидкого водорода на предварительное охлаждение хранилища перед его заполнением жидким водородом должен быть минимальным;
- резервуар для хранения должен быть снабжен средствами для быстрого заполнения жидким водородом и быстрой выдачи хранимого продукта.

Главная часть криогенной системы хранения водорода — теплоизолированные сосуды, масса которых примерно в 4–5 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 объемным характеристикам криогенные сосуды соответствуют хранению газообразного водорода под давлением 40 МПа.

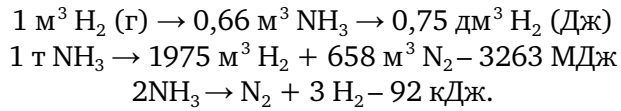
Жидкий водород в больших количествах хранят в специальных хранилищах объемом до 5 тыс. м<sup>3</sup>. Крупное шарообразное хранилище для жидкого водорода объемом 2850 м<sup>3</sup> имеет внутренний диаметр алюминиевой сферы 17,4 м<sup>3</sup>.

#### 10.4. Хранение и транспортирование водорода в химически связанном состоянии

---

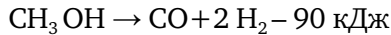
Преимущества хранения и транспортирование водорода в форме аммиака, метанола, этанола на дальние расстояния состоят в высокой плотности объемного содержания водорода. Однако в этих формах хранения водорода среда хранения используется однократно. Температура сжижения аммиака 239,76 К, критическая температура 405 К, так что при нормальной температуре аммиак сжижается при давлении 1,0 МПа и его можно транспортировать по трубам и хранить в жидком виде.

Основные соотношения приведены ниже:



В диссоциаторах для разложения аммиака (крекерах), которое протекает при температурах примерно порядка 1173–1073 К и атмосферном давлении, используется отработанный железный катализатор для синтеза аммиака. Для получения одного килограмма 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 60–70%.

Водород из метанола может быть получен по двум схемам: либо методом каталитического разложения:



с последующей каталитической конверсией CO, либо каталитической паровой конверсии в одну стадию:



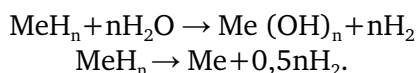
Обычно для процесса используют цинк-хромовый катализатор синтеза метанола. Процесс протекает при 573–673 К. Метанол можно использовать как горючее для процессов конверсии. В этом случае КПД процесса получения водорода составляет 65–70% (отношение теплоты полученного водорода к теплоте сгорания затраченного метанола); если теплота для процесса получения водорода подводится извне, теплота сгорания водорода, полученного методом каталитического разложения, на 22%, а водорода, полученного методом паровой конверсии, на 15% превосходят теплоту сгорания затраченного метанола.

К сказанному следует добавить, что при создании энерготехнологической 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. Так, при прямом сжигании метанола в газотурбинной установке КПД составляет 35%, при проведении же за счет тепла отходящих газов испарения и каталитической конверсии метанола и сжигания смеси CO + H<sub>2</sub> КПД возрастает до 41,30%, а при проведении паровой конверсии и сжигании полученного водорода — до 41,9%.

### 10.5. Гидридная система хранения водорода

В случае хранения водорода в гидридной форме отпадает необходимость в громоздких и тяжелых баллонах, требуемых при хранении газообразного водорода в сжатом виде, или сложных в изготовлении и дорогих сосудов для хранения жидкого водорода. При хранении водорода в виде гидридов объем системы уменьшается примерно в 3 раза по сравнению с объемом хранения в баллонах. Упрощается транспортирование водорода. Отпадают расходы на конверсию и сжижение водорода.

Водород из гидридов металлов можно получить по двум реакциям: гидролиза и диссоциации:

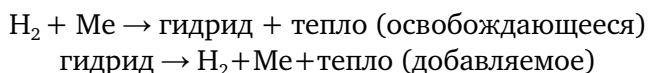


Методом гидролиза можно получать вдвое больше водорода, чем его находится в гидриде. Однако этот процесс практически необратим. Метод получения водорода термической диссоциацией гидрида дает возможность создать аккумуляторы водорода, для которых незначительное изменение температуры и давления в системе вызывает существенное изменение равновесия реакции образования гидрида.

Стационарные устройства для хранения водорода в форме гидридов не имеет строгих ограничений по массе и объему, поэтому лимитирующим фактором выбора того или иного гидрида будет, по всей вероятности, его стоимость. Для некоторых направлений использования может оказаться полезным гидрид ванадия, поскольку он хорошо диссоциирует при температуре, близкой в 270 К. Гидрид магния является относительно недорогим, но имеет сравнительно высокую температуру диссоциации 560–570 К и высокую теплоту образования. Железо-титановый сплав сравнительно недорог, а гидрид его диссоциирует при температурах 320–370 К с низкой теплотой образования.

Использование гидридов имеет значительные преимущества в отношении техники безопасности. Поврежденный сосуд с гидридом водорода представляет значительно меньшую опасность, чем поврежденный жидководородный танк или сосуд высокого давления, заполненный водородом.

Существенно, что связывание водорода с металлом протекает с выделением тепла. Экзотермический процесс образования гидрида из водорода М металла (зарядка) и эндотермический процесс освобождения водорода из гидрида (разрядка) можно представить в виде следующих реакций:



Для технического использования гидридов особый интерес представляют температуры, при которых давление диссоциации водорода в гидриде достигает значения выше 0,1 МПа. Гидриды, у которых давление диссоциации выше 0,1 МПа достигается при температуре ниже точки замерзания воды, называются низкотемпературными. Если же это давление достигается при температуре выше точки кипения воды, то такие гидриды считаются высокотемпературными.

Для нужд автомобильного транспорта создаются гидриды, которые теоретически могут содержать до 130–140 кг водорода в 1 м<sup>3</sup> металлического гидрида. Однако реализуемая емкость гидрида вряд ли будет превышать 80 кг/м<sup>3</sup>. Но и такое содержание водорода в баке емкостью 130 дм<sup>3</sup> достаточно на 400 км пробега автомобиля. Это реальные для применения показатели, но следует учитывать увеличение массы бака, заполненного гидридом. Например, масса латан-никелевого гидрида достигает 1 т, а гидрида магния — 400 кг.

К настоящему времени синтезированы и изучены гидриды металлов с широким интервалом свойств. Данные о свойствах некоторых гидридов, которые представляют наибольший потенциальный интерес, для промышленного использования, приведены в табл. 10.3 и 10.4. Как видно из табл. 10.3, например, гидрид магния дает возможность хранить 77 г Н<sub>2</sub> на 1 кг массы гидрида, в то время как в баллоне под давлением 20 МПа приходится лишь 14 г на 1 кг емкости. В случае жидкого водорода можно хранить 500 г на 1 кг емкости.

В Комплексной программе поисковых, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по водородной энергетике и топливным элементам запланировано исследование палладия. Металл платиновой группы палладий является одним из основных материалов для топливных элементов и всей водородной энергетике. На его основе изготавливаются катализаторы, мембранные аппараты для получения чистого водорода, материалы с повышенными функциональными характеристиками, топливные элементы, электролизёры, сенсоры для определения водорода. Палладий может эффективно накапливать водород, особенно, нанопорошок палладия [15].

Помимо водородной энергетике, палладий находит применение в катализаторах для доочистки выхлопных газов обычных автомобилей; электролизёрах для получения водорода и кислорода путем разложения воды; портативных топливных элементах, в частности метанольных; твердооксидных электролизёрах с электродами на основе палладия; устройствах для получения кислорода из воздуха, в том числе и в медицинских целях; сенсорах для анализа сложных газовых смесей.

Важно отметить, что наша страна контролирует около 50% мирового производства этого необходимого для получения водорода металла. В на-

стоящее время в Институте проблем химической физики РАН в Черноголовке ведутся работы по созданию аккумуляторов водорода на основе гидридов металла.

Таблица 10.3

## Свойства некоторых гидридов

| Гидрид  | Содержание H <sub>2</sub> , % (масс.) | Равновесная температура при 0,1 МПа, К | Стоимость металла, долл./кг |
|---|---------------------------------------|--|-----------------------------|
| Li ↔ LiH  | 12,7                                  | 1070                                   | 8,18                        |
| Mg ↔ MgH <sub>2</sub>   | 7,7                                   | 560                                    | 0,38                        |
| Ca ↔ CaH <sub>2</sub>   | 4,8                                   | 1190                                   | 2,20                        |
| Na ↔ NaH  | 4,2                                   | 800                                    | 0,30                        |
| Mg <sub>2</sub> NiH <sub>0,3</sub> ↔ Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub> | 3,2                                   | 520                                    | 1,00                        |
| K ↔ KH  | 2,5                                   | 990                                    | 0,35                        |
| VH <sub>0,95</sub> ↔ VH <sub>2</sub>                                  | 2,0                                   | 285                                    | 4,00                        |
| FeTiH <sub>0,1</sub> ↔ FeTiH  | 0,9                                   | 273                                    | 1,92                        |

Таблица 10.4

## Содержание водорода в гидридах, имеющих наибольший потенциальный интерес для промышленного использования

| Система                             | Молекулярная масса | Содержание H <sub>2</sub> в гидриде, г/кг |
|-------------------------------------|--------------------|---|
| LaNi <sub>5</sub> · 3H <sub>2</sub> | 440                | 13,4                                      |
| CuH                                 | 65                 | 15,4                                      |
| CbH                                 | 60                 | 16,7                                      |
| FeTiH <sub>2</sub>                  | 106                | 18,9                                      |
| NbH <sub>2</sub>                    | 95                 | 26,2                                      |
| VH <sub>2</sub>                     | 53                 | 37,8                                      |
| CrH <sub>3</sub>                    | 55                 | 54,5                                      |
| MgH <sub>2</sub>                    | 26                 | 77,0                                      |
| LiH                                 | 8                  | 125,0                                     |

## 10.6. Криoadсорбционное хранение водорода

Преимущество хранения водорода в криогенно охлаждаемых емкостях содержащих адсорбирующий водород материал по сравнению с хранением водорода в виде гидридов 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 криоадсорбции, тем выше емкость адсорбент, что покрывает более высокие расходы на охлаждение водорода. Реальные температуры работы криоадсорбера находятся между 65–78 К. Избыточное давление при адсорбции порядка 4,2 МПа, при десорбции 0,2 МПа.

Наилучший адсорбент — активированный уголь низкой плотности с наибольшей эффективной пористостью. Емкость хранения криогенного охлажденного активированного угля достигает 68 г/кг адсорбента при температуре 78 К и возрастает до 82 г/кг при 65 К.

По массовым характеристикам эта система хранения превосходит системы хранения водорода под давлением в баллонах и металлогидридах, но уступает металлогидридным и жидководородным системам по объемным характеристикам.

### 10.7. Техничко-экономическая оценка различных вариантов хранения водорода

Сравнительная оценка способов хранения водорода и их преимущества и недостатки, а также современные требования к ним и показатели различных методов хранения водорода по сравнению с показателями хранения эталонных углеводородных горючих представлены в табл. 10.5, 10.6, 10.7.

Таблица 10.5

Оценка основных методов хранения водорода

| Способ хранения                              | Преимущества   | Недостатки  |
|--|--|---|
| Газообразный водород (T = 300 К, p ≤ 20 МПа) | Технология хорошо отработана и доступна, относительно невелика стоимость | Низкое объемное содержание (около 7,7 кг/м <sup>3</sup> при давлении 10 МПа). Плотность запасенной энергии при высоких давлениях (до 70 МПа) сравнима с жидким водородом, но технология хранения при таких высоких давлениях до конца не отработана |
| Жидкий водород (T = 20,4 К)                  | Технология доступна, высокая плотность (71 кг/м <sup>3</sup> )           | Высокие энергозатраты на сжижение, потери водорода, на испарение, необходимость суперизоляции, как следствие, высокая стоимость   |
| Криогенная адсорбция (T = 155 К)             | Технология проста и достаточно отработана                                | Низкое объемное содержание (0,5–20 кг/м <sup>3</sup> ). Необходимость охлаждения и компримирования  |

Окончание табл. 10.5

| Способ хранения   | Преимущества  | Недостатки  |
|---|---|---|
| Углеродные наноструктуры: нанотрубки, фуллерены                       | Технологии в перспективе могут обеспечить высокую плотность хранения водорода (30–100 кг/м <sup>3</sup> )           | Производство углеродных структур недостаточно отработано, результаты по удержанию водорода невоспроизводимы |
| Гидриды металлов, сплавов, интерметаллических соединений и композитов | Удобство и безопасность хранения в твердой фазе (в связанном состоянии); ряд технологий достаточно хорошо отработан | Недостаточная емкость, необходимость подогрева, деградация со временем, относительно высокая стоимость      |

Таблица 10.6

**Современные требования к мобильным системам хранения водорода**

| Японская правительственная программа WE-NET  | Департамент энергетики США   | Международное энергетическое агентство                             |
|--|--|--|
| Количество водорода >3 мас. %<br>Температура дегидрирования <370 К<br>Циклическая устойчивость >90 % после 5000 циклов | Количество водорода >6 мас. %<br>Количество водорода по объему >60 кг/м <sup>3</sup> | Количество водорода >5 мас. %<br>Температура дегидрирования <420 К |

Таблица 10.7

**Показатели различных методов хранения водорода по сравнению с показателями хранения эталонных углеводородных горючих (базис 1 т у. т.)**

| Наименование горючего                         | Чистое горючие |                | Горючие + контейнер |                |
|---|----------------|----------------|---------------------|----------------|
|   | кг             | м <sup>3</sup> | кг                  | м <sup>3</sup> |
| Бензин (1 т = 1,64 т у. т.)                   | 610            | 0,85           | 690                 | 0,91           |
| Нефть (1 т = 1,43 т у. т.)                    | 705            | 0,79           | 790                 | 0,85           |
| Мазут (1 т = 1,39 т у. т.)                    | 720            | 0,75           | 800                 | 0,81           |
| Метанол (1 т = 1,64 т у. т., жид. 0,1 МПа)    | 1280           | 1,61           | 1360                | 1,67           |
| Аммиак (1 т = 0,83 т у. т., жид. 300 К)       | 1210           | 1,77           | 1930                | 3,30           |
| Метан газ (1 т = 1,71 т у. т., 15 МПа, 300 К) | 585            | 5,50           | 6400                | 7,80           |
| Метан жид. (0,1 МПа)                          | 585            | 1,40           | 750                 | 5,60           |



Окончание табл. 10.7

| Наименование горючего                          | Чистое горючие |                | Горючие + контейнер |                |
|--|----------------|----------------|---------------------|----------------|
|  | кг             | м <sup>3</sup> | кг                  | м <sup>3</sup> |
| Водород газ (1 т = 4,1 т у. т., 15 МПа, 300 К) | 244            | 18,10          | 23800               | 25,60          |
| Водород жид. (0,1 МПа, 20 К)                   | 244            | 3,50           | 1860                | 12,20          |
| Гидриды  |                |                |                     |                |
| MgH <sub>2</sub>                               | 3160           | 2,25           | 3640                | 3,80           |
| MgNiH <sub>2</sub>                             | 6600           | 4,60           | 7150                | 6,30           |
| VH <sub>2</sub>                                | 11750          | 2,20           | 12600               | 3,80           |
| LaNiH <sub>6</sub>                             | 21500          | 4,00           | 23350               | 6,70           |

Ниже представлена удельная годовая стоимость различных методов хранения водорода (рис. 10.3).

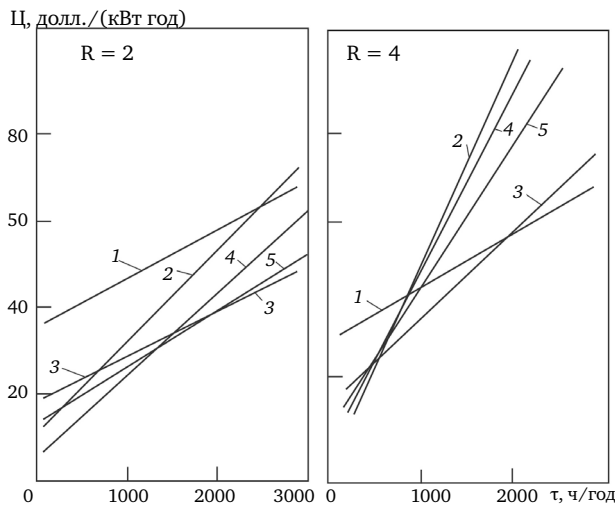


Рис. 10.3. Удельная годовая стоимость различных методов хранения водорода (C) как функция степени использования хранилища  $\tau$  при числе процедур заправки в год  $N = 280$  и энергетическом эквиваленте хранимого водорода  $L = 200$  МВт:

- 1 — хранение жидкого водорода; 2 — хранение на основе гидрида металла (FeTi);
- 3 — хранение в криоадсорбенте; 4, 5 — хранение при низком (1,2 МПа) и высоком (15 МПа) давлении (R — отношение максимально возможного хранения H<sub>2</sub> в данной системе к среднему хранимому количеству)

При хранении водорода в гидридах во всех случаях хранится 244 кг. Газообразный водород хранится в баллонах (15 МПа), при этом масса контейнера на 1 кг водорода составляет 98 кг. Жидкий водород хранится в дьюарах по 6,5 кг. Масса контейнера на 1 кг газообразного метана в баллонах при 15 МПа составляет 11 кг. Масса дьюара на 1 кг жидкого метана составляет 1,3 кг.

---

# 11. Использование водорода

---

## 11.1. ДВС на водороде

---

**Ш**ирокие пределы воспламенения водорода 4–75% (об.) против 1,5–76% (об.) для бензина делают его идеальным горючим для двигателей. Скорость сгорания водородо-воздушной смеси в двигателе в 3 раза больше, чем изооктановой-воздушной смеси, при этом значительно более высокий термический КПД. Двигатель на водороде может быть сконструирован с очень большой выходной мощностью, без радикальных изменений известных инженерных решений и в отношении конструкции, и в отношении системы зажигания. Двигатель внутреннего сгорания на водородном горючем позволяет использовать зажигание посредством накала вместо дорогостоящего искрового зажигания. Водородное горючее имеет еще то преимущество, что не дает двигателю углеродных или свинцовых отложений, продукты сгорания химически не агрессивны, поэтому износ двигателя и расход масла в процессе эксплуатации, заметно снижается.

Водородный двигатель легче запускается, летучесть водорода в сочетании с его воспламеняемостью делают его незаменимым горючим в условиях полярного холода. Термический КПД при работе двигателей внутреннего сгорания на водороде возрастает при увеличении степени сжатия (при  $\epsilon = 5,45$   $\eta = 37,5\%$  и при  $\epsilon = 7$   $\eta = 43\%$ ). Реализация любой схемы использования водорода в двигателях внутреннего сгорания зависит от создания экономичной, гибкой в использовании системы хранения водорода.

## 11.2. Топливные элементы

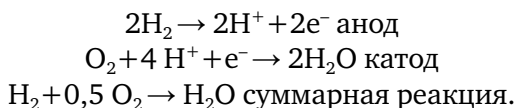
---

Первая электрическая энергия была получена с помощью топливного элемента еще в 1839 году. Однако бум вокруг водородной энергетики возник тогда, когда началось освоение космоса. Уральский электрохимический комбинат — пионер в создании электрохимических генераторов мощностью в десятки киловатт. В 1971 году здесь был разработан электрохимический генератор «Волна» (мощность 1,2 кВт) на щелочном топливном элементе для отечественной лунной программы.

В 60-е годы XX в. были созданы топливные элементы мощностью до 1 кВт для программ «Джемин» и «Аполлон», в 70–80-е годы — 10-киловаттные топливные элементы для «Шаттла». У нас такие установки разрабатывались для программы «Буран» в НПО «Энергия», которое выступало координатором всей программы, но сами щелочные топливные элементы создавались в Новоуральске на электрохимическом комбинате. В те же годы построены электростанции мощностью порядка 100 кВт на фосфорнокислотных топливных элементах. В Японии и США имеются опытные 10-мегаваттные электростанции.

Топливный элемент — гальваническая ячейка, вырабатывающая электроэнергию за счет окислительно-восстановительных превращений реагентов, поступающих извне. При работе топливного элемента электролит и электроды не расходуются, не претерпевают каких-либо изменений. В нем химическая энергия топлива непосредственно превращается в электроэнергию.

В простейшем топливном элементе, где используются чистый водород и чистый кислород, на аноде происходит разложение водорода и его ионизация:



Топливный элемент состоит из ионного проводника (электролита) и двух электронных проводников (электродов), находящихся в контакте с электролитом, который осуществляет перенос заряда ионами водорода.

В других топливных элементах носителями заряда могут выступать ион кислорода, радикал  $\text{OH}^-$  или  $\text{CO}_3^{2-}$ , окислителями могут быть кислород либо воздух. По типу электролита они классифицируются на: щелочные, твердо-полимерные, фосфорнокислые, расплавкарбонатные и твердооксидные; по рабочей температуре — на низко-, средне- и высокотемпературные.

