

# ПРИМЕНЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В НОВЕЙШИХ БЫТОВЫХ И КОММЕРЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ПОСРЕДСТВОМ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГИИ\*

(глава 5 из книги «Применение солнечной энергии в зданиях»)

*Т.Н. Везироглу<sup>1</sup>, В.Дж.Д. Эшер<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт чистой энергии, Университет Майами  
а/я 248294, Coral Gables, Флорида 33124-0620, США

<sup>2</sup>Компания Escher Technology  
Сент-Джонс, Мичиган, США

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.010-029

Заключение совета рецензентов: 15.06.17    Заключение совета экспертов: 18.08.17    Принято к публикации: 12.09.17



## SOLAR ENERGY UTILIZATION IN ADVANCED RESIDENTIAL AND COMMERCIAL APPLICATIONS THROUGH HYDROGEN ENERGY

(Chapter 5 from "Solar Energy Application in Buildings")

*T. Nejat Veziroğlu<sup>1</sup>, William J.D. Escher<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Clean Energy Research Institute, Mechanical Engineering, University of Miami  
P.O. Box 248294 Coral Gables, FL 33124-0620, USA

<sup>2</sup>Escher Technology Associates  
St. Johns, Michigan, USA

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.010-029

Referred 15 June 2017    Received in revised form 18 August 2017    Accepted 12 September 2017

\*Везироглу Т.Н., Эшер В.Дж.Д. Применение солнечной энергии в новейших бытовых и коммерческих установках посредством водородной энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(07-09):10-29.  
Ранее: Copyright © 1979 by Academic Press, Inc. All rights of reproduction in any form reserved. ISBN 0-12-620860-3.



Турхан Н. Везироглу  
T.N. Veziroglu

**Сведения об авторе:** д-р наук (теплообмен), профессор, президент Международной ассоциации водородной энергетики, член 18 научных организаций.

**Образование:** Городской профессиональный колледж, Имперский колледж науки и техники (Великобритания), Лондонский университет по специальности «Машиностроение» (1946 г.); доктор наук по теплообмену (1951 г.).

**Награды:** лауреат нескольких международных наград.

**Опыт работы:** профессор, заведующий кафедрой технического факультета в Университете Майами (1962–1979 гг.); директор Института чистой энергетики (США), Coral Gables, Флорида (1974–2009 гг.); основатель и директор Международного центра технологий по водородной энергетике, Стамбул, Турция (2004–2007 гг.). Почетный профессор Университета Майами (2009 – по настоящее время); основатель и президент Международной ассоциации водородной энергетики (1976 – по настоящее время). Почетный главный редактор Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ).

**Область научных интересов:** неустойчивость двухфазного потока; внутренняя теплопередача; солнечная энергия; глобальное потепление; экологические проблемы; возобновляемые источники энергии и система использования водородной энергии.

**Публикации:** более 350, редактор 160 книг и трудов конференций, соавтор книги «Солнечная водородная энергетика: сила, которая сохранит Землю».

**Information about the author:** Ph.D. in Heat Transfer, Professor, President of International Association for Hydrogen Energy, Member of 18 scientific organizations.

**Education:** The City and Guilds College, the Imperial College of Science and Technology, University of London with degrees in Mechanical Engineering, 1946, Advanced Studies in Engineering, 1947; Ph.D. in Heat Transfer, 1951.

**Awards:** Recipient of several international awards.

**Experience:** University of Miami, Engineering Faculty, Department Chairman, Professor, 1962–1979; Clean Energy Research Institute, Coral Gables, FL, Director, 1974–2009; International Centre for Hydrogen Energy Technologies, Istanbul, Turkey, Founding Director, 2004–2007. University of Miami, Professor Emeritus, 2009–present. International Association for Hydrogen Energy, Founding President, 1976–present. Honorary Editor-in-Chief of the International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEЕ).

**Research interests:** two-phase flow instabilities, interstitial heat transfer, solar energy, global warming, environmental problems, renewable energy sources and hydrogen energy system.

**Publications:** more than 350, Editor of 160 books and proceedings, co-author of book “Solar Hydrogen Energy: the Power to Save the Earth”.

## 1. Введение

Сегодня на фоне истощения запасов и подорожания традиционных ресурсов во многих странах мира ведутся работы по внедрению солнечных энергетических систем первого поколения, способных удовлетворить текущие потребности в отоплении и охлаждении помещений и нагреве воды. Такие системы основываются главным образом на плоских пластинчатых коллекторах, ограничивающих температуру рабочей жидкости в пределах 93,3 °С. Этот предел может быть значительно увеличен за счет использования вакуумных трубчатых коллекторов нового образца, применение которых, однако, сопряжено с дополнительными расходами на коллектор. В последнее время в свете решения задачи достижения высоких температур большой интерес вызывают концентрирующие коллекторы, несмотря на сложности, сопутствующие их применению.

В ретроспективе тенденция к повышению температуры рабочих жидкостей является прямым следствием необходимости достичь более высокой производительности и большей гибкости в работе солнечных энергетических систем. В дальнейшем поиск более гибкого и развернутого решения можно будет

сфокусировать на «универсальных» системах преобразования солнечной энергии. Это позволит решить не только проблему отопления помещений и нагрева воды, но и охлаждения, которое пока редко предлагается в современных низкотемпературных системах. Высокие температуры можно использовать в специальных