Топливо и окислитель непрерывно подводятся к электродам — аноду и катоду, продукты (инертные компоненты и остатки окислителя, а также продукты окисления) непрерывно отводятся от них. Из молекулы водорода образуются два иона водорода и два электрона. На катоде водород соединяется с кислородом и возникает вода. Фактически в этом и состоит главный экологический выигрыш: в атмосферу выбрасывается водяной пар вместо огромного количества углекислого газа, образующегося при работе традиционных тепловых электростанций.

Щелочные, твердополимерные и фосфорнокислые электролиты очень чувствительны к  $\text{CO}$ . В карбонатных и твердооксидных топливных элементах  $\text{CO}$  является топливом. Чувствительность к  $\text{CO}_2$  щелочных элемен-

тов тоже очень высокая, но  $\text{CO}_2$  не влияет на работу других топливных элементов. Достаточно большую чувствительность к таким примесям, как  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{COS}$ , показывают все топливные элементы. Примеси отнесены к ядовитым, если их присутствие приводит к выходу из строя топливных элементов из-за отравления электродов или электролитов. В конечном счете, примеси к водороду сокращают срок службы топливных элементов.

### Классификация ТЭ

*Щелочной ТЭ (ЩТЭ, AFC).* Используют 35–50 % водного раствора щелочи (KOH или NaOH) в качестве электролита и эксплуатируют при температуре до 270–300 К (ТЭ на концентрированных, до 85 %, растворах щелочи используются при температурах до 520 К). ТЭ данного типа являются наиболее разработанными, в частности, они широко применяются в автономных энергосистемах, используемых в космонавтике и военно-морском флоте. Их основным недостатком является недопустимость наличия  $\text{CO}_2$  как в топливе, так и в окислителе.

*ТЭ на протонообменной мембране (ТПТЭ, PEMFC).* В качестве электролита используется твердая полимерная мембрана (тонкая пластмассовая пленка), которая проводит водородные ионы (протоны) с анода на катод. Они обеспечивают высокую плотность тока, что позволяет уменьшать их вес, стоимость, объем и улучшать качество работы. Неподвижный твердый электролит упрощает герметизацию в процессе производства, уменьшает коррозию, и обеспечивает более долгий срок службы ТЭ. Эти ТЭ работают при низких температурах, что ускоряет запуск и реакцию на изменения потребности в электричестве. Они идеально подходят для транспорта и стационарных установок небольшого размера.

*ТЭ на фосфорной кислоте (ФКТЭ, PAFC).* Электролитом является бумажная матрица, насыщаемая фосфорной кислотой, также проводящей протоны. Это наиболее разработанные коммерчески развитые ТЭ. Они применяются в стационарных электрогенераторных устройствах в зданиях, гостиницах, больницах, аэропортах и электростанциях. ТЭ на фосфорной кислоте вырабатывают электричество с КПД более 40 % или около 85 %, если пар, который производит этот ТЭ, используется для совместного производства тепла и электричества (в сравнении с 30 % КПД наиболее эффективного двигателя внутреннего сгорания).

*ТЭ на расплаве карбоната (РКТЭ, MCFC).* Используется расплавленная смесь лития/калия (или лития/натрия) для проведения ионов карбоната от катода к аноду. Рабочая температура — приблизительно 920 К, что позволяет использовать топливо напрямую, без какой-либо дополнительной его подготовки, и никель в качестве катализатора. Их конструкция более сложна, чем конструкция ТЭ на фосфорной кислоте, из-за их более высокой рабочей температуры и использования расплава электролита. Им тре-

буется существенное количество времени для того, чтобы они достигли рабочей температуры и смогли реагировать на изменения в потребности электричества, и поэтому лучше всего они подходят для условий, где необходима постоянная подача больших количеств электроэнергии. Наибольшее количество подобных установок построено в США и Японии. В США имеется демонстрационная опытная электростанция мощностью 1,8 МВт.

*ТЭ на твердых оксидах* (ТОТЭ, SOFC). В качестве электролита используется твердый керамический материал (стабилизированная иттрием окись циркония), которая проводит атомы кислорода от катода к аноду при чрезвычайно высокой температуре — свыше 1300 К. Это позволяет им использовать относительно загрязненные виды топлива, например, получаемые при газификации угля. Энергетический КПД — около 60%. Их относительно простая конструкция (обусловленная использованием твердого электролита и самых разных видов топлива) в сочетании с существенным количеством времени, необходимым для того, чтобы они достигли рабочей температуры и смогли реагировать на изменения в потребности в электричестве, делает их подходящими для больших и очень больших стационарных электрогенераторных установок и электростанций.

### **Области применения ТЭ**

Рынок топливных элементов является наиболее прогрессирующей областью использования водородного топлива. С начала 1970-х гг. их произведено более 11 тысяч, причем более 10 тысяч — в последние 10 лет. Можно выделить четыре основных сектора рынка ТЭ: транспорт, небольшие и крупные стационарные установки, портативные устройства. В настоящее время в мире эксплуатируют примерно 70 пассажирских автобусов и 200 легковых автомобилей с ТЭ. Создано около 40 заправочных станций. После 2010 г. ожидается расширение продаж автомобилей с ТЭ. При условии успешного решения технических проблем доля электромобилей с ТЭ в общем объеме продаж к 2030 г. достигнет 7–10%.

Стационарные ТЭ распространены в большей степени, чем автомобильные источники питания. В настоящее время в мире действуют около 600 энергоустановок, имеющих мощность более 10 кВт. Подавляющее большинство этих систем работают на природном газе. В последние годы наблюдается спад на рынке крупных стационарных энергоустановок на базе ТЭ, вместе с тем вырос объем продаж систем мощностью менее 10 кВт, которые могут использоваться в домашних условиях или как резервный источник питания.

Расширение рынка ТЭ происходит в основном за счет наиболее перспективной области — создания источников питания для портативных электронных приборов — мобильных телефонов, миникомпьютеров, видеокамер. Разработано более 1700 портативных систем на основе ТЭ. Крупные

стационарные системы более совершенны, и их распространение, возможно, будет постепенно расти.

Ежегодно на исследования ТЭ и сопутствующих технологий в западных странах расходуют около 1 млрд долл. 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 мощностью 5 кВт могут обслуживать несколько коттеджей. Популярность малых домашних комбинированных (электричество + тепло) установок обусловлена высоким КПД, малыми выбросами CO<sub>2</sub>, они легко могут быть встроены в существующую инфраструктуру. Такая энергетическая установка имеет размер не больше домашнего бойлера и может работать на природном газе.

В 2005 г. во всем мире было установлено более 900 новых малых стационарных водородных энергетических установок, в 2006 г. — около 1500, и общее количество достигло примерно 5000, в 2007 г. введено примерно 3000 новых стационарных установок мощностью до 10 кВт.

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

В 2005–2006 гг. большая часть малых установок была изготовлена в Японии. Фирма NEF (New Energy Foundation) объявила о начале многолетнего демонстрационного проекта применения малых стационарных топливных элементов. Будет субсидирован выпуск 6400 топливных элементов. В 2005 г. стоимость 1 кВт водородной бытовой станции в Японии составляла 10 млн иен (примерно 87 тыс. долл.), монтажные работы стоили еще 1 млн иен. В 2007 г. снижение стоимости 1 кВт установленной мощности составило менее 1 млн иен.

*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 г. 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 г. усилилась тенденция применения синтез-газа и биогаза. По объему потребления в качестве сырья биогаз вышел на второе место после природного газа. В 2005 г. в Японии и Германии были построены электростанции, работающие на биогазе, получаемом из древесных отходов,

пластика, муниципальных сточных вод. В будущем значительно увеличится доля водорода и керосина.

*Гибридные установки: топливный элемент/газовая турбина.* Для повышения эффективности, снижения себестоимости энергии и для утилизации тепловой энергии применяются установки, совмещающие топливные элементы и газовые турбины. 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 остальная 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> должны быть на 30% меньше, чем на традиционных угольных электростанциях.

В 2005 г. в США был принят Закон по энергетике, предусматривающий 30%-ые инвестиционные налоговые скидки до уровня 1000 долл./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 долл./(кВт·ч).

*Автомобильный транспорт.* В 2005 г. в эксплуатацию было введено около 100 новых автомобилей, автобусов, мотоциклов и т. д. на топливных элементах. К концу 2006 г. в мире эксплуатировали 620–650 транспортных средств с ТЭ. В автомобильных источниках питания преобладают PEMFC-технологии. В 2005 г. был выпущен всего один автомобиль с ТЭ-РАFC. Стоимость автомобильных водородных ТЭ снизилась с 275 долл./кВт мощности в 2002 г. до 110 долл./кВт в 2005. К 2020 г. министерство энергетики США планирует снизить стоимость ТЭ до 30 долл./кВт. Основные автомобилестроительные фирмы рассчитывают начать коммерческое производство (десятки тысяч) автомобилей с ТЭ (десятки тысяч) в 2010–2015 гг.

*Заправочные станции.* К концу 2006 г. во всем мире функционировали более 140 водородных автомобильных заправочных станций. Из общего количества заправочных станций, построенных в 2004–2005 гг., всего 8% работают с жидким водородом, остальные — с газообразным. Отсутствие водородной инфраструктуры является одним из основных препятствий развитию водородного транспорта. Решением проблемы может стать применение водорода в качестве топлива для двигателя внутреннего сгорания или смесей топлива с водородом. В январе 2006 г. компания Mazda начала продажи битопливного автомобиля Mazda RX-8 с роторным двигателем, который может потреблять и бензин, и водород.

*Воздушный транспорт.* Корпорация Boeing прогнозирует, что ТЭ постепенно заменят в авиации вспомогательные энергетические установки.

Они смогут производить электроэнергию, когда самолет находится на земле, и быть источниками бесперебойного питания в воздухе. Топливные элементы будут постепенно устанавливаться на новом поколении Boeing 7E7 начиная с 2008 г.

*Железнодорожный транспорт.* Для применения ТЭ в железнодорожном транспорте требуется высокая мощность, а размеры силовой установки не имеют большого значения. Железнодорожный исследовательский технологический институт (Япония) планирует к 2010 г. выпустить в эксплуатацию поезд на водородных ТЭ. Поезд сможет развивать скорость 120 км/ч и проезжать 300–400 км без заправки. В феврале 2005 г. прототип был испытан. В США с 2003 г. разрабатывают локомотив массой 109 т с водородным ТЭ мощностью 1 МВт.

*Водный транспорт.* В Германии компания Siemens производит подводные лодки класса U-209 с двумя ТЭ мощностью по 120 кВт каждый. Эти лодки предназначены для военно-морских сил Германии, поступили также заказы из Греции, Италии, Кореи, Израиля. Под водой лодка работает на водороде и практически бесшумна. В США поставки ТЭ-SOFC для подводных лодок предполагалось начать в 2006 г. Компания FuelCell Energy разрабатывает ТЭ мощностью 625 кВт для военных кораблей. В августе 2003 г. была испытана японская подводная лодка Urashima с ТЭ-PEMFC производства компании Mitsubishi Heavy Industries.

*Складские погрузчики.* Чуть менее половины новых ТЭ, использованных в 2006 г. в транспортных средствах, были установлены на складских погрузчиках. Замена аккумуляторных батарей на топливные элементы позволит значительно сократить площади, занимаемые аккумуляторными цехами.

*Топливные элементы для портативных устройств.* В 2006 г. во всем мире было изготовлено около 3000 шт. источников питания на основе ТЭ для мобильных устройств: мобильных телефонов, ноутбуков и т. д. Одним из основных потребителей была армия США. Армии требуются легкие, емкие, бесшумные источники энергии. Благодаря спросу со стороны военных США заняли первое место в мире по количеству разработок портативных устройств. На Японию в 2005 г. пришлось всего 13 % новых разработок. Наиболее активными были компании-производители электроники: Casio, Fujitsu, Hitachi, Nec, Sanyo и Toshiba. В портативных и электронных приложениях доминируют ТЭ типа PEMFC и с прямой конверсией метанола (DMFC).

### **Перспективы использования водорода и топливных элементов**

Преимуществом использования водорода в долгосрочной перспективе является замена им жидких видов топлива и природного газа. Однако рынок будет развиваться постепенно. Сначала водород, вероятно, будут использовать крупные потребители в тех областях, где его уникальные характери-



стики обеспечат дополнительные преимущества. Три области применения открывают возможности потребления очень больших количеств водорода на нескольких площадках, что сводит к минимуму потребности в системе трубопроводов для распределения водорода. Первым рынком водорода может стать парк муниципальных автобусов и грузовых автомобилей. Их заправляют централизованно, и поэтому нет необходимости во многих заправочных станциях. В условиях городской среды существуют сильные стимулы для сокращения загрязнения атмосферы. На грузовых автомобилях можно найти свободное пространство, поэтому технические требования, предъявляемые к хранению водорода, менее жесткие, чем для пассажирского транспорта. Поездки автотранспорта в городе связаны с постоянными остановками, при этом гибридные транспортные средства с ТЭ более экономичны с точки зрения расхода топлива по сравнению с двигателями внутреннего сгорания.

Использование водородного топлива в авиации имеет уникальные преимущества — очень низкая масса водорода по сравнению с топливом для реактивных двигателей позволяет увеличить грузоподъемность. В этой области нет каких-либо технических барьеров, важны только соображения экономичности. Рынок в настоящее время ограничен, поскольку только около 50 крупных аэропортов могут принимать реактивные самолеты. Следовательно, имеется потенциал для его расширения.

К числу достоинств использования топливных элементов относятся: высокий КПД, низкая токсичность, бесшумность, модульная конструкция (имея, скажем, киловаттные топливные элементы, можно собирать из них установки большой мощности), многообразие первичных видов топлива, широкий интервал мощности.

Проникновение их на рынок сдерживается, прежде всего, высокой себестоимостью по электроэнергии и малым ресурсом. Наибольший ресурс у твердополимерных топливных элементов: 2–5 тыс. часов работы, требуемый же срок службы: 20–30 тыс. часов.

Что касается коммерциализации электрохимических генераторов на топливных элементах, то около 100 компаний участвует в их демонстрационных испытаниях, достигнута установленная мощность в 50 МВт. Потребность децентрализованной стационарной энергетики (мощность электрохимических генераторов от 5 кВт до 10 МВт) — 100 тыс. МВт за 10 лет. Сейчас 1 кВт установленной мощности стоит более 3 тыс. долл., приемлемая цена — 1 тыс. долл. Потребности автотранспорта в электрохимических генераторах на топливных элементах (мощность 15–100 кВт) — 500 тыс. штук в год. Сейчас стоимость одного такого генератора более 3 тыс. долл., приемлемая цена 50–100 долл. Таким образом, необходимо многократное снижение стоимости стационарных топливных элементов и десятикратное — стоимости топливных элементов для транспорта.

Учитывая потребности рынка, программа бюджетных инвестиций США предполагает в ближайшие 10 лет вложить 5,5 млрд долл. в развитие технологии топливной энергетики, промышленные компании — почти в 10 раз больше.

### 11.3. Никель-водородный аккумулятор

Металло-водородные ХИТ, к которым относится никель-водородный аккумулятор (НВА), серебряно-водородный аккумулятор (СВА) и свинцово-водородный аккумулятор (СвВА), являясь исключительно отечественным изобретением [42, 43], представляют комбинацию классического аккумулятора и регенеративного топливного элемента; они состоят из водородного и металл-оксидного электродов в растворе щелочи (НВА и СВА) или кислоты (СвВА).

При заряде на водородном электроде генерируется водород, который накапливается под давлением в герметичном корпусе. Давление при этом связано со степенью заряда (С) линейным соотношением:

$$C = \beta \cdot P,$$

где  $\beta$  — постоянная для заданной конструкции корпуса.

Твердофазный электрод ведет себя так же, как в никель-кадмиевом (в случае НВА), в серебряно-кадмиевом (в случае СВА) или свинцово-кислотном (в случае СвВА) аккумуляторах. При разряде водород потребляется на водородном электроде, и при полном разряде давление становится равным исходному, соответствующему началу заряда.

Специфичным для металловодородных аккумуляторов является возможность не отделять водородное топливо от твердофазного окислителя ввиду малой скорости реакции непосредственного химического взаимодействия водорода с металлоксидными электродами. Это позволяет не принимать специальных мер защиты твердофазного электрода от водорода, что допускает простое конструктивное оформление металло-водородных ХИТ и является источником довольно высокой удельной энергии.

Никель-водородный аккумулятор ( $\text{NiH}_2$  или  $\text{Ni-H}_2$ ) — это обратимый химический источник тока, состоящий из никелевого и водородного электродов. Он отличается от никель-металл-гидридного аккумулятора использованием водорода в газообразной форме, хранящегося в сжатом состоянии в ячейке при давлении в 82,7 бар.

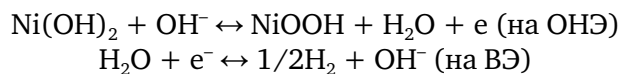
$\text{NiH}_2$  ячейки с использованием 26% раствора гидроксида калия (КОН) в качестве электролита достигают срока эксплуатации в 15 лет и более при 80% глубине разряда.

Плотность энергии составляет 75 Вт·ч/кг, 60 Вт·ч/дм. Напряжение на контактах составляет 1,55 В, среднее напряжение на протяжении разряда — 1,25 В.

Несмотря на то, что плотность энергии составляет только около одной трети аналогичного показателя литиевой батареи, специфическим свойством никель-водородного аккумулятора является продолжительность срока эксплуатации: ячейки выдерживают более чем 20000 циклов разряда при 85 % эффективности.

Никель-водородный аккумулятор впервые разработан в СССР в Научно-исследовательском проектно-конструкторском и технологическом аккумуляторном институте (НИАИ) в 1964 году. Представляет собой герметичный щелочной аккумулятор, сочетающий в себе традиционный оксидно-никелевый электрод (ОНЭ) и газовый водородный электрод (ВЭ).

Основные токообразующие реакции:



Суммарная реакция:



Электролитом в НВА является 20–40 %-ный раствор КОН.

При заряде на ВЭ выделяется водород, который накапливается в свободном объеме аккумулятора, повышая его внутреннее давление. Причем это давление прямо пропорционально сообщенной зарядной емкости. При разряде водород электрокаталитически ионизируется на ВЭ и давление падает, обеспечивая надежную индикацию степени разряда.

Никель-водородный аккумулятор объединяет положительный никелевый электрод никель-кадмиевого элемента и отрицательный электрод, включающий катализатор и газ-диффузионную часть топливного элемента. В ходе разряда водород, содержащийся в сосуде под давлением взаимодействует с кислородом никельоксихлоридного электрода. Вода потребляется на никелевом электроде и высвобождается на водородном, таким образом, концентрация гидроксида калия в электролите не изменяется.

Если заряженный аккумулятор продолжить заряжать, вода, образуемая на никелевом электроде, диффундирует в водородный электрод и там диссоциирует; как следствие, аккумуляторы могут выдерживать перезаряд до тех пор, пока рассеивается выделяющееся тепло.

Аккумуляторы имеют недостаток в виде относительно высокого саморазряда, который пропорционален давлению водорода в ячейке; в некоторых конструкциях 50 % емкости могут быть потеряны после нескольких дней хранения. Саморазряд снижается при снижении температуры.

Ячейки могут выдерживать перезарядку, случайное нарушение полярности, давление водорода в ячейке обеспечивает хорошую индикацию степени разряда. Однако объемная эффективность водорода-газа низка и требуемое высокое давление приводит к необходимости использовать дорогие сосуды под давлением.

Положительный электрод изготавливают из спеченного пористого никелевого диска, который содержит гидроксид никеля. В отрицательном водородном электроде используют связанный тефлоном платиновый катализатор с сепаратором из циркониевых нитей.

Конструкция аккумулятора с индивидуальным сосудом (IPV) состоит из  $NiH_2$  ячейки и сосуда под давлением. Конструкция аккумулятора с общим сосудом (CPV) состоит из двух последовательных  $NiH_2$  ячеек и общего сосуда под давлением. CPV обеспечивает несколько большую плотность энергии, чем IPV. SPV конструкция объединяет до 22 ячеек в общем сосуде. В биполярной конструкции достаточно толстый электрод является общим: положительным для одной и отрицательным для соседней ячейки в SPV. Конструкция с зависимым сосудом (DPV) обеспечивает большую плотность энергии при меньших затратах [44].

В сравнении с другими аккумуляторами никель-водородные обладают хорошими электрическими свойствами, делающими их привлекательными для хранения электрической энергии на космических аппаратах. Например, МКС, Messenger, Марс Одиссей и Mars Global Surveyor оборудованы никель-водородными аккумуляторами.

Развитие никель-водородных аккумуляторов началось в 1970 г. в COMSAT, где они впервые были использованы в 1977 г. на борту спутника NTS-2 военно-морских сил США.

К числу наиболее известных российских космических программ относятся «Ресурс-ДК», «Экран», «Электро-Л», «Фобос-Грунт», «ГЛОНАСС»,

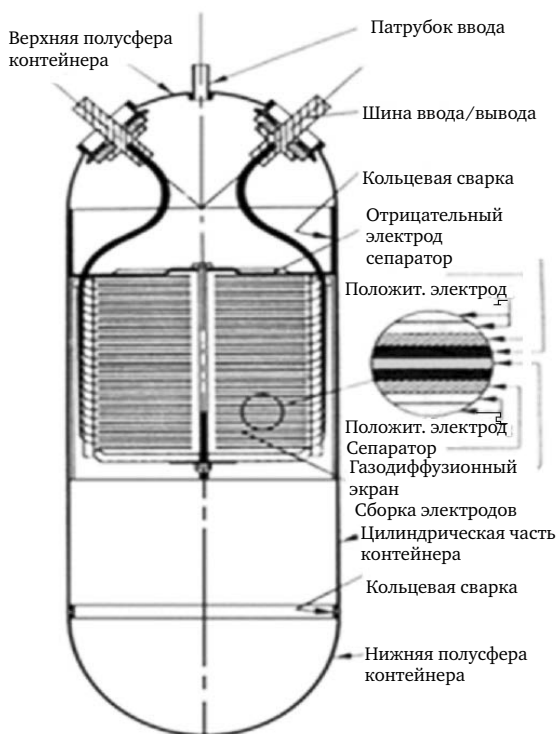


Рис. 11.1. Конструкция НВА с общим/зависимым сосудом (C/DPV) — гибрид CPV и DPV с высокой объемной эффективностью

«Спектр-Р», серия аппаратов «Экспресс», серия аппаратов «Ямал», «SESAT», «Интербол-1,2», ГЕО-ИК, «Экран-М», «Глобус», «Стрела», «Фобос», «Марс-96». Батареи успешно работали в составе более 200 космических аппаратов. Российские аккумуляторные батареи поставляются фирмам Германии, Франции, Китая, Казахстана.

Телескоп Хаббл, когда его оригинальные батареи были заменены в мае 2009 года спустя 19 лет после запуска, достиг наибольшего числа циклов разряда среди  $NiH_2$  батарей на низких опорных орбитах.

## 12. Современное состояние исследований и разработок в области водородных энерготехнологий

**Н**есмотря на особенности экономического развития различных государств, тенденция роста приоритета исследований и разработок в области водородных энерготехнологий в настоящее время характерна для большинства стран мира. Основными мотивами, обуславливающими рост интереса к данной тематике национальных правительств, крупных международных организаций и коммерческих компаний, являются стремление к энергетической безопасности, обеспокоенность глобальным ухудшением экологической обстановки и климата, поиск общедоступных источников энергии, необходимость инвестиций в современную инфраструктуру энергообеспечения.

Анализ динамики общемирового спроса на энергию (рис. 12.1) показывает, что при сохранении существующей энергетической политики доля углеводородных топлив в балансе первичных энергоисточников будет неуклонно возрастать и составит к 2030 г. 90 % прироста энергопотребления. Большая часть указанной потребности будет покрываться за счет нефти, 75 % которой будет потребляться автотранспортом. Нужды других потребителей (энергетика, промышленность) будут в основном удовлетворяться за счет природного газа и, в меньшей степени, угля. В результате объем международной торговли углеводородными топливами увеличится по отношению к ситуации на 2000 г. вдвое. Это приведет к существенному росту экономической зависимости стран-импортеров.

Существенное увеличение потребления углеводородных топлив также приведет к значительному осложнению экологической обстановки: только выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу увеличатся за 2000–2030 гг. на 70 %, в то время как по данным Межправительственной комиссии по изменению климата

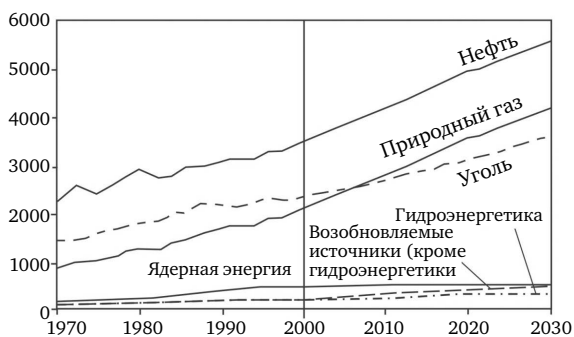


Рис. 12.1. Общемировой спрос на энергию в млн т у. т.

для избежания глобального потепления, вызванного парниковым эффектом, его концентрация в атмосфере за 2020–2050 гг. должна быть снижена на 50–60 % по сравнению с уровнем 1990 г.

Таким образом, необходимость кардинального изменения энергетической политики в сторону сокращения потребления традиционных углеводородных энергоносителей — нефти, природного газа и угля — является чрезвычайно актуальной проблемой, затрагивающей как общечеловеческие (климат и экология), так и экономико-политические интересы стран-импортеров углеводородных топлив. Решение этой проблемы сопряжено с необходимостью, во-первых, выделения особого приоритета разработке и внедрению энергосберегающих технологий и, во-вторых, структурных изменений в энергетике, направленных на увеличение доли выработки энергии, производство которой не связано с потреблением углеводородных топлив и выбросами



Рис. 12.2. Прогнозы потребления водорода в XXI веке

СО<sub>2</sub> в атмосферу.

Реализация концепции водородных энергосистем является основным путем изменения энергетической инфраструктуры в желаемом направлении. На рис. 12.2 показан один из вероятных прогнозов изменения размера и структуры рынка водорода на XXI век. Прогноз предусматривает увеличение потребления водорода по сравнению с уровнем 2000 г. в 16–20 раз, причем большая часть этого увели-

чения (до 80 %) связана с использованием водорода как топлива и энергоносителя, из которого порядка 70 % будет использоваться на нужды автотранспорта.

Для успешной реализации указанного подхода водородные энерготехнологии должны быть усовершенствованы до такой степени, чтобы стать конкурентоспособными в техническом и экономическом аспектах, пройдя путь от исследований и разработок до создания новой водородной инфраструктуры: производственных мощностей для получения водорода, систем его хранения, транспортировки, распределения, высокоэффективных стационарных и транспортных энергоустановок и т. п.

Работы в данном направлении требуют как тщательного планирования и координации, так и больших инвестиций в национальном и междуна-

родном масштабах. По мнению экспертов, в ближайшие 30–50 лет инвестиции в создание водородной экономики составят от 1 до 10 триллионов долл. США.

### **Национальные водородные программы**

В конце 1990-х гг. в мире стартовал ряд крупных международных и национальных программ, ориентированных на коммерциализацию научно-технических разработок по водородным технологиям, топливным элементам, возобновляемым источникам энергии и ряду других направлений, конечной целью которых является реализация концепции водородных энерготехнологических систем. Помимо государственных и неправительственных общественных организаций, работы в области водородных технологий инвестируются рядом коммерческих структур, главным образом, крупными автомобильными компаниями.

Основным стимулом развития водородных технологий в настоящее время является финансовая и политическая поддержка работ в данном направлении, осуществляемая на уровне правительств и координируемая соответствующими межгосударственными соглашениями.

*США.* Наиболее крупным комплексным планом развития работ в области водородных энерготехнологий на североамериканском континенте является программа Департамента энергетики США (DOE) «Водород, топливные элементы и технологии инфраструктуры», принятая в 1999 г. и скорректированная в феврале 2004 г. Основной мотивацией является снижение зависимости США от импорта сырой нефти, 2/3 которой потребляется автотранспортом. Поэтому основной упор делается на широкомасштабное использование водорода в транспортном секторе. С данным направлением также тесно связаны принятые в 2002 г. проекты модернизации автотранспорта: «Водородная инициатива» Президента США и программа «Freedom CAR». Суммарные инвестиции в эти проекты составляют до 1,7 млрд долл. (из которых 1,2 млрд долл. выделено Президентом Дж. Бушем), распределенные на 5 лет. Показательно, что финансирование и координация указанных проектов осуществляются DOE совместно с крупнейшими автомобильными компаниями США: Daimler Chrysler Corp., Ford Motor Co. и General Motors Corp. Другими важными компонентами комплексной водородной программы DOE являются программы исследований и разработок в области использования энергии ветра и гидроресурсов, геотермальных источников энергии, технологий солнечной энергетики, использования биомассы и ряд других. Фактический бюджет водородных разработок в США составил 92 млн долл. за 2003 г., 147,2 млн долл. за 2004 г. и 172,8 млн долл. в 2005 г.

Основными элементами водородной программы США являются:

- производство водорода из отечественных ресурсов (биомасса; энергия ветра и солнца; ядерная и, в перспективе, термоядерная энерге-



- тика) с минимальным ущербом для окружающей среды. Также рассматриваются варианты производства водорода из природного газа и угля;
- распределение водорода потребителям от централизованных или распределенных мест его производства;
  - хранение водорода либо веществ, из которых он может быть произведен на месте потребления, на транспортных средствах либо в системах распределения;
  - конвертирование водорода в электроэнергию либо теплоту с помощью топливных элементов; непосредственное использование водорода как рабочего тела двигателей и энергоустановок, а также для вспомогательных энергосистем в двигателях, стационарных и портативных приложениях;
  - подтверждение работоспособности технологий и систем в режиме их реальной эксплуатации;
  - обеспечение безопасности разрабатываемых технологий как на уровне разработок, так и на уровне реализации в соответствующих сегментах рынка;
  - разработка образцов правил и стандартов на производство, распределение, хранение и использование водорода на региональном и международном уровнях;
  - организация системы образования учителей и студентов; государственных и местных правительств; официальных лиц; конечных потребителей и широкой общественности — о водородной экономике и ее воздействии на них;
  - обеспечение понимания сложных взаимодействий между компонентами водородных систем, их стоимостью, энергетической эффективностью, воздействием на окружающую среду, социальными и экономическими факторами.

Стратегия развития водородной экономики в США (рис. 12.3) предусматривает постепенный переход от поддерживаемых правительством научных исследований и разработок к созданию конкурентоспособных на американском и международном рынках технологий, с их коммерциализацией и внедрением.

По мере протекания указанного процесса в него будут широко вовлекаться промышленный и финансовый секторы. Развитие водородной экономики США предусматривает четыре этапа. На первом должны быть разработаны критические технологии, которые обеспечат практическую реализацию поставленных стратегических целей. Работы, которые сейчас ведутся на данном этапе учеными и инженерами, работающими в государственном и частном секторах, к 2015 г. должны будут привести к выработке инженерных решений, реализованных в демонстрационных образцах техники и оборудо-

дования; разработке и принятию исчерпывающих правил безопасности; установлению соответствующих стандартов и технических условий. Тем самым будет осуществлена подготовка к широкомасштабным инвестициям в водородную инфраструктуру и началу ее коммерческой реализации. Решение по данному вопросу должно быть принято в 2015 г., после чего исследовательские работы будут продолжены в направлении совершенствования разработанных технологий производства водорода.

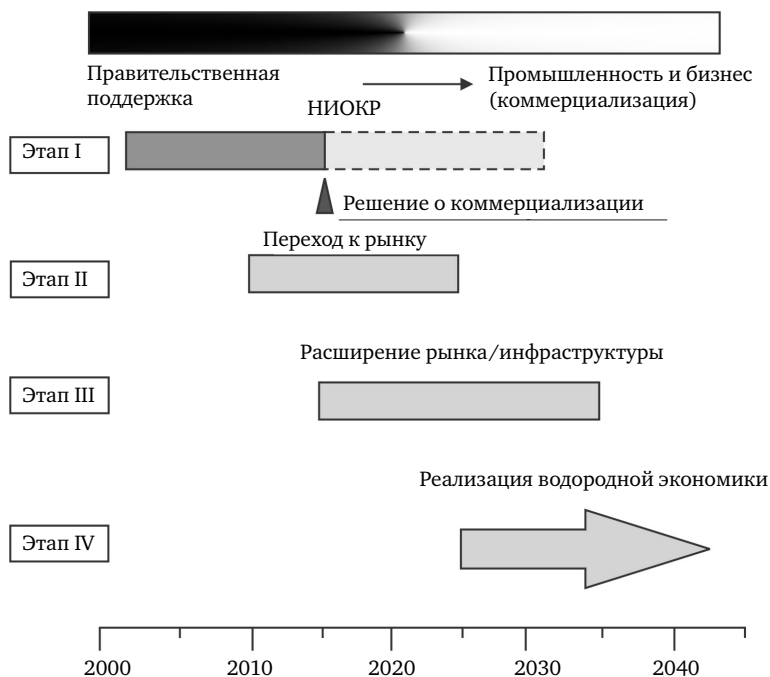


Рис. 12.3. Стратегия развития водородной экономики в США

Второй этап связан с началом коммерциализации энергетических и транспортных систем, использующих водород. Становление рынка водородных технологий на данном этапе (2010–2025 гг.) будет проходить при значительной поддержке правительства, как в виде прямых инвестиций, так и принятия политических решений, стимулирующих расширение данного рынка. С 2015 г. начнется третий этап реализации водородной программы, предусматривающий создание к 2035 г. инфраструктуры водородной экономики и расширение уже созданных рынков водородных технологий. Начало третьего этапа будет согласовано с принятием решения о коммерциализации водородных технологий, в первую очередь применительно к транспортным средствам на топливных элементах. Соответствующие инвестиции планируется в основном привлекать из бизнеса (при опеке правительства).

Внедрение водородных технологий в ходе выполнения работ по этапам I–III будет сопровождаться их дальнейшим совершенствованием как в техническом плане (удовлетворение требований потребителей), так и в экономическом (переход к самоокупаемости и возврат инвестиций в виде прибыли). Последний процесс связан с началом (в 2025 г.) четвертого этапа водородной программы, на котором к 2040 г. будут полностью сформированы самодостаточные рынок и инфраструктура и тем самым осуществлен полный переход к водородной экономике. В результате потребность США в нефти должна снизиться на 11 млн баррелей в день, а ежегодные выбросы парниковых газов в атмосферу должны уменьшиться более чем на 500 млн т.

Водородная программа США предусматривает детальные проработки по всему комплексу проблем водородной экономики и водородных энерго-технологий. Поскольку, как уже отмечалось, она в основном ориентирована на использование водорода как топлива для автотранспорта, ее основными особенностями являются приоритет работ по мобильным энергоустановкам на топливных элементах, а также высокий уровень требований к характеристикам разрабатываемых систем хранения водорода, которые должны удовлетворять требованиям мобильных приложений. Основным результатом выполнения данной программы должна стать конкурентоспособность водородного автотранспорта на топливных элементах с традиционными автомобилями, использующими бензиновое топливо и двигатели внутреннего сгорания. Это, в частности, означает снижение стоимости водорода в 3–4 раза и стоимости 1 кВт установленной мощности топливных элементов более чем в 10 раз по сравнению с нынешним уровнем.

*Япония.* В настоящее время основные работы, ведущиеся в Японии в области водородных технологий и топливных элементов, курируются Министерством экономики, торговли и промышленности (METI). Работы главным образом направлены на создание инфраструктуры и широкое внедрение как стационарных энергоустановок на топливных элементах, так и, в особенности, на перевод автотранспорта на водородное топливо и топливные элементы. Программа METI предусматривает увеличение суммарной мощности стационарных энергоустановок на ТЭ с 2,2 ГВт в 2010 г. до 10 ГВт в 2020 г. и 12,5 ГВт в 2030 г. Соответствующее число единиц автомобильной техники на ТЭ планируется на уровне 50 тыс. (2010 г.), 5 млн (2020 г.) и 15 млн (2030 г.); годовое потребление водорода составит 6 (2010 г.), 28,5 (2020 г.) и 46 (2030 г.) млрд м<sup>3</sup>.

С этой целью Правительством Японии предусматриваются значительные инвестиции в работы по топливным элементам и водороду. Так, бюджет METI на данные работы увеличился от 11,5 млрд йен (106 млн долл. США) в 2001 до 32,9 млрд йен (303 млн долл. США) в 2004 г. Работы по программе METI проводятся в три этапа. На первом (2002–2005 гг.) проводились детальные исследования и разработки, начат пересмотр нормативов

и правил, относящихся к производству, хранению и использованию водорода, а также проведены первые демонстрационные работы по внедрению водородной инфраструктуры. Так на март 2004 г. в Японии функционировало 30 стационарных водородных энергоустановок на ТЭ, 10 водородных заправочных станций для автотранспорта и эксплуатировалось около 50 единиц автотранспортной техники (в частности, предназначенных для обслуживания Правительства) с ТЭ на водородном топливе. Второй этап (2005–2010 гг.) предусматривает расширение внедрения водородных энерготехнологий с постепенным построением их полной инфраструктуры. Третий этап (2020–2030 гг.) предусматривает естественное развитие водородной экономики с переносом источника инвестиций из госбюджета в бизнес-структуры.

Исследования и разработки в области водородных энерготехнологий в Японии проводятся как в государственных университетах и научных лабораториях, так и в исследовательских подразделениях крупных автомобильных (Toyota, Honda, Mitsubishi, Nissan) и металлургических — машиностроительных Japan Metals and Chemicals, Japan Steel Works и др. компаний.

Помимо стационарных энергетических и автотранспортных приложений, в водородных программах Японии большое внимание уделяется использованию водородных технологий в промышленности и бытовом секторе. В частности, это использование металлгидридных технологий, связанное с преобразованием и транспортировкой теплоты.

*Сенсацционная информация из JAERI.* Японский институт атомной энергии (JAERI) имеет в Огаи высокотемпературный исследовательский реактор HTTR (тепловая мощность 30 МВт). Из пяти этажей здания реактора (48 м · 50 м) три — подземные. Строительство началось в 1991 г., критичность впервые достигнута в 1998 г. В 2001 г. температура на выходе реактора была доведена до 850 °С. После получения от правительства разрешения на эксплуатацию реактора проводились испытания безопасности с тем, чтобы продемонстрировать внутренне присущие свойства безопасности, а также получить данные по переходным процессам в реакторе не только для коммерческих высокотемпературных реакторов (HTR), но и для проекта VHTR, который является кандидатом в реакторы Поколения ГУ. В апреле 2004 г. в HTTR впервые в мире была достигнута максимальная температура теплоносителя на выходе реактора, равная 950 °С [43]. При такой температуре становится возможным эффективное производство энергии с помощью высокотемпературной газовой турбины, а также производство водорода из воды. HTTR — первый HTR в Японии и как исследовательский реактор имеет цели: 1) установление основных технологий HTR; 2) демонстрация безопасности HTR и свойств внутренне присущей безопасности; 3) демонстрация процесса использования ядерного тепла; 4) облучение топлива и материалов в активной зоне.

В НТТР использованы графитовый замедлитель и гелиевый теплоноситель. Топливные сборки — шестиугольные блоки графита поперечным размером 360 мм и высотой 580 мм. Призматическому типу блока отдано предпочтение перед развитым в Германии проектом насыпной зоны, потому что он является более подходящим для масштабирования до реакторов большой мощности. Главными элементами первого контура являются промежуточный теплообменник (ИНХ), охладитель с водой под давлением (РРWC) и концентрический высокотемпературный газовый тракт. Теплоноситель первого контура (гелий) с температурой до 950 °С течет от реактора по внутренней трубе концентрического высокотемпературного газового тракта к ИНХ и РРWC. НТТР имеет два режима эксплуатации: 1) операции со сосредоточенной нагрузкой и использованием для теплообмена только РРWC (в этом режиме подтверждены почти все основные рабочие характеристики системы); 2) операции с параллельной нагрузкой и использованием как РРWC, так и ШХ. Второй гелиевый контур с ИНХ будет применен для подвода тепловой энергии к системе разложения воды посредством процесса IS. Максимальная температура топлива была оценена на основе данных измерений в ходе эксплуатации реактора при 950 °С, ее значение оказалось равным 1478 °С, что не превышает нормальный эксплуатационный лимит (1495 °С).

В результате исследований технологий производства водорода с использованием ядерной энергии в JAERI был отобран процесс IS как важный приоритет исследований. Работы развиваются в четыре этапа. На начальном, экспериментальном этапе в 1997 г. была проверена теория: водород получали с производительностью 1 л/ч. На втором этапе в лабораторном масштабе в 1999–2004 гг. была успешно развита автоматическая система с темпом производства 30 л/ч. Третий этап — испытание пилотной установки производительностью 30 м<sup>3</sup>/ч при расходе 0,4 МВт передаваемой гелием тепловой энергии, причем установка работает в промышленных условиях (по материалам, давлению и температуре). Четвертый этап — это система НТТР-IS, в которой будут объединены реактор промышленного масштаба и химический завод производительностью 1000 м<sup>3</sup>/ч после обоснования безопасности этой системы.

Недавно предложенная концепция системы GTHTTR300С для совместного производства водорода и электроэнергии базируется на НТТР и производстве электричества с использованием прямого газотурбинного цикла, совмещенного с производством водорода на основе процесса IS. НТТР с максимальной мощностью 600 МВт и выходной температурой теплоносителя 950 °С обладает пассивной безопасностью. Отношение когенерации водорода к электричеству должно соответствовать прогнозируемому спросу на оба эти продукта в 2020–2030 гг., когда, как ожидается, начнется развертывание первых таких установок.

*Европейское Сообщество.* Начало широкомасштабной активности ЕС в области водородных технологий можно отнести к 1999–2001 гг., когда была создана Европейская тематическая сеть по водородной энергетике (Hy-Net). Данная группа объединяет представителей Европейской науки и промышленности (включая Norsk Hydro, Shell Hydrogen, Air Products, BMW и другие крупные компании). Основным направлением ее деятельности является выработка единой стратегии развития водородной энергетики в странах Европы и внесение соответствующих предложений в официальные структуры ЕС. В 2002–2003 гг. группа способствовала выработке комплексной программы ЕС (FP6 R&D program) в части, относящейся к водороду, топливным элементам и работам в области возобновляемых источников энергии.

Основными целями водородных программ ЕС является снижение зависимости экономики от импорта ближневосточной нефти, сокращение выбросов в атмосферу, сохранение лидерства в области наукоемких технологий, а также увеличение доли возобновляемых источников энергии в балансе стран Европы с 6% в 2000 г. до 12% в 2010 г. и 33% в 2020 г.

Программа перехода стран ЕС от экономики, ориентированной на использование органических топлив, к водородной экономике рассчитана на 50 лет (2000–2050 гг.) и включает два основных этапа: I (2000–2020 гг.) — исследования, разработки и создание демонстрационных прототипов водородных энергосистем; и II (2020–2050 гг.) — широкомасштабная коммерциализация технологий, основанных на водороде и топливных элементах. Работы проводятся по двум основным направлениям (последовательность внутри каждого направления показана в хронологическом порядке, предусмотренным Программой):

1. Производство и распределение водорода.
2. Производство водорода конверсией природного газа и электролизом воды.
3. Начало создания региональных элементов водородной инфраструктуры — заправочные станции и распределенное производство водорода для них.
4. Региональные трубопроводные сети распределения водорода и взаимодействие между ними.
5. Производство водорода из возобновляемых источников, включая газификацию биомассы.
6. Модернизация технологий производства водорода из органического сырья с улавливанием CO<sub>2</sub>, а также на основе ядерной энергетики.
7. Прямое производство водорода на основе возобновляемых источников.
8. Системы потребления водорода и топливные элементы.
9. Стационарные коммерческие системы на низкотемпературных ТЭ (до 50 кВт).

10. Стационарные системы на высокотемпературных ТЭ (до 500 кВт).
11. Водородный автотранспорт на ДВС.
12. Демонстрационные автобусы на водородном топливе.
13. Водородный транспорт на ТЭ.
14. Снижение стоимости и коммерциализация стационарных и мобильных энергоустановок на ТЭ: портативные источники тока, автомобильный транспорт, крупные (до 10 МВт) энергоустановки.
15. Автономные энергосистемы на ТЭ.
16. Использование водорода в авиации.

Финансирование НИОКР по водородной тематике осуществляется из фондов ЕС на конкурсной основе. Так, в рамках программы FP6 в 2003 г. было выделено 1 млн евро на водородные проекты и 1 млн евро на проекты по топливным элементам. Дальнейшие инвестиции предусматривают выделение порядка 2,8 млрд евро на период 2005–2015 гг., включая разработку технологий производства водорода и электроэнергии из углеводородных топлив с утилизацией CO<sub>2</sub> (1,3 млрд), а также производство водорода из возобновляемых источников энергии и его стационарное и транспортное использование (1,5 млрд). Частичное финансирование соответствующих исследований и разработок также осуществляется коммерческими компаниями, участвующими в выполнении соответствующих проектов.

Оценка общих инвестиций в водородные программы ЕС составляет от 4 до 15 млрд евро. В результате выполнения водородных программ производство водорода в странах ЕС планируется увеличить с 2,3 млрд м<sup>3</sup> в 2000 г. до 20,6 млрд м<sup>3</sup> в 2025 г. Количество автомобилей, работающих на водороде, к 2020 году должно составить 2 млн (1 % общего автопарка) при потреблении ими порядка 300 тыс. т водородного топлива в год. Общая доля водорода в топливном балансе стран ЕС должна составить 2 % к 2015 г. и 5 % — к 2020 году.

Важный вклад в развитие водородных технологий в странах Европы также вносят отраслевые программы соответствующей направленности, финансируемые и координируемые Международным энергетическим агентством (IEA), Европейским космическим агентством (ESA) и рядом других организаций. Большое значение также имеют работы по двусторонним соглашениям ЕС с другими странами, в частности, Канадой.

*Страны Северной Европы.* Активно участвуя в водородных программах ЕС, страны северной Европы (включая те из них, которые формально не являются членами Сообщества) в то же время имеют целый ряд собственных национальных и межгосударственных водородных программ. Наибольшую активность в этом отношении проявляют государства, энергетика которых базируется на использовании возобновляемых источников энергии — гидро (Норвегия) и геотермальных (Исландия).

В Норвегии водородные разработки в основном финансируются Советом по исследованиям в энергетике (Nordisk energiforsking, NEF), имеющим



статус правительственного учреждения. Планируемый бюджет исследований и разработок в рамках водородной программы NEF составляет 120–200 млн крон (17–29 млн долл. США) на период до 2010 г. и 50–100 млн крон (7–14 млн долл. США) — на 2010–2014 гг. Госбюджетное финансирование составляет 50%, остальные 50% вносят промышленные и бизнес-структуры, являющиеся участниками проектов. Работы в основном ориентированы на производство водорода (в том числе, для экспорта), его хранение и распределение, а также на создание автономных энергосистем, использующих возобновляемые источники энергии, и их компонентов. Помимо работ, выполняемых в рамках национальных проектов и программ ЕС, часть исследований и разработок ведется в рамках двусторонних соглашений Норвегии с США и Японией.

Особое внимание развитию водородной энергетики и технологии уделяется в Исландии. В настоящее время вклад возобновляемых энергоресурсов (гидро и геотермальных) в энергетику Исландии является определяющим. В то же время потребности в топливе для автотранспорта и флота (главным образом рыболовного) удовлетворяются только за счет импорта нефтепродуктов. Основной стратегической целью водородной программы Исландии является снижение зависимости страны от этого импорта путем перевода автотранспорта и рыболовного флота на водородное топливо, получаемое за счет имеющихся возобновляемых энергоресурсов. Данное направление с 1998 года является приоритетом политики страны и поддерживается на уровне национального Правительства. В результате реализации водородной программы Исландия должна к 2030 году стать первой страной в мире, где полностью реализована концепция и построена инфраструктура водородной экономики. С этой целью в 1999 г. в стране создан концерн Iceland New Energy Ltd (INE), 51% акций которого принадлежит Исландским государственным (преимущественно) учреждениям и частным фирмам, а остальные 49% — крупным иностранным компаниям, осуществляющим водородные разработки (Shell Hydrogen, Norsk Hydro, Daimler Chrysler — по 16,33%). В настоящее время интенсивно ведутся работы по реализации Программы, включая, в частности, эксплуатацию водородных автобусов с топливными элементами на городских маршрутах столицы. Одна из составляющих водородной транспортной инфраструктуры — заправочная станция в Рейкьявике, характерной особенностью которой является получение водорода на месте электролизом и его дальнейшая подача в промежуточную систему хранения (газ под давлением 40 МПа).

*Китай.* Большое внимание исследованиям и разработкам в области водородной энергетики уделяется в развивающихся странах. Особое место среди них занимает Китай — наиболее крупная и динамично развивающаяся из этих стран. Являясь одним из крупнейших в мире импортеров нефти (в перспективе — и природного газа), Китай крайне заинтересован в изме-



нении структуры своего энергорынка, направленной на сокращение потребления данных видов природных энергоносителей. Одним из путей такой реструктуризации могло бы стать дальнейшее расширение использования угля, который и в настоящее время занимает значительную долю в энергобалансе страны (71,5% на 1997 г.). Однако такой подход сопряжен с необходимостью кардинального усовершенствования технологий использования угля, направленных на снижение вредных выбросов в атмосферу: на сегодняшний день Китай занимает второе (после США) место в мире по выбро-

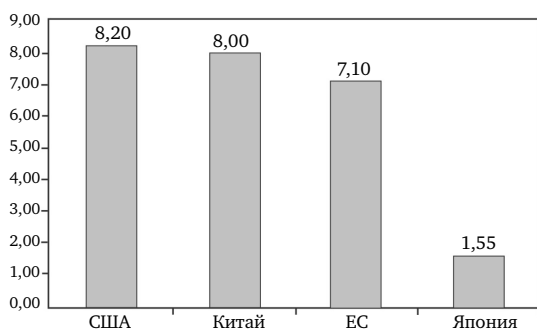


Рис. 12.4. Производство водорода в 2002 году, млн т

сам  $\text{CO}_2$  и как страна, подписавшая Киотский Протокол, должен принимать меры по сокращению этих выбросов.

Радикальным путем решения указанных проблем, по мнению Правительства Китая, является постепенный переход к водородной экономике, для построения которой Китай имеет все предпосылки. Эта страна является вторым в мире производителем водорода (рис. 12.4), имеет хорошо

освоенные технологии его производства (в том числе методом электролиза), извлечения и очистки, конечного использования.

В числе последних — освоенные на промышленном уровне новые наукоемкие технологии, в частности, металлгидридная (Китай является одним из крупнейших производителей и экспортеров гидридообразующих материалов на основе редкоземельных элементов).

В настоящее время исследованиями и разработками в области водородных энерготехнологий в Китае занимаются десятки университетов и НИИ. Работы по водородной энергетике выделены отдельной строкой в пятилетнем плане развития науки и технологий Китая (Программа № 973 Министерства науки и технологий). Общие инвестиции государства в работы по водороду и топливным элементам в настоящее время оцениваются в пределах 2,4–3,8 млрд юаней (290–460 млн долл. США). К указанным работам широко привлекаются промышленность и бизнес, большое внимание уделяется работам в рамках международного сотрудничества. Показательна высокая активность китайского бизнеса, проявляемая в настоящее время на европейском рынке возобновляемых источников энергии.

*Российская Федерация.* Ядро экономики и основа бюджета нынешней России строятся на зависимости ряда стран от импорта российской нефти и газа. Работы, проводимые в мире в области водородной энергетике, направлены на снижение такой зависимости. Российские правительственные

и деловые круги понимают, что необходимо быть готовым к такому повороту событий во избежание депрессионной модели развития страны. Россия имеет высокий научный потенциал и контролирует 50 % мирового производства палладия, использование которого необходимо для реализации целого ряда водородных технологий. Это очень благоприятная ситуация для развития водородной энергетики в России. Основной целью российских водородных программ является создание к 2010–2012 гг. конкурентоспособных экспортно-ориентированных разработок в данной области. Политика финансирования данных разработок предусматривает инвестиции крупных (нефтяных, газовых и энергетических) компаний совместно с государственными ресурсами.

10 ноября 2003 г. Президент РАН Осипов Ю. С. и Генеральный директор ГМК «Норильский никель» Прохоров М. Д. подписали соглашение о сотрудничестве, в соответствии с которым инвестиции ГМК «Норильский никель» в исследования по водородной энергетике будут составлять 40 млн долл. США в год. «Комплексная программа поисковых, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по водородной энергетике и топливным элементам», разработанная в рамках данного соглашения, была подписана 9 декабря 2003 г. Программа предусматривает:

- исследования по расширению направления промышленного использования палладия и разработку перспективных технологических процессов по изготовлению продукции на его основе;
- создание научно-технического, технологического и конструкторского задела по ключевым устройствам, агрегатам и системам водородной энергетики и ТЭ с характеристиками, превосходящими зарубежные аналоги, в т. ч. твердополимерных, щелочных и твердооксидных ТЭ;
- создание топливных процессоров для конверсии углеводородных топлив и получения водорода;
- создание комплексов по производству, очистке, аккумулированию, хранению и транспортировке водорода;
- разработку промышленной технологии изготовления элементной базы и новых материалов для водородной энергетики и автономных энергоустановок с ТЭ различных типов;
- создание унифицированного ряда высокоэффективных экологически чистых энергоустановок и электрохимических генераторов водорода широкого класса на основе ТЭ мощностью от 1 до 25 кВт;
- создание портативных источников тока на основе ТЭ для бытовой электронной аппаратуры;
- формирование базовой кооперации научных организаций РАН и промышленных предприятий для производства конкурентоспособных энергоустановок на основе ТЭ и высокотехнологичной продукции на основе использования палладия и металлов платиновой группы;

- подготовку предложений по развитию национальной инфраструктуры водородной энергетики;
- разработку предложений по формированию национальной программы по водородной энергетике и ТЭ, по вариантам и схемам финансирования работ по этой программе с использованием материальных и финансовых ресурсов частного бизнеса.

Программа содержит 5 разделов, подробно представляющих исследования, направленные на реализацию этих целей. Предусматривается ежегодное уточнение и корректировка программы в зависимости от выполнения отдельных проектов.

Помимо указанной, существует еще несколько крупных российских водородных программ. Так, весной 2002 г. была принята программа, направленная на создание коммерческих энергоустановок на ТЭ (РАН, МНТЦ, Минатомпром, Газпром). Общий объем поддержки МНТЦ на водородную тематику составляет 35 млн долл. США. Кроме этого, имеет место финансирование российских водородных разработок рядом зарубежных компаний.

*Международное сотрудничество.* Приведенный перечень национальных водородных программ является далеко не полным. В реализации концепции водородных энергосистем активно участвуют и многие другие страны: Канада, Австралия, Новая Зеландия, Бразилия, Индия и т. д. В водородных разработках участвуют практически все ведущие автомобильные компании мира и целый ряд транснациональных нефтегазовых корпораций (Royal Dutch\Shell, ExxonMobil, Texaco, British Petroleum и др.).

Большую роль в выполнении данных работ играет международное сотрудничество, осуществляемое в рамках двусторонних и многосторонних соглашений, программ крупных международных организаций, таких как уже упоминавшиеся Международное энергетическое агентство (IEA), Международная ассоциация по водородной энергетике (IAHE) и т. п.

Чтобы стимулировать, направлять и координировать международное сотрудничество, нацеленное на формирование национальных экономик, которые будут основаны на водородной энергетике и технологиях, в ноябре 2003 года в Вашингтоне 14 стран и ЕС (3,5 млрд жителей, 85% общемирового ВВП) учредили Межгосударственное партнерство по водородной экономике. Данная межправительственная организация, открытая для принятия в нее новых членов, осуществляет координацию существующих и способствует выработке новых национальных и международных программ, направленных на создание и широкомасштабное внедрение высокоэффективных водородных технологий.

*Заключение.* Характеризуя современное состояние водородной энергетики и технологии, следует отметить качественные изменения, произошедшие за последнее десятилетие в этой области. Если ранее основное внимание уделялось научным, технологическим и энергетическим аспектам, то в на-

стоящее время на первый план выходят экологические, экономические и политические составляющие проблемы создания межотраслевой инфраструктуры, обеспечивающей широкомасштабное использование водорода.

Зародившаяся на фоне мирового нефтяного кризиса 1970-х гг. концепция водородных энергосистем к настоящему времени переросла в динамично развивающееся научно-техническое направление, поддержка которого возведена в ранг приоритетов политики международных сообществ, национальных правительств, руководства коммерческих компаний и общественных организаций.

---

## 13. Основные направления научно-поисковых работ в области водородной энергетики

---

**В** настоящее время ископаемые виды топлива составляют около 90 % мирового потребления энергоресурсов, в том числе нефть ~ 40 %, уголь ~ 27 %, природный газ ~ 23 %. Таким образом, около 85–90 % энергии мир получает, сжигая ископаемое топливо, и только ~10–15 % — от нетрадиционных источников энергии (атомная, ветровая и приливная энергии, геотермальные воды). Получается, что основным источником энергии в мире до настоящего времени является горение углеводородных топлив.

Одной из важнейших задач современности является коренная экологическая реорганизация промышленности и энергетики. «Декарбонизация» современной энергетики неизбежна из-за экономических проблем (невосполнимое истощение запасов углеводородных горючих: угля, нефти и газа) и экологических последствий выбросов в атмосферу углекислого газа (парниковый эффект), оксидов азота и серы (кислотные дожди).

По оценке экспертов, доступной нефти на Земле хватит лишь до 2030 г. (мнение пессимистов) или до 2050 г. (мнение оптимистов), а газа — до 2060–2080 гг. (не говоря о том, что уже к 2020 г. баррель нефти будет стоить более 150 долл., а 1000 м<sup>3</sup> газа — более 500 долл.) и т. д.

Поэтому мировому сообществу необходимо осуществить:

1. Завершить максимальное использование альтернативных экологически чистых *возобновляемых источников энергии* (ВИЭ) — солнца, ветра, малых и средних рек океанских приливов и др., что покроеет до 15–20 % потребности в энергии. Мировым лидером в ветроэнергетике является Германия: общая установленная мощность ее «ветряков» — около 5 тыс. МВт; в малой гидроэнергетике мировым лидером является Китай, где с 1950 по 2004 г. общая мощность малых ГЭС выросла с 6 до 35000 МВт.

Обратите внимание: средний поток солнечной энергии на Землю составляет 200–250 Вт/м<sup>2</sup>, в то же время на хозяйственную деятельность человека необходимо всего 2 Вт/м<sup>2</sup> в неиндустриальных районах и не более 15–20 Вт/м<sup>2</sup> — в высокоиндустриальных, т. е. достаточно использовать от 1–2 до 8–10 % только солнечной энергии, чтобы полностью удовлетворить энергетические потребности человечества. При этом средний КПД

солнечных «нагревательных» коллекторов — 50%, если же электроэнергию получать напрямую через кремниевые солнечные батареи, то средний КПД — 25%. Поэтому сейчас осваивается серийное производство солнечных фотоэлектрических батарей на основе так называемых «наногетероэлектриков» (НГЭ) с КПД 85–90% (и способностью работать даже ночью!), для чего, прежде всего, будет освоено производство сверхчистых (степень очистки 10–7% и более) редкоземельных металлов (германий, галлий, скандий, индий и др.) — это разработка Российской Академии Наук.

Таблица 13.1

### Ресурсы возобновляемой энергии

| Источник энергии   | Мировые ресурсы, млрд ТВт · год |
|--|---------------------------------|
| Солнечное излучение на поверхности земли                 | 100                             |
| Стоки рек, морские волны и приливы                       | 15                              |
| Ветер  | 5                               |
| «Зеленая масса», отходы животноводства, ТБО, хозбытстоки | 0,5–1                           |
| Земные недра (термальные воды)                           | 0,05                            |

2. Все органические отходы (муниципальные, древесно-целлюлозные, отходы животноводства и птицеводства, осадки (илы) городских канализационных коллекторов, «зеленые отходы» — ботва, кочаны, картофельные очистки, садово-парковые, и др.) будут перерабатывать (с помощью микроорганизмов) на биогаз и биоэтанол, что покроет до 10–15% потребности в энергоносителях. Биоэтанол — альтернатива бензину, точнее, используют смесь бензина с этанолом (газохол); Бразилия, например, произвела из «зеленой» массы» в 2004 г. 7 млрд л биоэтанола, что обеспечило 20% ее потребностей в моторном топливе.

Кроме того, перспективным направлением является получение бензина, дизтоплива и топочного мазута (а также ценных смол для органического синтеза) из низкокалорийного природного твердого топлива — «молодого» каменного угля, бурого угля, торфа и сланца, запасы которых хотя в принципе и исчерпаемы, однако на ближайшие лет на 200–300 их хватит с лихвой. В ЮАР фирма «Sasol» уже перерабатывает около 50 млн тонн угля (по схеме «Фишера-Тропша»), производя 7–8 млн тонн жидкого топлива. Китай к 2015 г. планирует производить из угля не менее одного миллиона баррелей дизтоплива в день.

Общемировые инвестиции в эту проблему превысили 15 млрд долларов. Кроме того, заслуживают внимания также технологии газификации угля с получением высококалорийного горючего газа, богатого водородом. Удачная установка газификации угля создана корпорацией «Энерготрансинвест» под руководством Евгения Сухина (Украина).

Это все означает, что нужно перестать смотреть на уголь как на дешевое топливо, так как уголь — это, прежде всего, ценное химическое сырье!

*Из 1 млн т подготовленного угля можно получить ок. 500 тыс. т «угольной нефти» или ок. 2 млрд м<sup>3</sup> «синтез-газа» (и еще 500 тыс. т «шлама» в виде водоугольного топлива — ВУТ).*

3. Атомные электростанции (АЭС) в XXI веке все еще будут играть важную роль и производить 20–35 % мировой электроэнергии. Уже сегодня в мире функционируют 440 ядерных реакторов, 104 из которых — в США. АЭС XXI века перейдут на использование в качестве теплоносителя глубоко охлажденного гелия, который, забирая тепло от ядерного реактора, с помощью газовой турбины так называемого «замкнутого цикла Брайтона», будет превращать тепло в электроэнергию с КПД более 50 % (против нынешних 30–35 %). Такая система называется «Gas Turbine — Modular Helium Reactor» (GT-MHR).

При этом возможно размещение турбогенератора и реактора в закрытых капсулах под землей. Применение в качестве теплоносителя гелия сулит ряд преимуществ. Он химически инертен и не вызывает коррозию узлов, не меняет своего агрегатного состояния, не влияет на коэффициент размножения нейтронов; наконец, его удобно направлять в газовую турбину. Кроме того, достигается намного более полная выработка ядерного топлива (а значит — меньше высокоактивных отходов), а простота конструкции обеспечивает намного меньшие капитальные затраты. И, конечно, безопасность — авторы проекта (компания General Atomics, США и Агентство по атомной энергии России) пишут, что GTMHR — будет единственной в мире АЭС, которая соответствует первому (низшему) уровню безопасности.

Росэнергоатом приступает к созданию серии плавучих атомных электростанций (ПАЭС) мощностью до 40 МВт для обслуживания северных территорий. Срок службы таких ПАЭС — 50 лет, перезагрузка ядерного топлива — раз в 10 лет. Кроме того, все ранее построенные (а тем более новые) АЭС будут оснащены ядерными реакторами-утилизаторами (дожигателями) отработанного ядерного топлива — ОЯТ (очень хорошие разработанные Россией БН-600 и БН-800). Суть технологии — облучение ОЯТ мощным пучком быстрых нейтронов в специальных промышленных ускорителях (бридерная технология — от слова «breeding»). При этом, во-первых, высокоактивные и долгоживущие изотопы в ОЯТ превращаются в короткоживущие и низкоактивные, что делает проблему захоронения такого дожженного ОЯТ в тысячи раз безопаснее, проще и дешевле. Во-вторых, при этом процессе в ядерном утилизаторе выделяется немалое количество дополнительной энергии (одна тонна ОЯТ дает до 1 тыс. дополнительных кВт), т. е. производительность ядерного топлива увеличивается на 15–25 %, а ОЯТ из источника головной боли становятся источником энергии. Еще одно достоинство «бридеров» состоит в потенциальной возможности сжи-

гания опасного (в политическом смысле!) оружейного плутония. Иными словами — речь идет о создании замкнутого цикла по ядерному топливу.

4. Остальные 40–50 % электроэнергии будут производить мощные установки термоядерного синтеза, работающие на изотопе водорода — дейтерии (с добавлением трития). В отличие от ядерной, термоядерная энергия практически не таит радиационной угрозы и нового Чернобыля.

В настоящее время консорциум США — ЕС — Япония — Россия строит во Франции полупромышленный термоядерный реактор ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Но еще большие перспективы имеет термоядерный синтез при помощи тяжелых ионов («heavy ion fusion» — HIF), разрабатываемый в Berkeley Lab (США).

Еще одно перспективное (но более «отдаленное») направление — холодный термоядерный синтез. Суть такой технологии в следующем: сквозь жидкость пропускают сверхинтенсивные ультразвуковые волны, производя эффект типа акустической кавитации (сонолюминесценции), т. е. при прохождении ультразвука через жидкость (при ряде условий) волны плотности вызывают явление сродни кавитации — быстрый рост (до 2 мм) и стремительное же схлопывание миниатюрных пузырьков газа, растворенного в этой жидкости, либо — паров самой жидкости (рис. 13.1). Стенки этих пузырьков устремляются навстречу друг другу со скоростью до полутора километров в секунду, а ударная волна разогревает газ внутри до 10 млн градусов (это сопоставимо с температурой ядра Солнца). Исследователи использовали звуковые волны с частотой 20–40 кГц, направленные на сосуд с концентрированной серной кислотой, содержащей аргон. Ученые утверждают, что есть надежда добиться того, что выделяемой энергии может оказаться достаточно для осуществления термоядерного синтеза (эти исследования ведутся в Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA).

Однако Россия предложила куда более грандиозный проект: использовать для термоядерного синтеза абсолютно нерадиоактивный изотоп «гелий-3», одна тонна которого дает энергию, равную 14 млн тонн нефти. «Гелия-3» на Земле практически нет, зато огромные его запасы имеются на Луне! Там Россия и собирается (к 2020 г.) построить шахту и добывать «гелий-3». Один рейс российского космического корабля «Прогресс» обеспечит всю Россию «гелием-3» на целый год!

5. Электроэнергия (высокого напряжения) будет транспортиро-

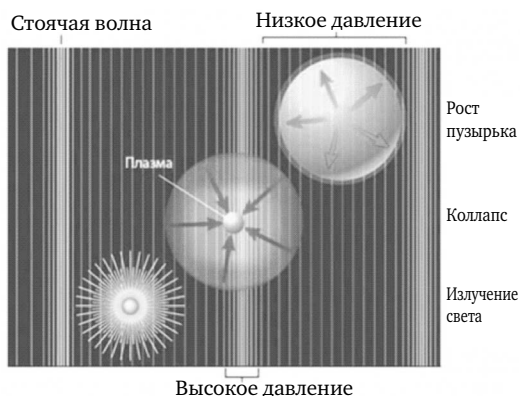


Рис. 13.1. Принцип сонолюминесценции



ваться по однопроводным линиям электропередач (эту идею впервые высказал еще 100 лет назад выдающийся физик Никола Тесла). Суть этой идеи в том, что электроэнергия передается с помощью реактивного емкостного тока в резонансном режиме. Преимущества: два алюминиевых или медных провода заменяются одним стальным; потери электроэнергии в однопроводном кабеле близки к нулю; в таком кабеле невозможны короткие замыкания; несанкционированный отбор (воровство) энергии — исключено.

Освещение жилых и офисных помещений будет осуществляться современными 5-ваттными высокояркими светодиодами, которые обеспечивают такой же уровень освещенности, как нынешние 100-ваттные лампочки накаливания (но которые потребляют в 20 раз меньше энергии!) и имеют срок службы 10 лет.

6. На электронное и точное машиностроение большое влияние окажут нанотехнологии (возможность «молекулярной сборки»), что может частично или полностью исключить многие традиционные энергозатратные и экологически грязные циклы, такие как металлургический, а также цикл обработки металла (прокат, прессование, фрезерные и токарные работы, сварка и т. д.). Следует весьма серьезно относиться к этому, на первый взгляд, полуфантастическому направлению — ученые уже перешли «от слов к делу»! Так, группа исследователей из Cornell University (США) построила интегрированную био-НЭМС (НЭМС — наноэлектромеханическая система) — биомотор вращательного действия на основе фермента АТФазы. А исследователи из Berkeley University (США) сконструировали действующий электростатический наномотор размером 500 нанометров ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10^{-6} \text{ мм}$ ). Ротор наномотора изготовлен из золота и закреплен на многослойной нанотрубке (фуллерене). Подшипники образованы двумя нанотрубками, вставленными одна в другую. Толщина ротора — всего 10 нм. Два заряженных статора, тоже золотых, расположены на кремниевой поверхности. Еще одно достижение: пропуская через нанотрубку слабый электрический ток, ученые добились перемещения отдельных наночастиц индия (и др. металлов) вдоль нанотрубки. Подобным образом работает любой заводской конвейер, перемещая сборочные части от одного рабочего места к другому. Весной 2004 г. исследователям из University California (Лос Анджелес, США) удалось создать из органических молекул сложные молекулярные машины, которые были названы нанотехнологическими лифтами. Нанолифт состоит из молекулы-платформы, шахтой для которой является другая молекула. Плоская платформа соединена с тремя богатыми кислородом молекулами — «колечками». Кислотно-щелочная реакция используется, чтобы привести лифт в действие. Исследователи считают, что нанолифты могут применяться для управления химическими реакциями; пригодятся нанолифты также и при автоматизированной молекулярной сборке.

Одновременно с этим исследователи из Columbia University (Нью-Йорк, США) построили «шагающего» наноробота, используя оригинальный принцип: робот поочередно то присоединяет свои «ноги», состоящие из фрагментов ДНК, к базовой молекуле ДНК, то отсоединяет их от нее, продвигаясь таким образом вперед. Создание подобного двигающегося наноустройства — один из серьезных прорывов в построении наносистем. Кроме того, скорее всего изменится и традиционное «тяжелое машиностроение». Так, израильская компания «ApNano» уже создала новые материалы, которые многократно прочнее, легче и жаропрочнее стали, которые могут стать основой для необычайно прочной наноброни. Новые материалы названы «неорганические подобные фуллеренам наноструктуры» (inorganic fullerene-like nanostructures — IF). Они представляют собой сульфиды металлов; особенно перспективны такие материалы на основе титана. Эти материалы синтезированы в виде наночастиц — трубок и сфер — с поперечником всего в десятки атомов. Составленные из таких частиц материалы показывают необычайно высокую прочность и превосходную способность абсорбировать удар, сохраняя после воздействия начальную форму. Так, в опытах образцы IF на основе вольфрама останавливали стальные снаряды, летящие на скорости 1,5 км/с (при этом в точке удара создавалось давление до 250 т/см<sup>2</sup>), а также — выдерживали статическую нагрузку в 350 т/см<sup>2</sup>. IF-материалы будут использовать для строительных конструкций зданий и сооружений, для корпусов ракет, самолетов, морских судов, автомобилей, бронетехники и для других целей.

7. Все бензиновые и дизельные автомобили и «малый» водный транспорт, а также военная бронетехника будут работать на водородных топливных элементах. В США в 2004 г. уже открыты первые несколько «водородных заправок», а, например, фирма Honda (впрочем, как и все другие ведущие автофирмы мира) начала мелкосерийный выпуск электромобиля FCX на водородных топливных элементах Honda FC Stack с длиной пробега без заправки до 500 км (рис. 13.2). Впрочем, до 2010–2015 гг. будут популярны также и автомобили-гибриды, где сочетаются двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и мощный электроаккумулятор. Например, пятиместный гибрид Toyota Prius II имеет расход бензина в городе 2,8 л/100 км. Рабочий объем его 4-х-цилиндрового ДВС — 1,5 л, мощность — 76 лошадиных сил. Имеется также электродвигатель на постоянных магнитах, синхронный, мощностью 67 «лошадей». Зарядка аккумуляторных батарей идет сразу с двух сторон — от ДВС и от колес (при торможении). Изюминка машины — делитель мощности (планетарная трансмиссия). Общий КПД Prius II — 37%. Водород в автомобиле можно хранить тремя принципиальными способами: в сжатом виде (в облегченных сверхпрочных баллонах — 350 атм.), в сжиженном виде (в теплоизолированных емкостях) или в металл-гидридах. Ученые из Danmarks Tekniske Universitet (DTU) изобрели «водородные

таблетки», которые, по мнению авторов, перевернут представления людей об опасности использования водорода в автомобиле.

Новая технология хранения водорода обещает практически такую же плотность упаковки энергии, как у бака с бензином и абсолютную пожарную безопасность. И все это при невысоких затратах. Состоят эти

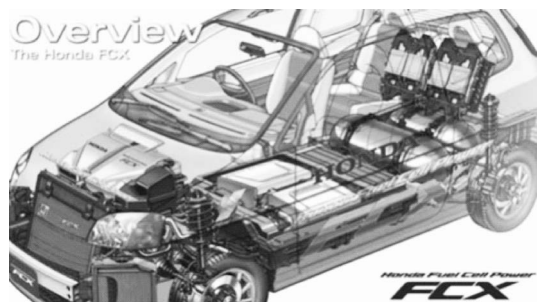


Рис. 13.2. Схема FCX: под капотом — электромотор и система управления, под передними сиденьями — топливные элементы, под задними сиденьями — баллоны с водородом, за спинками задних сидений — батареи суперконденсаторов

таблетки из аммиака, затем используется катализатор, который аммиак разлагает, освобождая водород. Когда таблетка пустеет, нужно просто накачать в нее новую порцию аммиака. Авторы изобретения основали компанию Amminex A/S для его коммерциализации. Они полагают новый способ «упаковки» водорода самым идеальным для применения на транспорте, а значит — важным шагом на пути к водородной энергетике.

*Важно, что выхлопы любых водородных двигателей являются экологически чистыми и содержат только водяной пар.*

Огромный прогресс имеет место в деле разработки аккумуляторов. Так, компания Toshiba разработала на основе нанотехнологий новый литий-ионный аккумулятор, который заряжается на 80 % емкости всего за 1 минуту — это как минимум в 60 раз быстрее, чем у современных аккумуляторов. Аккумуляторы будут предназначены для использования в автомобилях и промышленных устройствах, включая гибридные транспортные средства. Новые батареи будут иметь большой ресурс, теряя 1 % емкости только за 1000 циклов заряда-разряда. Также они смогут полноценно работать на морозе при  $-40^{\circ}\text{C}$ . Компания Peugeot Citroen уже создала водородную аккумуляторную «супербатарею» мощностью 80 кВт, которая к тому же имеет огромный ресурс.

Настоящий прорыв в деле широкого внедрения электромобилей осуществит «мотор-колесо» Шкондина (рис. 13.3) (компания Ultra Motor, Россия — Англия). Импульсно инерционный двигатель Шкондина состоит из стационарного постоянного магнита, прикрепленного к раме и окруженного тремя парами электромагнитов. Эти магниты находятся во вращающемся диске, закрепленном на колесе; его крутящий момент в 1,5 раза выше, чем у ближайших конкурентов; к тому же полная экологичность и бесшумность. С 2006 г. индийская компания Crompton Greaves начала серийное производство мопедов на базе «мотор-колеса» АН-300 (мощность 300 Вт).

С одним АН-300 мопед без помощи седока разгоняется до 25 км/ч и может «потянуть» до 100 кг груза. В ходе испытаний компания выжимала из этого двигателя скорость до 90 км/час. При торможении или скатывании с горки электронное управление переключает мотор в режим генерации, позволяя вырабатывать до 180 Вт энергии. Пробег на одной зарядке с батареей емкостью 20 А·час (напряжение 24 В) достигает 35 км, т. е., с учетом грядущих «супераккумуляторов», «прорыв» колеса Шкондина заключается в том, что «легкий» электротранспорт (мопеды, грузовые трехколесные фургончики, миниэлектромобили и т. д.) — смогут обойтись без водородных баллонов и иметь в пределах города «приличный» пробег только на аккумуляторах без их дозаправки.



Рис. 13.3. «Мотор-колесо» Шкондина

На авиалайнерах также заменят керосиновые двигатели на водородно-кислородные (один такой двигатель — “scramjet” — уже разработан).

Лаборатория реактивного движения (Jet Propulsion Lab, USA) и компания Canadian Hydrogen Energy решили не дожидаться «глобальной водородной революции» и разработали «Бортовой генератор водорода» (рис. 13.4), запатентовав систему впрыска водорода (Hydrogen Fuel Injection — HFI) во впускной коллектор двигателя внутреннего сгорания (как правило, речь идет о грузовом автомобиле, работающем на дизтопливе или о тракторе). Это компактный электролизный аппарат, который берет энергию из бортовой электрической сети грузовика, разлагает дистиллированную воду и направляет смесь водорода и кислорода во впускной коллектор ДВС. Добавленные «извне» водород и кислород повышают полноту сгорания дизтоплива, меняя характер распространения пламени в цилиндрах. Это дает 10-процентную экономию топлива, рост КПД двигателя и существенное сокращение выброса вредных веществ, особенно сажи — «слабого места» дизелей. Возможно, это устройство имеет в основе электрическую ячейку Стэнли Мэйера (патент США 4936961 «Метод для производства топливного газа»).



Рис. 13.4. «Бортовой генератор водорода» (небольшая коробка справа от колеса)

Однако эта разработка важна тем, что открывает перспективу «водородно-кислородной подсветки» сжигания угля в котлах теплоэлектростанций взамен природного газа.

Также будут популярными так наз. городские пневмокары, которые движутся энергией воздуха, сжатого до 200 атм. (для улучшения характеристик воздух может быть охлажден до минус 100 °С). Например, первый в Австралии автомобиль на сжатом воздухе, поступивший в реальную коммерческую эксплуатацию, недавно «побежал» в Мельбурне. Он построен австралийской фирмой Engineair (автор — Анджело Ди Пьетро).

Грузоподъемность его последней модели — одна тонна, объем баллонов с воздухом — 200 л, пробег на одной заправке — 50 км. При этом процесс заправки длится всего несколько минут.

8. Транспортировка грузов внутри страны (в качестве альтернативы грузовым автомобилям) частично будет осуществляться в контейнерах-«капсулах» по разветвленной сети подземных трубопроводов большого диаметра (1,5 м). Капсулы длиной 1–3 м (или несколько сцепленных капсул) будут перемещаться по таким трубам со скоростью 30–40 км/час на воздушной или магнитной «подушке».

9. Весь крупный пассажирский, грузовой и военный морской флот будет оснащен безопасными ядерными реакторами с «подкритичными» характеристиками, работающими не на опасном уране-238, а на значительно более безопасном тории-232 (из тория-232 уже непосредственно в реакторе получают вторичное ядерное топливо — уран-233). Как и всякий четно-четный изотоп (четное число протонов и нейтронов), торий-232 не способен выделять при делении тепловые нейтроны. Но под воздействием нейтронов извне (т. е. при облучении его мощным пучком быстрых нейтронов — см. выше п. 3) с торием происходит трансформация:  $\text{Th}232 + n \rightarrow \text{Th}233 \rightarrow \text{Pa}233 \rightarrow \text{U}233$ . А уран-233, как известно — хорошее ядерное горючее, поддерживающее цепное деление, т. к. при делении его ядра на один «затраченный» нейтрон выделяется 2,37 новых нейтронов.

10. Все тепловое коммунальное хозяйство будет полностью децентрализовано (давно пора перестать зарывать в землю миллионы «тонно-километров» металлических труб, из которых в ту же землю «уходит» 25–40 % тепла!). Теплом и горячей водой каждый дом будет обеспечиваться автономно за счет электроэнергии (возможны варианты): ночью работают электро- (или гидродинамические — ГДН) нагреватели (аккумулируя тепло по низкому «ночному тарифу»), днем — солнечные коллекторы (летом) и/или тепловые насосы — особенно зимой, на низкопотенциальном вторичном тепле. (В холодной Швеции, например, уже эксплуатируется свыше 300 тыс. тепловых насосов).

До 2010 г. будут оставаться газифицированные дома — но исключительно с применением автономных газовых мини-котельных с максимальной возможной активной автоматической регулировкой для минимизации расхода газа и воды. При этом сгорание газа будет осуществляться в геометрических совершенных керамических горельных устройствах с высокой

полноты сгорания (99,99%) углеводородного топлива в интервале температур 900–2000 К (разработка К. Мягкова, «Инжпроект», Россия) (рис. 13.5). Также представляет интерес «каталитическая горелка Екимовских» (Львов), в которой, кроме эффекта катализа, вода из влажного воздуха разлагается на водород и кислород и эта смесь ( $H_2 + O_2$ ) вдувается в метано-воздушное пламя, повышая его эффективность (до 99%) и температуру (этот же эффект использует компания «Canadian Hydrogen Energy» для улучшения работы ДВС (см. пункт 7)).

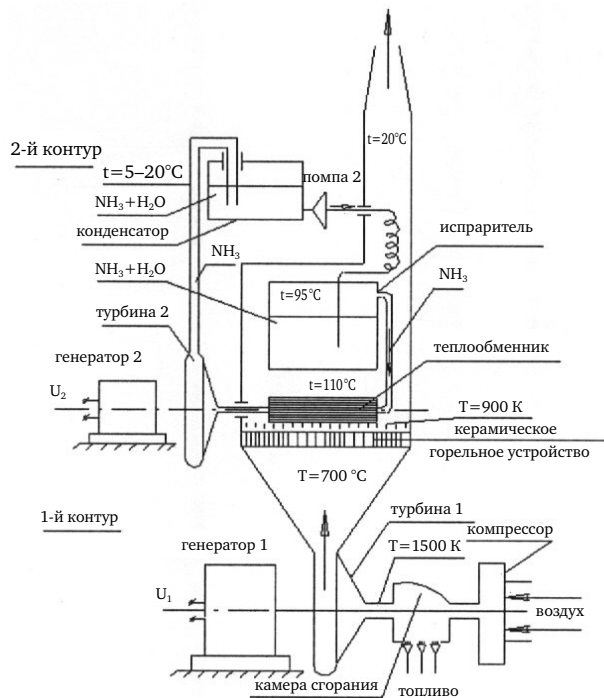


Рис. 13.5. Двухконтурная энергетическая установка Мягкова с керамическими горелочными устройствами

Кроме того, все источники тепла должны быть оснащены термоэлектрическими элементами для утилизации «лишнего» тепла (например, обыкновенный комнатный радиатор отопления, оснащенный таким термоэлементом, дает дополнительно до 150 ватт электроэнергии). Термоэлектронные элементы высокого качества разработаны в Институте термоэлектричества Академии Наук Украины.

Американская компания Zoka-Zola возводит сейчас близ Чикаго средних размеров особняк на одну семью, который не будет требовать для своего функционирования ни джоуля энергии извне. Проект Glass & Bedolla House относится к растущей плеяде проектов «zero energy house» — до-

мов, не требующих энергии из сети. Для этого авторы коттеджа применили едва ли не все известные ухищрения: солнечные электрические батареи и солнечные теплоколлекторы, ветрогенератор и геотермальный источник тепла (зимой) и холода (летом), хорошие теплоизолирующие материалы.

11. Будут осуществлены три грандиозные энергосберегающие «революции» в сельском хозяйстве:

А) Ученые NASA и Meriland University разработали биотехнологию, позволяющую в близком будущем осуществить промышленное производство мяса животных, птиц и рыб, выращивая его из их клеток в «фабричных» условиях. Внедрение этой биотехнологии фактически «поставит крест» на традиционном энергозатратном животноводстве, птицеводстве, рыбодовстве (кроме, разве что производства молока и яиц; а парное мясо, например, останется в качестве дорогой экзотики).



Рис. 13.6. Небоскреб, в котором «живут» овощи и зерновые культуры

Б) Большая часть «некормовой» сельхозпродукции (в основном, высококачественные злаки и овощи) будет выращиваться в так называемых Автоматических гидропонных контейнерах; при этом такая «ферма» (круглогодичная!) будет выглядеть как безлюдный небоскреб (рис. 13.6). Например, ученые Columbia University (Нью Йорк, США) придумали проект «Вертикальная ферма» (Vertical Farm) — десятки этажей, заполненные гидропонными теплицами, предельно автоматизированные, с искусственным освещением (до-

полняющим естественное) и частичным самообеспечением электрической энергией за счет солнечных батарей на крыше и метантенков в подвале, где перерабатываются органические отходы в биогаз. Такая ферма будет давать несколько урожаев в год, а изолированные растения будут защищены от инфекций и вредителей, поражающих поля: кроме того, имеется возможность переноса агропромышленности в город, вследствие чего резко падают транспортные расходы. Аналогичный проект (только в меньших масштабах) осуществила и американо-израильская фирма «Organitech».

Если представить себе 50-этажный «сельхознебоскреб» с площадью основания 1 га ( $100 \times 100$  м), и если на каждом этаже будет по 10 ярусов — то всего будет собираться урожай с  $50 \times 10 = 500$  га. При урожае (пшеницы) по 65 ц/га имеем урожай  $500 \times 65 = 32500$  ц, что при минимум трех урожаях в год дает около 100000 центнеров в год пшеницы!

В) Остальная («земляная») часть сельского хозяйства перейдет, в основном, на выращивание рапса для производства «биодизеля» и «генномодифицированных» кукурузы и картофеля (с повышенным содержанием крахмала) для производства этанола.

Ведь корм для животноводства и птицеводства в промышленных масштабах будут уже практически не нужны; останется лишь выращивание фруктов). Это позволит превратить дотационное сельское хозяйство в высококорентабельную отрасль, т. к. спрос и цены на рапсовое масло и этанол в XXI веке будут в мире постоянно расти. (Например, нынешние закупочные цены на рапс находятся на уровне 160–180 долл./т, в то время как за тонну украинской пшеницы предлагают вдвое ниже — лишь 80 долл.). По данным Ассоциации сои США — мировая потребность в «биодизеле» возрастет к 2015 г. в 4 раза — до 125 млн галлонов (1 галлон США — 3,8 л); а потребление этанола в США (для добавки в бензин) составило в 2004 г. 3,4 млн галлонов (что эквивалентно 143 млн баррелям нефти стоимостью в 6 млрд долл.!).

При этом «земляное» сельское хозяйство будет полностью переведено на низкоэнергетические «безплужные» технологии («no-till», т. е. «без вспашки» — на глубину 5–6 см), что в 4–5 раз сократит расход дизтоплива (со 100–120 до 15–20 л на 1 га зерновых). Также будет иметь место частичный или полный отказ от энергоемких «химических» удобрений в пользу «био-удобрений» (например, на основе продуктов жизнедеятельности красного калифорнийского червя).

Астрономы утверждают, что Землю ждет не глобальное потепление, а, наоборот, глобальное похолодание. И виновато в этом Солнце: помимо известного 11-летнего цикла солнечной активности, существует еще и вековой цикл. К середине XXI столетия поток солнечного излучения должен резко снизиться, Земля будет получать меньше тепла. Подобное глобальное похолодание уже наблюдалось в Европе, Северной Америке и Гренландии в 1645–1705 годах.

Астрономы называют это время «маундеровским минимумом» и утверждают, что в эти годы на Солнце практически не было вспышек. По летописям известно, что в то время из-за сильных холодов викинги покинули свои поселения в Гренландии, а в Старом Свете почти каждую зиму замерзали реки и температура воздуха понижалась до 40 градусов мороза.

По мнению ученых, в 2035–2045 гг., солнечная светимость достигнет минимума, а вслед за этим с отставанием на 15–20 лет начнется глобальное похолодание. Возможно, его длительность будет такая же, как и в средние века, — около 70 лет. Но сокращение интенсивности солнечного излучения — обычное природное явление, никак не связанное с хозяйственной деятельностью человечества.

Так что, если к 2050 году, вместе с исчерпанием запасов нефти и ее резким подорожанием до 500 долл./баррель еще добавится и глобальное похолодание — к этой «зиме» нужно было начинать готовить «сани» еще вчера.

Наиболее общий метод решения этих проблем состоит в широком использовании водорода — по сути, единственного экологически чистого



энергонапитателя, то есть в переходе к водородной энергетике. Фундаментальные физико-химические и физико-технические проблемы, связанные с широким внедрением водородной энергетике, в основном определяют необходимость разработки новых методов эффективного и экологически чистого производства водорода.

Направления разработки новых водородных технологий в разных регионах и странах различаются. Это связано и с неравномерной обеспеченностью природными энергоресурсами, и с особенностями их технологического развития. Например, в разработках водородных технологий, выполняемых в США, Германии и России, используется опыт ракетной техники, атомной и химической промышленности, специальной металлургии, криогенной и оборонной промышленности, в Японии — опыт высоких технологий электронной, электротехнической, металлургической промышленности и зарубежный опыт криогенной и авиационно-космической техники.

Вместе с тем обостряющиеся геополитические и экологические проблемы, связанные с региональной неравномерностью добычи нефти и ее потребления, в ближайшей перспективе определяют в качестве основного направления развития производство и применение водорода в качестве экологически чистого энергонапитателя для автотранспорта и энергетике. Это формирует наряду со специфическими для каждой страны направлениями НИОКР и общие для основных ведущих стран направления исследований и разработок.

Среди них, прежде всего, необходимо отметить:

- технологии производства, транспортировки, хранения и распределения жидкого и сжатого водорода;
- технологии крупномасштабного производства водорода с использованием энергии высокотемпературных реакторов;
- водородный автотранспорт с топливными элементами;
- водородные системы автономного энергообеспечения на основе топливных элементов;
- водород в большой энергетике;
- технологии аккумулирования и очистки водорода;
- водородная инфраструктура и безопасность.

Крупные национальные программы НИОКР в области водородной энергетике и технологии реализуются в США, Канаде, Германии, Японии, Китае, странах ЕС и ряде других. Государственная поддержка этих программ сегодня исчисляется в сотнях млн долл. в год.

Выполняется ряд международных программ и проектов. В странах ЕС действует программа НИОКР по созданию водородных автобусов и реализуется ряд других проектов, связанных с созданием инфраструктуры обеспечения водородом. Япония с участием иностранных партнеров реализует крупный проект «Мировая энергетическая сеть с использованием водорода

(WE-NET)». Между ведущими фирмами различных стран заключены многочисленные соглашения о совместных разработках новых водородных технологий. Организовано Берлинское партнерство чистой энергии (CEP), членами которого являются BMW, Daimler-Chrysler, Ford, Linde, MAN, Opel и др.

На правительственном уровне многие страны приняли важные решения об ускоренном развитии водородной энергетики и технологии.

В этой связи характерно решение президента США Дж. Буша о включении водородной экономики в число национальных приоритетов США. Конгресс США принял решение о выделении финансирования в размере 1,3 млрд долл. на работы по топливным элементам для автомобилей. В США начинаются работы по созданию в INEEL опытного высокотемпературного реактора (VHTR-H2) стоимостью 1 млрд долларов для атомного производства водорода. С этой целью формируется международный консорциум с участием российских предприятий ОКБМ и РИЦ «Курчатовский институт».

В Соединенных штатах (компании GA, ORNL и др.), Японии (JAERI, университеты) и других технологически развитых странах активизировалась разработка термохимических процессов производства водорода из воды с использованием энергии ВТГР:

- США выделили 1,2 млрд долл. на разработку демонстрационного блока и определили потребность в 200 атомных станциях для производства водорода из воды;
- Южная Корея запланировала 1 млрд долл. для создания демонстрационного блока для производства водорода и планирует к 2030 г. обеспечить до 20 % нужд в топливе автомобильного транспорта страны водородом, полученным с использованием энергии ВТГР.

Аналогичные технологии и проекты развиваются интенсивно во Франции, ЮАР, Китае в рамках государственного финансирования.

В России, США и Японии проводились и продолжают развиваться разработки технологии паровой конверсии метана с подводом тепла от высокотемпературного гелиевого реактора (ВТГР). Территориальная модель такого комплекса состоит из ядерной части, вырабатывающей синтез-газ, который транспортируется к технологической части производства, где этот газ используется для выработки конечной продукции.

Из угля и сланцев, используя тепло атомных реакторов можно получать синтез газ с высоким содержанием водорода. Газификация угля является одним из первых крупнотоннажных химических процессов, которые стали объектом для использования тепла атомного реактора.

Ведутся работы по созданию атомных электростанций следующего поколения. Исследовательская лаборатория National Engineering Environmental Laboratory прогнозирует, что один энергоблок атомной электростанции следующего поколения будет производить ежедневно водород, эквивалентный 750 000 литров бензина.

В рамках европейской исследовательской программы Raphael французские ученые и конструкторы работают уже над созданием атомного реактора четвертого поколения — реактора VHTR с температурой теплоносителя 1200 К. В таких устройствах вода при добавлении серной кислоты, йода и соединений брома разлагается на составные части — водород и кислород. Этот реактор будет способен вырабатывать до 2 млн м<sup>3</sup> водорода в сутки.

Правительством США принята Атомная водородная инициатива. Ведутся работы (совместно с Южной Кореей) по созданию атомных реакторов нового поколения, способных производить в больших количествах водород. INEEL (Idaho National Engineering Environmental Laboratory) прогнозирует, что один энергоблок атомной электростанции 4-го поколения будет производить ежедневно водород, эквивалентный 750000 л бензина.

Финансируются исследования возможностей производства водорода на существующих атомных электростанциях.

Ключевое устройство всей водородной энергетики — топливный элемент, в котором водород, соединяясь с кислородом, превращается в воду; высвободившаяся при этом энергия напрямую становится электроэнергией. Именно отсутствие всевозможных движущихся частей и передаточных звеньев и обеспечивает топливному элементу очень высокую эффективность — его КПД превышает 50%, а в лучших образцах достигает 75%.

Исторически сложилось так, что первые топливные элементы, которые удалось применить в техническом устройстве, сделали с жидким щелочным электролитом, и они прекрасно проявили себя во времена активного освоения космоса.

В 1971 году появился первый отечественный топливный элемент «Волна» (рис. 13.7). Он был способен работать в течение 1000 ч, выдавал один

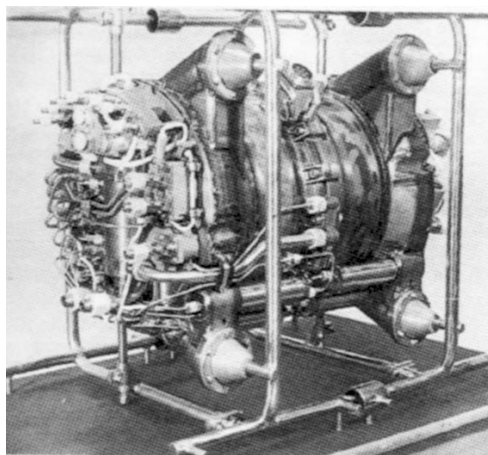


Рис. 13.7. Топливный элемент «Волна» для лунной экспедиции

киловатт мощности при напряжении 27 В, а весил 60 кг. Следующий щелочной элемент, на сей раз для «Бурана», начали разрабатывать в 1978 году. Через десять лет появился элемент «Фотон» (рис. 13.8) с ресурсом 2000 ч, мощностью 10 кВт, весом 145 кг. Эта разработка аналогична производимому компанией International Fuel Cell (США) щелочному ЭХГ для системы Space Shuttle мощностью 12 кВт.

Сейчас по заказу «АвтоВАЗа»: на комбинате модернизируют «Фотон», чтобы его можно было использовать в легковом автомоби-

ле (рис. 13.9). Если поначалу ему требовалось два бака, с водородом и кислородом, то в 2002 г. экспериментальная «Лада» уже использовала кислород воздуха. Работают такие элементы и на космических кораблях, например на спутнике «Ямал».

Слабое место щелочного электролита в том, что щелочь взаимодействует с углекислым газом и образуются нерастворимые в щелочной среде карбонаты. В космосе, где нет атмосферы, и в элемент оба газа попадают в чистом виде, этой проблемы нет. А вот на Земле углекислый газ есть везде, и, прежде всего в питающем кислородный электрод воздухе. Если же еще и на водородный электрод подавать смесь газов из топливного процессора (а там углекислого газа очень много, почти четверть), то щелочной элемент оказывается в очень тяжелых условиях, которые неизбежно снижают его ресурс. Кроме того, беда всех жидких электролитов, и щелочных, и кислотных, — вода, что образуется как на внешней, так и на внутренней поверхности кислородного электрода: она неизбежно разбавляет электролит.

Обоих недостатков лишен твердый полимер, он же протонообменная мембрана. Топливные элементы с ним (PEM FC) считаются самыми перспективными, надежными и потенциально самыми дешевыми в качестве источника электроэнергии для транспорта нового поколения (автомобили и автобусы) Этому направлению придается большое значение в США, Японии и в России.

PEM FC, естественно, найдут широкое применение и для других систем энергопитания.

ЭХГ этого типа могут стать эффективным источником тепла и электричества для автономных потребителей. Один из типичных проектов таких устройств — HomeGen — разрабатывается компанией General Electric. Мощность этой установки достигает 35 кВт (тип PEM FC, КПД около 30 %).

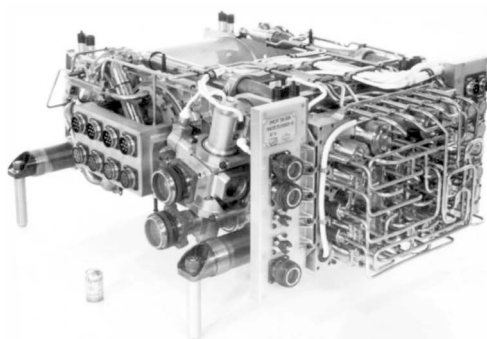


Рис. 13.8. Топливный элемент «Фотон» для «Бурана»



Рис. 13.9. Водородная энергетическая установка сейчас занимает весь багажник «Лады»

В настоящее время HomeGen и несколько аналогичных разработок проходят контрольные испытания. Основные усилия разработчиков направлены на снижение стоимости установок за счет использования новых, более эффективных керамических материалов и совершенствования технологии изготовления ЭХГ.

Потребность децентрализованной стационарной энергетики (мощность электрохимических генераторов от 5 кВт до 10 МВт) оценивается со 100 тыс. МВт за 10 лет. Сейчас 1 кВт установленной мощности стоит более 3 тыс. долл., приемлемая цена — 1 тыс. долл. Потребности автотранспорта в электрохимических генераторах на топливных элементах (мощность 15–100 кВт) — 500 тыс. штук в год. Сейчас стоимость одного такого генератора более 3 тыс. долл., приемлемая цена — 50–100 долл. Таким образом, необходимо многократное снижение стоимости стационарных топливных элементов и десятикратное — стоимости топливных элементов для транспорта.

Не исключено, что Россия будет первой страной, которая коммерциализует топливные элементы. Причина в наших огромных пространствах и мощной газовой промышленности. Гигантские трубопроводы идут через безлюдные просторы Сибири, где нет централизованного энергоснабжения. А ведь чуть ли не на каждом километре газопровода должна стоять небольшая электростанция, которая питает контрольные приборы и, что важнее, размагничивает газопровод, чтобы по нему не тек ток, вызванный полем Земли.

В противном случае труба быстро гниет — идет электрохимическая коррозия. Сейчас там стоят дизельные станции. Им нужно подвозить топливо, а выхлоп и шум наносят вред окружающей среде. Бесшумный топливный элемент с чистым выхлопом, который к тому же работает от прокачиваемого по трубе газа, — идеальная замена. Расчет показывает, что даже при цене несколько тысяч долл. за киловатт установочной мощности такой электрогенератор оказывается конкурентоспособным.

Необходимо также отметить, что передача водорода по тем же газопроводам на расстояние 100 км стоит на 20% дешевле, чем электричества; при расстоянии 1600 км — в два раза дешевле; а при распределении потребителями — в пять раз.

Идея использования водородного топлива базируется на желании уменьшить выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Но при этом совершенно не учитывают, что при производстве водорода нужно затратить энергию, получение которой сегодня связано с выделением  $\text{CO}_2$ . Кроме того, в рамках современных способов  $\text{CO}_2$  выделяется и при получении водорода. Например, паровой риформинг природного газа происходит так:  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ . То есть на каждые 8 г водорода мы получаем 44 г  $\text{CO}_2$ . Еще хуже с биомассой — по моим оценкам, на 1 молекулу  $\text{CO}_2$  выделяется всего 1–2 молекулы водорода. «Чистым» с этой точки зрения можно считать только разло-

жение воды при помощи энергии или бактерий. Первое и дорогое, и тоже связано с производством  $\text{CO}_2$ , второе пока малопроизводительно и не может сыграть заметной роли в ближайшем будущем.

Надо также учитывать, что для топливных элементов нужен очень чистый водород. Он не должен содержать  $\text{CO}$  даже в следовых количествах ( $\text{CO}$  — яд для топливных элементов). В то же время, при получении водорода почти всегда получается его смесь с  $\text{CO}$ . Полная очистка от  $\text{CO}$  — отдельная задача, предполагающая реакцию на платиновых или золотых катализаторах (пусть и в ничтожных количествах), и опять же потребление энергии, что соответственно увеличивает сопутствующий выброс  $\text{CO}_2$ .

Эти проблемы заставляют искать более дешевые способы получения чистого водорода. Ведутся поисковые работы по использованию таких экзотических вариантов, как процесс с применением ураната стронция для получения водорода (стронций-уранатный цикл, Лос-Аламос) термохимическим способом с непосредственным делением ядер урана в составе ураната стронция для получения тепла при разложении воды на водород и кислород.

Интересную инициативу демонстрирует Исландия, заявив, что она намерена стать первой в мире страной, решившей отказаться от использования ископаемых энергоносителей и перейти на водородную энергетику, причем как на суше, так и на море.

Английские ученые собираются превратить шотландский остров Айлей в первую в мире территорию, полностью перешедшую на использование водородного топлива. «Мы намерееваемся показать каждому будущие перспективы, через 10–20 лет водород займет лидирующие позиции».

Получать чистый водород планируется из воды с помощью электрического тока от уже функционирующей на острове электростанции, использующей энергию морских волн. После этого водородом будут заправляться топливные элементы. Эти элементы жители острова смогут забирать домой и с их помощью приводить в действие все агрегаты и механизмы — начиная от сушилок и кончая тракторами.

В ноябре 2003 г. 15 стран подписали соглашение «Международное партнерство по водородной экономике». Участниками партнерства стали Австралия, Англия, Бразилия, Германия, ЕС, Индия, Исландия, Италия, Канада, Китай, Норвегия, Республика Корея, Россия, США, Франция, Япония.

В России существует задел по основным направлениям водородной энергетики. Среди перечисленных выше направлений следует отметить опыт работ с водородом в ракетной технике, авиации, химической, нефтеперерабатывающей и атомной промышленности, технологический задел по атомно-водородной энергетике и, в том числе, по высокотемпературным гелиевым реакторам. Программа действий в России по водородной энергетике должна включать как собственно российские работы по ключевым технологиям, так и сотрудничество с зарубежными программами по водород-

ной экономике. Реализация программы создаст базовые технологические основы коммерческого перехода к атомно-водородной энергетике непосредственно в России, что повысит энергетическую устойчивость экономики страны и обеспечит поставки соответствующих энерготехнологических комплексов на экспорт. Запоздывание России в этом направлении работ — это прогнозируемая технологическая зависимость от внешнего мира.

Если есть инфраструктура добычи водорода и снабжения им, то большое разнообразие конструкций топливных элементов не будет. Однако для развития этой инфраструктуры должны быть потребители водорода. А они появятся только после того, как будет создано бесперебойное снабжение, иначе на водородном автомобиле далеко не уедешь. Поэтому если где-то и создают системы водородозаправок (например, в тех десяти европейских городах, которые уже участвуют в эксперименте по применению водородных автобусов), то делают это городские власти, выделяя средства по затратному механизму, без надежды обеспечить проекту самофинансирование.

Вот почему для создания самокупаемой водородной энергетике на первых порах хотят воспользоваться имеющейся системой распределения топлива, а именно газопроводами и бензозаправками. Ничего удивительного в такой идее нет: и природный газ, и бензин — это углеводороды. Значит, можно попытаться отщепить водород от углеродного скелета непосредственно перед входом в топливный элемент. И как это делать — тоже известно: надо нагреть топливо, а потом осуществить каталитическое парциальное окисление или пароводяную конверсию. Например, превратить топливо в синтез-газ, то есть смесь водорода с угарным газом. Потом тем или иным способом дожечь ядовитый угарный газ до безвредного углекислого — и можно подавать смесь на водородный электрод топливного элемента. Получается небольшой химический заводик-процессор (его еще называют конвертер или риформер), смонтированный прямо «на борту» топливного элемента. Наличие этого заводика и порождает два принципиально разных типа конструкции — высокотемпературный и низкотемпературный.

Если смесь газов, которые выходят из процессора, не охлаждать, ее температура составит около 800 °С, то есть наряду с электричеством элемент дает еще и немало тепла. Вариант без охлаждения хорош еще и тем, что сам процессор становится более простым: при столь высокой температуре топливный элемент с удовольствием будет использовать и угарный газ как топливо. Однако элементы блока, генерирующего электричество, могут оказаться слишком нежными, чтобы выдержать такой нагрев. В этом случае внутри процессора придется проводить как выделяющие тепло реакции, так и те, что его поглощают, а с помощью системы теплообменников компенсировать оба процесса. Сам топливный элемент в этом случае работает при температуре 80 °С, и безопасность получается значительно выше — горячая вода — это не то, что расплавленный свинец.

---

## Заключение

---

**В** результате истощения мировых запасов органического топлива, являющегося энергоносителем для невозобновляемой энергетики, перед человечеством встает задача своевременно найти и научиться эффективно использовать новые источники энергии и энергоносители. Главным претендентом на роль такого энергоносителя является водород.

Ожидается, что через 10–15 лет водород в технически развитых странах начнет активно вытеснять и постепенно вытеснит органические энергоносители с рынка энергии.

В переходный период для производства водорода будут активно использоваться методы химического преобразования органических энергоносителей и постепенный переход на прямые методы его получения путем электролиза.

Решающую роль здесь может сыграть атомно-водородный комплекс.



---

## Библиографический список

---

1. Полежаев Ю. В. Россия во мгле? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://hitechno.ru/polezhaev.htm>.
2. Лаврус В. С. Источники энергии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://lib.ru/NTL/rel03\\_w6.txt](http://lib.ru/NTL/rel03_w6.txt).
3. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение : справочник. М. : Химия, 1989.
4. Водородная энергетика. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://npri.spb.ru>; <http://lepfed.narod.ru/>.
5. Электролиз, или вода вместо бензина. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.skyzone.ru/tech/meyer\\_h2.htm](http://www.skyzone.ru/tech/meyer_h2.htm).
6. Долежалъ Н. А. Атомно-водородная энергетика / Н. А. Долежалъ [и др.]. Вып. 2, М. : Атомиздат. 1979.
7. Пономарев-Степной Н. Н. Атомно-водородная энергетика / Н. Н. Пономарев-Степной // Росэнергоатом. 2004, № 4.
8. Пономарев-Степной Н. Н., Столяревский А. Я. Атомно-водородная энергетика / Н. Н. Пономарев-Степной, А. Я. Столяревский // ISJAEЕ, 2004, № 3 (11).
9. Физическая энциклопедия. В 5 т. / главн. ред. А. М. Прохоров. М. : Советская энциклопедия. Главный редактор А. М. Прохоров. 1988.
10. Чуянов В. А. Различные подходы к ядерному синтезу / В. А. Чуянов. Препринт. ИПМ им. М. В. Келдыша. РАН. Москва, 2001
11. Лукьянов С. Ю. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез / С. Ю. Лукьянов. М., 1975.
12. Велихов Е. П., Путвинский С. В. Термоядерный реактор. Термоядерная энергетика. Статус и роль в долгосрочной перспективе // Доклад от 22.10.1999, выполненный в рамках Energy Center of the World Federation of Scientists.
13. Kadomtsev V. V. Tokamak plasma a complex physical system / V. V. Kadomtsev. Institute of Physics : Bristol. 1992.
14. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции / Л. А. Арцимович. 2 изд., М., 1963.
15. Ефремов И. В. На пути к термоядерному реактору / И. В. Ефремов. М. , 1993.
16. Зельдович Я. Б., Герштейн С. С. Успехи физических наук. Ядерные реакции в холодном водороде / Я. Б. Зельдович, С. С. Герштейн // Мезонный катализ, т. LXXI, вып. 4, 1960.

17. Карнаков Б. М. Мюонный катализ ядерного синтеза / Б. М. Карнаков. СОЖ, 1999.
18. Fleischmann, M., S. Pons, M. Hawkins. Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium. *J. Electroanal. Chem.*, 1989. 261: p. 301 and errata in Vol. 263.
19. Кузьмин Р. Н., Швилкин Б. Н. Холодный ядерный синтез / Р. Н. Кузьмин, Б. Н. Швилкин. 2-е изд. М. : Знание, 1989.
20. Царев В. А. Низкотемпературный ядерный синтез / В. А. Царев. т. 160, вып. 11. УФН, 1990.
21. <http://lenr-canr.org/acrobat/StormsEastudentsg.pdf>
22. Заев Н. Уж синтез близится, Курчатова ж все нет / Н. Заев // Изобретатель и рационализатор, № 1, 1995.
23. Заключение по вопросу о научно-конструкторских разработках учебного-конструктора И. С. Филимоненко. Московский городской совет народных депутатов. М. : Русская мысль, 1994.
24. <http://www.defkalionenergy.com/files/HyperionSpecsSheetNovember2011.pdf>.
25. [http://rnd.cnews.ru/news/line/index\\_science.shtml?2013/05/22/529580](http://rnd.cnews.ru/news/line/index_science.shtml?2013/05/22/529580).
26. Цыганов Э. Н. Холодный ядерный синтез / Э. Н. Цыганов // Ядерная физика. том 75, № 2, 2012.
27. Александров Е. Б. Холодный ядерный синтез. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.lebed.com/2012/art6026.htm>, № 656 24.05. 2012.
28. Альтернативная энергетика. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.skif.vrn.ru>.
29. Пономарев Л. И. Под знаком кванта. М. : Сов. Россия. 1984, 352 с.
30. Герштейн С. С., Петров Ю. В., Пономарев Л. И. УФН, Т. 160, вып. 8. с. 3–46.
31. Журнал «Химия и жизнь», 2000, № 10.
32. Н. И. Храмушин, В. А. Ружников. Расчетная оценка характеристик комбинированной энергоустановки, включающей ветрогенератор, электролизёр, ресивер водорода и батарею топливных элементов. МНЖ «Альтернативная энергетика и экология», № 1 (33), 2006 г., с. 25–28.
33. Патент РФ № 2180366. Способ производства экологически чистого химического горючего и установка для его осуществления/Евсюков Г. А.//2007.
34. Водородное горючее из вулканической преисподней/Промышленные ведомости, № 3, декабрь 2003.
35. Варшавский И. Л. Энергоаккумулирующие вещества и их использование.– К.: Наукова думка, 1980.

36. Химическая энциклопедия/Под ред. И. Л. Кнунянца. Т. 1, 2.–М: Советская энциклопедия, 1990.
37. Мазалов Ю. А., Сороковиков А. И. Технологические основы сжигания алюминия в водных средах для получения водорода, тепловой энергии и оксидов алюминия//Труды 3-й Межд. научно-техн. конф. в ГНУ ВИЭСХ. Ч. 4.– М: РАСХН, 2003.– С. 245–250.
38. Обзор методов хранения водорода. Институт проблем материаловедения НАН Украины. <http://shp.by.ru/sci/fullerene/forums/ichms/2003/>.
39. ЦНИИатоминформ, № 12 (1997), 19 июня 2000.
40. S. Goldstein, X. Vitart. General comments about the efficiency of the iodinesulphur cycle coupled to a high temperature gas cooled reactor. ISJAEЕ, № 3, 2004.
41. Елагин Ю. П. Роль энергетики в водородной экономике. Журнал «Атомная энергетика за рубежом», № 8, 2006 г.
42. Б. И. Центер, Н. Ю. Лызлов. Металл-водородные электрохимические системы. Л., «Химия», 1989.
43. [www.saturn.kuban.ru/rechargeable\\_battery2.html](http://www.saturn.kuban.ru/rechargeable_battery2.html)
44. Albert H. Zimmerman (ed). Nickel-Hydrogen Batteries Principles and Practice/The Aerospace Press, El Segundo, California.
45. Miller A. I. Launching hydrogen. — Nuclear Engineering International, 2005, v. 50, No 612, p. 16–19.
46. Schultz K., Herring S., Levis M., Summers W. The hydrogen reaction. — Ibid, p. 10–15.
47. Sienicki J., Wade D., Moisseytsev A. et al. STAR performer. — Ibid, p. 24–28.
48. Sakaba N. Tachibana Y., Onuki K. et al. JAERI's hot stuff. — Ibid, p. 20–22.

# Приложение

## Глоссарий

Таблица П

### Водородная энергетика и топливные элементы (ТЭ)

| Английский термин                         | Аббревиатура | Русский эквивалент                                | Краткое пояснение   |
|---|--------------|---|---|
| Abatement                                 | —            | —   | Снижение уровня загрязнения воздуха   |
| Active area                               | —            | Активная область                                  | Доступная для водорода область мембраны   |
| Afterburner                               | —            | —   | Устройство, устраняющее нежелательные органические газы в атмосфере путем сжигания  |
| Air quality index                         | —            | —   | Численный индекс, использующийся для оценки уровня загрязнения воздуха. AQI оценивает загрязнение воздуха по пяти компонентам: озон, окись углерода, двуокись серы, двуокись азота и посторонние частицы в воздухе в результате сгорания (например топлива) |
| Alkaline fuel cell                        | AFC          | Щелочной топливный элемент                        | Топливный элемент, в котором используется концентрированная KOH (30–50%, в жидкой фазе), и ионы гидроксила $\text{OH}^-$ переносятся с катода на анод при температуре порядка 60–90 °C  |
| Alternative fuel vehicle                  | AFV          | Транспортное средство на альтернативном топливе   | —   |
| American National Standards Institute     | ANSI         | Американский национальный институт стандартизации | Негосударственная, некоммерческая организация, представляющая США в международной организации по стандартизации ISO (International Standardization Organization). ANSI разрабатывает и рекомендует стандарты в США в различных сферах деятельности          |
| American Society for Mechanical Engineers | ASME         | —   | Некоммерческая, учебная и техническая организация. ASME руководит крупным техническим издательством, проводит технические конференции и профессиональные курсы, разрабатывает и выпускает много промышленных стандартов                                     |

Продолжение табл. П

| Английский термин                            | Аббревиатура | Русский эквивалент                                | Краткое пояснение   |
|--|--------------|---|---|
| American Society for Non-destructive Testing | ASNT         | Американское общество по неразрушающим испытаниям | Основными задачами общества ASNT являются помощь в обучении специалистов по неразрушающему контролю, развитие неразрушающих технологий путем организации исследований, конференций, публикаций и т. д.  |
| Anode  | —            | Анод  | Электрод в ячейке, на которой происходит реакция окисления водорода   |
| Argonne National Laboratory                  | ANL          | Аргоннская национальная лаборатория               | Первая национальная лаборатория США (1946), один из крупнейших научно-исследовательских центров Министерства энергетики США. Среди программ ANL — программы по энергетическим ресурсам, направленные на реализацию надежных поставок эффективной и чистой энергии для будущего, в частности, разрабатываются современные батареи и ТЭ, системы получения электроэнергии и хранения водорода |
| Auxiliary Power Unit                         | APU          | Вспомогательный источник энергии                  | Источник энергии (в данном случае — ТЭ), вспомогательный по отношению к основному, например, двигателю внутреннего сгорания   |
| Auxiliary power                              | —            | —   | Мощность от вспомогательного источника, обеспечивающего нормальное функционирование основного источника   |
| Availability                                 | —            | Коэффициент готовности                            | Отношение времени, в течение которого источник энергии функционирует, ко времени, в течение которого он должен работать   |
| Back pressure                                | —            | Противодавление                                   | Давление, преодолеваемое жидкостью или газом в трубопроводах, соединениях или резервуарах   |
| Balance of plant                             | —            | —   | Компоненты (узлы) системы топливного элемента, необходимые для совместного функционирования ТЭ и устройства подачи топлива  |
| Base load                                    | —            | —   | Минимальная электрическая энергия, потребляемая или поставляемая в течение данного периода времени при постоянной подаче  |
| Battery electric vehicle                     | BEV          | Транспортное средство на аккумуляторах            | —   |

Продолжение табл. П

| Английский термин                         | Аббревиатура | Русский эквивалент                                | Краткое пояснение   |
|---|--------------|---|---|
| Bipolar plate                             | —            | Биполярная пластина                               | Проводящая пластина в сборке топливного элемента, которая служит анодом для одной ячейки и катодом для другой, соседней. Пластина может быть из металла или проводящего полимера (например, композита с углеродным наполнителем). Пластина обычно включает каналы для подпитки топливом и теплоотвода |
| Black start                               | —            | —   | Возобновление функционирования электрического устройства (генератора) без подключения к электрической сети  |
| British thermal unit                      | BTU          | Британская тепловая единица                       | 1 btu равна количеству тепла, необходимого для нагрева одного фунта (454 г) воды на 1 градус Фаренгейта (1 btu = 0,252 ккал)  |
| Burner                                    | —            | Горелка   | Устройство для сжигания остаточного газа  |
| Butane normal (n-butane)? Technical grade | —            | Нормальный бутан технического класса              | Сжиженный газ, на 95 % содержащий изобутан, бутилен и пропан в качестве примесей  |
| California Fuel Cell Partnership          | CaFCP        | Калифорнийское партнерство по топливным элементам | Содружество автомобильных, энергетических компаний и правительственных организаций и производителей ТЭ. CaFCP создано с целью разработки и демонстрации автомобилей на ТЭ   |
| California Air Resources Board            | CARB         | Калифорнийский совет по воздушным ресурсам        | Комиссия по экологическому контролю воздушного пространства Калифорнии. CaRB предписывает крупнейшим автомобильным фирмам производить определенное количество «чистых автомобилей» (ZEV)  |
| Carbon-monoxide                           | —            | Оксид углерода                                    | Химическая формула CO   |
| Carbondioxide                             | —            | Двуокись углерода                                 | Химическая формула CO <sub>2</sub>  |
| Cathode                                   | —            | Катод   | Электрод, на котором происходит реакция восстановления кислорода  |
| Catalyst                                  | —            | Катализатор                                       | Вещество, увеличивающее скорость реакции. Согласно современным представлениям катализатор образует комплекс с реагирующими молекулами, стабилизируемый химическими связями. После перегруппировки этот комплекс диссоциирует с вы-  |

Продолжение табл. П

| Английский термин            | Аббревиатура | Русский эквивалент   | Краткое пояснение  |
|------------------------------|--------------|--|--|
|                              |              |  | свобождением продуктов и катализатора. Катализаторы часто используются при преобразовании топлива  |
| Catalyst coated membrane     | CCM          | Мембрана с катализирующим покрытием                            | —  |
| Catalyst loading             | —            | Каталитическое покрытие  | —  |
| Cogeneration                 | —            | —  | Cogen — термин, определяющий использование ТЭ для одновременного получения электро- и тепловой энергии   |
| Combined heat and power unit | CHP          | Устройство, одновременно вырабатывающее тепло и электроэнергию | —  |
| Combustion                   | —            | Сгорание   | В ТЭ: окисление водорода кислородом, сопровождаемое выделением тепла и света   |
| Combustion internal          | IC           | Внутреннее сгорание  | —  |
| Compressed gas association   | CGA          | —  | —  |
| Compressed hydrogen gas      | CHG          | Сжатый газ водород   | —  |
| Compressed natural gas       | CNG          | Сжатый природный газ   | —  |
| Coal gas                     | —            | Угарный газ  | Возникает при сгорании угля. Содержит более высокий уровень окиси углерода, чем в природном газе   |
| Coolant                      | —            | Теплоноситель  | Нетоксичный — пропилен-гликоль, минеральное масло, фреон. Токсичный — этиленгликоль, нефтяные масла, гидразин  |
| Daimler Chrysler             | DCX          | —  | Крупнейший автомобилестроительный концерн. Стратегия DCX реализуется в четырех основных направлениях: широчайшее распространение по всему миру, укрепление бренда, широкий ассортимент продукции и технологическое лидерство с учетом возрастающих запросов общества в области сохранения природных ресурсов и безопасности окружающей среды |

Продолжение табл. П

| Английский термин                      | Аббревиатура | Русский эквивалент                                       | Краткое пояснение  |
|--|--------------|--|--|
| Department of Defence of USA           | DOD          | Министерство обороны США                                 | —  |
| Department of Energy of USA            | DOE          | Министерство энергетики США                              | —  |
| Department of Transportation of USA    | DOT          | Министерство транспорта США                              | —  |
| Desulphuriser                          | —            | Сероочиститель   | Некоторые топлива содержат серу, которая может нарушать работу ТЭ. Сера должна быть удалена из газового потока на входе в ТЭ   |
| Diffusion                              | —            | Диффузия   | В ТЭ диффузия может происходить через палладиевую мембрану для очистки водорода или через электроды перед расщеплением молекул водорода  |
| Direct injection                       | DI           | Прямая инъекция  |  |
| Direct methanol fuel cell              | DMFC         | Топливный элемент с непосредственным окислением метанола | Топливный элемент на метаноле (CH <sub>3</sub> OH) в газообразной или жидкой фазе. Метанол непосредственно окисляется на аноде, не восстанавливаясь до водорода. Типичный электролит — PEM |
| Energy efficiency and renewable energy | EERE         | —  | Информационный портал министерства энергетики США. EERE представляет доступ к сотне сайтов и тысяче документов по энергетической эффективности и возобновляемой энергии                    |
| Efficiency                             | —            | Коэффициент полезного действия (эффективность)           | Отношение полезной энергии, произведенной системой (в дано случае ТЭ) к подводимой энергии (обычно химическая энергия)   |
| Effluent                               | —            | Отходы   | Продукты сгорания, выходящие вместе с избыточным воздухом  |
| Electric vehicle                       | EV           | Электромобиль  | —  |
| Electrolyte                            | —            | Электролит   | Среда, в которой электрический ток создается посредством миграции ионов. Совместно с внешними контактами ТЭ обеспечивает создание электрического контура                                   |



Продолжение табл. II

| Английский термин                    | Аббревиатура | Русский эквивалент  | Краткое пояснение   |
|--------------------------------------|--------------|---|---|
| End-of-life vehicle                  | ELV          | Транспортное средство с выработанным ресурсом                   | По новым Европейским законодательным актам все материалы, используемые в производстве автомобилей, должны быть утилизированы. Начиная с 2006 г. производители автомобилей будут нести ответственность за последующее их использование   |
| Equivalent to zero emissions vehicle | EZEV         | Транспортное средство с незначительным выбросом выхлопных газов | —   |
| Ethanol                              | —            | Этанол  | Химическая формула $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  |
| European Commission                  | EC           | Европейская Комиссия  | Исполнительный орган Европейского Союза. Комиссия выступает с законодательными инициативами, а после утверждения контролирует их претворение в жизнь  |
| Exhaust emission                     | —            | Выхлоп  | Выход отравляющих компонентов топлива   |
| External reforming                   | —            | Внешний риформинг   | Топливо преобразуется в водород до введения в топливный элемент   |
| European Union                       | EU           | Европейский Союз  | Объединение европейских государств, участвующих в процессе европейской интеграции. Предшественниками ЕС были: 1951–1957 — Европейское сообщество угля и стали (ЕОУС); 1957–1967 — Европейское экономическое сообщество (ЕЭС); 1967–1992 — Европейские сообщества (ЕЭС, Евратом, ЕОУС); с ноября 1993 — Европейский Союз. Название «Европейские Сообщества» часто употребляется применительно ко всем этапам развития ЕС |
| Failure modes and effects analysis   | FMEA         | Анализ основных отказов и их последствий                        | FMEA-анализ представляет собой технологию анализа возможности возникновения дефектов и их влияния на потребителя. FMEA-анализ проводится для разрабатываемых продуктов и процессов с целью снижения риска потребителя от потенциальных дефектов. FMEA-анализ в настоящее время является одной из стандартных технологий анализа качества изделий и процессов  |
| Flue (exhaust)                       | —            | Трубоотвод  | Общий термин для всех типов трубоотводов и выводов, через которые газы выходят из камеры сгорания в окружающую среду  |

Продолжение табл. П

| Английский термин   | Аббревиатура | Русский эквивалент                           | Краткое пояснение   |
|---|--------------|--|---|
| Flue gases  | —            | —  | Газообразные продукты сгорания в трубопроводах  |
| Flue losses   | —            | —  | Потери тепла с продуктами сгорания  |
| Fuel  | —            | Топливо                                      | —   |
| Fuel cell   | FC           | Топливный элемент, ТЭ                        | Электрохимическое устройство, непрерывно преобразующее химическую энергию топлива и окислителя в электрическую энергию. Топливо и окислитель обычно хранятся вне элемента и попадают в него по мере их потребления              |
| Fuel cell electric vehicle                                | FCEV         | Транспортное средство на топливных элементах | —   |
| Fuel processor  | —            | —  | Устройство для извлечения водорода из топлива   |
| Fuels (properties)  | —            | Свойства топлива                             | Теплоемкость (МДж/кг):<br>метанол — 19,6;<br>метан — 50,05;<br>бензин — 4395;<br>газолин — 42,9   |
| Gas clean-up  | —            | Очистка газа                                 | При преобразовании топлива преобразованный газовый поток содержит окись углерода, что негативно влияет на функционирование ТЭ. Очистка газа позволяет удалить окись углерода и способствует функционированию ТЭ                 |
| General electric  | GE           | Дженерал Электрик                            | Крупнейшая электротехническая компания США. GE основана в 1860 г. Томасом Эдисоном  |
| General motors  | GM           | Дженерал Моторс                              | Крупнейшая корпорация по производству автомобилей, основанная в 1908 г. GM имеет представительства в 32 странах. Автомобили GM продаются в 192 странах  |
| Global electric Motors (a subsidiary of Daimler Chrysler) | GEM          | —  | Дочерняя компания Daimler Chrysler (GEM), которая производит электродвигатели и является лидером на рынке подобных моторов. Автомобили GEM используются как в гражданских, так и военных отраслях; городах и сельской местности |
| Graphite nanofiber storage                                | —            | Хранение в графитовых трубках                | —   |

Продолжение табл. II

| Английский термин  | Аббревиатура | Русский эквивалент   | Краткое пояснение   |
|--|--------------|--|---|
| Greenhouse gas   | GHG          | —  | Газ, вызывающий парниковый эффект   |
| Grid-connected   | —            | —  | ТЭ, функционирующий при подсоединении к электросети   |
| Grid-independent   | —            | —  | ТЭ, функционирующий автономно, без подсоединения к электросети, например, в удаленных сельских районах  |
| Grid-parallel  | —            | —  | ТЭ, функционирующий при подсоединении параллельно электросети   |
| Hybrid electric vehicle  | HEV          | Гибридный электромобиль  | Конкурентоспособное, экологически чистое транспортное средство с комбинированной энергетической установкой, включающей ДВС, электродвигатель и буферный накопитель энергии. Американские специалисты утверждают, что «гибридный» электромобиль может быть примерно на порядок менее «грязным», по сравнению с обычным автомобилем |
| Hydrocarbons   | HC           | Углеводороды   | Класс химических соединений водорода с углеродом: метан, пропан, бутан и т. д.  |
| Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technology (Program within EERE) | HFC&IT       | Водород, топливные элементы и инфраструктура технологии (программа EERE) | —   |
| Hydrogen (properties)  | —            | Свойства водорода  | Молекулярный вес: 2,016<br>Плотность (газ): 0,0899 кг/м <sup>3</sup><br>Плотность (жидк.): 70,8 кг/м <sup>3</sup><br>Теплосодержание: высшее 39,41 кВт/кг, низшее — 33,33 кВт/кг (119,99 МДж/кг)  |
| Hydrogen   | —            | Водород  | —   |
| Hydrogen liquefied   | LH2          | Сжиженный водород  | —   |
| Hydrogen Technical Advisory Panel                                      | HTAP         | Специальная консультативная группа по водороду                           | —   |
| I — current, R — resistance  | IR loss      | Омические потери   | Потеря мощности при прохождении тока через проводник  |

Продолжение табл. П

| Английский термин                               | Аббревиатура | Русский эквивалент                                 | Краткое пояснение  |
|---|--------------|--|--|
| Institute of Electrical & Electronics Engineers | IEEE         | Институт инженеров по электротехнике и электронике | Некоммерческая профессиональная ассоциация, объединяющая более 360 тысяч членов из 175 стран. IEEE является признанным авторитетом в областях: компьютерной техники, биомедицинских технологий, телекоммуникаций, энергетики, авионавтики и бытовой электроники. Выпускает свои собственные стандарты; членами IEEE являются ANSI и ISO  |
| Instrument Society of America                   | ISA          | Американское общество приборостроителей            | —  |
| Integrated motor assist                         | IMA          | Интегрированный вспомогательный мотор              | Гибридная силовая система для автомобилей, состоящая из бензинового и электрического двигателей, что позволит увеличить суммарную мощность автомобиля, а расход топлива при этом не изменится  |
| International energy agency                     | IEA          | Международное энергетическое агентство             | Независимая организация при OECD, учреждена в 1974 г. IEA осуществляет мониторинг энергетических рынков, способствует разрешению энергетических проблем  |
| International Organization for Standardization  | ISO          | Международная организация по стандартизации        | Добровольная организация, основанная в 1946 г., отвечающая за создание международных стандартов во многих областях. Национальные институты стандартов из 146 стран, включенные в единую сеть, работают в партнерстве с международными организациями, правительствами, промышленностью, бизнесом и представителями потребителей. ISO является связующим звеном между общественным и частным секторами |
| Internal combustion                             | IC           | Внутреннее сгорание                                | —  |
| Internal combustion engine                      | ICE          | Двигатель внутреннего сгорания                     | —  |
| Iron sponge storage                             | —            | Губчатое железо для хранения                       | —  |
| Japanese Automotive Manufacturers Association   | JAMA         | Японская ассоциация автопроизводителей             | Торговая ассоциация, представляющая 14 японских фирм-производителей автомобилей, автобусов, грузовиков и др. транспорта. JAMA имеет свои представительства в США, Европе и Азии  |

Продолжение табл. II

| Английский термин  | Аббревиатура | Русский эквивалент   | Краткое пояснение  |
|--|--------------|--|--|
| Japanese New Energy and Industrial Technology Development Organization | NEDO         | Организация новой энергетики и развития промышленных технологий (Япония) | Организация, входящая в структуру Министерства экономики Японии. Одним из направлений деятельности NEDO является активизация использования и развитие новых источников энергии и технологии сохранения энергии   |
| Liquefied natural gas  | LNG          | Сжиженный природный газ  | —  |
| Liquefied petroleum gas  | LPG          | Газ сжиженный (сопутствующих)  | Пропан, пропилен, бутан, изобутан, бутилен или их смеси  |
| Japan Industrial Gases Association                                     | JIGA         | Промышленная газовая ассоциация Япония                                   | Организация, учрежденная для объединения таких ассоциаций, как Ассоциация кислорода, Ассоциация водорода, гелиевая Ассоциация и др., которые представляют газовую промышленность в Японии. JIGA была учреждена для лучшего представительства газовой промышленности в Японии и отклика на многочисленные изменения, происходящие в этой области в настоящее время              |
| Kyoto Protocol   | —            | Киотский протокол  | Протокол об ограничении и сокращении выбросов парниковых газов странами, участвующими в протоколе, в 2008–2012 гг. Принят в Киото, Япония, в 1997 г. Подписан 84 странами, в том числе Россией (1999 г.). На 2002 г. протокол ратифицирован 77 странами, включая все страны ЕС и Японию. США отказались участвовать в протоколе. Россией ратифицирован протокол осенью 2004 г. |
| Los Alamos National Laboratories                                       | LANL         | Лос-Аламосская национальная лаборатория                                  | Крупнейший в мире междисциплинарный научно-исследовательский центр, основанный в 1943 г. как сверхсекретная «Лаборатория атомных исследований». В ней была изготовлена первая атомная бомба в рамках так называемого «Манхэттенского проекта». LANL подчиняется министерству энергетики США и управляется университетом штата Калифорния                                       |
| Low emissions vehicle  | LEV          | Транспортное средство с низким уровнем выхлопных газов                   | —  |

Продолжение табл. П

| Английский термин                    | Аббревиатура | Русский эквивалент                                    | Краткое пояснение  |
|--------------------------------------|--------------|---|--|
| Lower flammability limit             | LFL          | Нижний предел возгорания                              | —  |
| LP Gas-air mixture                   | —            | Сжиженный газ, смешиваемый с воздухом                 | Сжиженный газ, хранящийся при низких давлениях и нормальных условиях, смешиваемый с воздухом для получения требуемых характеристик   |
| Membrane electrode assembly          | MEA          | Мембранно-электродный модуль                          | Модуль MEA (мембрана, электроды + платиновый катализатор) является составной частью ТЭ с твердым полимерным электролитом (PEMFC)   |
| Methane                              | —            | Метан   | Химическая формула $\text{CH}_4$   |
| Methanol                             | MeOH         | Метанол<br>$\text{CH}_3\text{OH}$                     | Метиловый спирт — простейший из спиртов, используется с более высокими спиртами как высокооктановый газолиновый компонент  |
| Miles per gallon equivalent          | MPGE         | —   | Пробег в милях на галлон условного топлива   |
| Nafion                               | —            | Мембрана «Нафион»                                     | Мембрана, изобретенная DuPont в начале 70-х гг., которой традиционно снабжаются все ТЭ мембранного типа (PEM). Основу составляет перфторосернистая кислота в форме полимера  |
| N+R [-61] Cation                     | —            | —   | Твердый полимер, используемый как электролит в топливных элементах   |
| National Academy of Sciences         | NAS          | Национальная Академия Наук США                        | Частное, некоммерческое сообщество выдающихся ученых. NAS была учреждена в 1863 г. законодательным актом Конгресса как рекомендательный орган по научным и техническим вопросам. NAS совместно с Национальной технической академией NAE и институтом медицины ИОМ и Национальный исследовательский совет (NRC) образуют сообщество «Национальные Академии» |
| National Renewable Energy Laboratory | NREL         | Национальная лаборатория по возобновляемой энергетике | Институт, первоначально образованный для исследований солнечной энергии в 1988 г. и переименованная в NREL при Министерстве энергетики в 1991 г. Играет ведущую роль в исследованиях по возобновляемой энергетике и ее эффективности   |

Продолжение табл. П

| Английский термин                  | Аббревиатура | Русский эквивалент  | Краткое пояснение   |
|------------------------------------|--------------|---|---|
| National Hydrogen Association      | NHA          | Национальная водородная ассоциация США                        | Ассоциация основана в 1989 г. Включает в себя представителей промышленных, учебных, исследовательских организаций (85 членов), включая представителей автомобильной, аэрокосмической, энергетической промышленности разного уровня. NHA способствует обмену информацией, коллективных проектов, стимулирует развитие водородных технологий и их использование |
| National low emissions vehicle     | NLEV         | —   | Транспортное средство с низким уровнем выхлопных газов, удовлетворяющее национальным стандартам   |
| Natural gas                        | NG           | Природный газ   | Состоит, главным образом из метана  |
| Natural gas vehicle                | NGV          | Транспортное средство на природном газе                       | —   |
| Natural gas vehicle Coalition (US) | NGVC         | Каолиция по использованию природного газа на транспорте (США) | —   |
| New electrical bus                 | NEBUS        | Электроавтобус нового типа                                    | —   |
| New electrical car                 | NECAR        | Электроавтомобиль нового типа                                 | —   |
| Near-zero emissions vehicle        | NZEV         | —   | Транспортное средство с очень низким уровнем выхлопных газов  |
| Neighbourhood electric vehicle     | NEV          | —   | Электромобиль с малым автономным пробегом   |
| Nickel metal hydride               | NiMH         | —   | Применительно к топливным элементам NiMH используется в сочетании никельметаллогидридные аккумуляторы. Ряд сплавов способны связывать атомарный водород в объеме, в 1000 раз превышающем их собственный. Обычно это соединения таких металлов, как цинк, литий и никель. С помощью гидридов можно хранить достаточно  |

Продолжение табл. П

| Английский термин                                     | Аббревиатура | Русский эквивалент   | Краткое пояснение  |
|---|--------------|--|--|
|   |              |  | водорода, чтобы использовать его в обратимых реакциях внутри аккумуляторов |
| Non-methane hydrocarbons                              | NMHC         | Неметановые углеводороды   | —  |
| Non-methane organic gases                             | NMOG         | Неметановые органические газы  | —  |
| Occupational Safety and Health Administration         | OSHA         | Управление охраны труда (Министерства охраны труда США)                                    | —  |
| Office of Energy Efficiency and Renewable Energy      | EERE         | Ведомство по эффективному использованию энергии и возобновляемой энергетике                | —  |
| Open circuit voltage                                  | OPV          | Напряжение холостого хода  | Равновесное падение напряжения на ТЭ в отсутствие тока через него          |
| Organization for Economic Cooperation and Development | OECD         | Организация экономического сотрудничества и развития                                       | —  |
| Original equipment manufacturer                       | OEM          | Изготовитель комплектного оборудования (в отличие от производителей комплектующих изделий) | —  |
| Outage  | —            | Простой  | —  |
| Oxidation catalytic partial                           | CPO          | Частичное окисление на катализаторе  | —  |
| Oxidation preferential                                | PROX         | Преимущественное окисление   | —  |



Продолжение табл. П

| Английский термин                                    | Аббревиатура | Русский эквивалент   | Краткое пояснение   |
|--|--------------|--|---|
| Oxidation selective                                  | selox        | Селективное окисление  | —   |
| Oxides of nitrogen                                   | Nox          | Окислы азота   | —   |
| Oxidation partial                                    | —            | Частичное окисление  | Частичное окисление топлива до окиси углерода в отличие от полного окисления до двуокиси углерода и воды. Достигается напуском воздуха в поток топлива в риформере. Преимущество над паровым риформингом в том, что это экзотермическая реакция, производящая собственное тепло |
| Pacific Northwest National Laboratory                | PNNL         | Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория       | —   |
| Partial zero emission vehicle                        | PZEV         | —  | Транспортное средство с почти нулевым уровнем выхлопных газов   |
| Partnership for Advancing the Transition to Hydrogen | PATH         | Партнерство по перспективам перехода к водородной энергетике | —   |
| Parts per million                                    | ppm          | Миллионная доля  | —   |
| Permeability   | —            | Проницаемость  | —   |
| Phosphoric acid fuel cell                            | PAFC         | Топливный элемент на фосфорной кислоте                       | Топливный элемент, в котором электролит состоит из фосфорной кислоты и протонов, перемещающихся от анода к катоду. Рабочая температура 160–220 °С   |
| Photoelectrochemical                                 | PEC          | Фотоэлектрохимический  | —   |
| Photovoltaic   | PV           | —  | Устройство для преобразования световой энергии в электрическую  |
| Propane  | —            | Пропан   | Химическая формула $C_3H_8$   |
| Propane MD-5   | —            | Пропан специального класса                                   | На 90% жидкого объема содержит пропан ( $C_3H_8$ ), на 5% — пропилен ( $C_3H_6$ )   |

Продолжение табл. П

| Английский термин  | Аббревиатура | Русский эквивалент  | Краткое пояснение  |
|--|--------------|---|--|
| Proton (polymer) exchange membrane/ polymer electrolyte membrane             | PEM          | Протон (полимер) — обменная мембрана/ Полимер-электролит мембрана | —  |
| Proton exchange membrane fuel cell or polymer electrolyte membrane fuel cell | PEMFC        | —   | —  |
| Reactant   | —            | Реагент   | Вещество, участвующее в реакции  |
| Reformate  | —            | —   | Углеводородное топливо, преобразуемое в водород и другие продукты для использования в топливных элементах  |
| Reformate (gas)  | —            | —   | Газ, поступающий из риформера в топливный элемент  |
| Reformer   | —            | Преобразователь   | Устройство для извлечения водорода из топлива (природный газ, пропан, газолин, метанол, этанол) для использования в топливных элементах  |
| Reforming autothermal  | ATR          | Автотермический преобразователь                                   | Получение водорода из топлива сочетанием частичного окисления и парового риформинга, с тепловыделением, достаточным для самоподдержания реакции, генерирует больше водорода, чем при частичном окислении |
| Reforming  | —            | Риформинг   | Химический процесс, связанный с реакцией углеводородного топлива в присутствии пара, кислорода или того и другого в обогащенном водородом потоке газа  |
| Reforming external   | —            | Внешнее преобразование  | Получение водорода до его поступления в топливный элемент  |
| Reforming internal   | —            | Риформинг внутренний  | При высокой температуре водород получается из топлива непосредственно в топливном элементе   |

Продолжение табл. II

| Английский термин                        | Аббревиатура | Русский эквивалент                       | Краткое пояснение  |
|--|--------------|--|--|
| Renewable energy                         | —            | Возобновляемая энергия                   | Форма энергии, воспроизводимая природой (на короткой временной шкале): ветер, солнечное излучение, гидроисточники и т. д. В научной литературе этому соответствует термин «sustainability»   |
| Reversible (regenerative) fuel cell      | —            | Топливный элемент обратимый              | Тип топливного элемента, в котором химические реагенты участвуют в обратимой реакции. Такой элемент может использоваться для электролиза воды и получения воздуха  |
| Society of Automotive Engineers          | SAE          | Общество инженеров-транспортников        | —  |
| Solid oxide fuel cell                    | SOFC         | Твердоокисный топливный элемент          | Топливный элемент, использующий в качестве электролита твердый непористый окисел металла, например, $ZrO_2$ , легированный $Y_2O_3$ . Окись углерода в преобразованном газе окисляется до двуокиси на аноде. Рабочая температура для этих ТЭ 800–1000 °С |
| Sports utility vehicle                   | SUV          | Внедорожник                              | Автомобиль повышенной проходимости обычно предназначенный для активного отдыха, чаще всего с приводом на все четыре колеса   |
| Separator plate                          | —            | Разделительная пластина                  | В сборке отделяет один топливный элемент от другого  |
| Shift conversion (reaction)              | —            | Реакция смещения                         | Реакция окиси углерода с водой, увеличивающая выход водорода и снижающая выход окиси углерода  |
| Solid polymer fuel cell                  | SPFC         | Твердополимерный топливный элемент       | —  |
| Stack                                    | —            | Пакет                                    | Топливные элементы обычно соединяются последовательно в пакете   |
| Steam re-former. Dampfre-former (german) | —            | Риформер паровой                         | Преобразует углеводородное топливо в присутствии пара с образованием водорода в качестве продукта. Наиболее распространенный способ получения водорода в больших количествах   |
| Steam re-forming. Vaporeforma-ge (fr.)   | —            | Риформинг (преобразование) в потоке пара | Реакция с углеводородным топливом в присутствии пара для образования водорода (распространенный метод получения водорода)  |

Продолжение табл. П

| Английский термин   | Аббревиатура | Русский эквивалент  | Краткое пояснение   |
|---|--------------|---|---|
| Super ultra-low emissions vehicle                                   | SULEV        | Транспортное средство с ультранизким выхлопом                             | —   |
| Total hydrocarbon   | THC          | Полный углеводород  | —   |
| Ultra-low emissions vehicle   | ULEV         | Транспортное средство с минимальным выхлопом                              | —   |
| United Kingdom Department of Environment, Transport and the Regions | DETR         | Министерство экологии, проблем транспорта и регионов                      | —   |
| United Kingdom Department of Trade and Industry                     | DTI          | Министерство торговли и промышленности Великобритании                     | —   |
| United Kingdom Partnership for a New Generation of Vehicles         | PNGV         | Партнерство по созданию авто-транспорта нового поколения в Великобритании | —   |
| United States Defense Advances Research Projects Agency             | DARPA        | Управление перспективных исследовательских программ                       | Государственное агентство США, основная структура по организации исследований и развития при Министерстве обороны США, DARPA основало сеть ARPANET, позднее стало называться ARPA |
| United States Department Protection Agency                          | EPA          | Управление по охране окружающей среды США                                 | —   |

Продолжение табл. II

| Английский термин  | Аббревиатура | Русский эквивалент   | Краткое пояснение  |
|--|--------------|--|--|
| United States Advanced Battery Consortium                | USABC        | Американский консорциум авто-мобильных систем резервного питания | —  |
| United States National Renewable Energy Laboratory       | NREL         | Национальная лаборатория по возобновляемой энергетике в США      | —  |
| United States Office of Advances Automotive Technologies | ОААТ         | Ведомство по развитию авто-мобильных технологий                  | —  |
| United States Office of Transport Technologies           | ОТТ          | Ведомство по транспортным технологиям                            | —  |
| Unitized regenerative fuel cell                          | URFC         | Скомпонованный регенерационный топливный элемент                 | —  |
| Upper flammability limit                                 | UFL          | Верхний предел возгорания  | —  |
| U. S. Fuel Cell Council                                  | USFCC        | Совет по топливным элементам США                                 | —  |
| Vehicle heavy-duty                                       | HDV          | Мощный грузовик  | —  |
| Vehicle light-duty                                       | LDV          | Легкий грузовик  | —  |
| Water-gas shift reaction                                 | —            | Реакция между окисью углерода и водой                            | Используется после риформинга топлива для увеличения выхода водорода и снижения содержания сильно токсичной окиси углерода |

Окончание табл. П

| Английский термин                                  | Аббревиатура | Русский эквивалент                                 | Краткое пояснение  |
|--|--------------|--|--|
| World Business Council for Sustainable Development | WBCSD        | Всемирный бизнес-совет по устойчивому развитию     | Коалиция 170 международных компаний. Задача WBCSD — способствовать экономическому росту, социальному прогрессу и сохранению экологического баланса |
| World Hydrogen Energy Conference                   | WHEC         | Международная конференция по водородной энергетике | —  |
| Zero electric vehicle                              | ZEV          | Электромобиль без выброса выхлопных газов          | —  |
| Zero-level emission vehicle                        | ZLEV         | Транспортное средство с нулевым выхлопом           | —  |

*Учебное издание*

**Радченко Руслан Васильевич**  
**Мокрушин Александр Станиславович**  
**Тюльпа Валентина Владимировна**

**ВОДОРОД  
В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Редактор О. В. Гусева  
Набор В. В. Тюльпа  
Верстка О. П. Игнатевой

Подписано в печать 24.11.2014. Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага типографская. Офсетная печать. Усл. печ.л. 18,7.  
Уч.-изд.л. 14,0. Тираж 100 экз. Заказ

Издательство Уральского федерального университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8(343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8(343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс 8(343) 358-93-06  
E-mail: press-urfu@mail.ru

Для заметок

---



Для заметок

---

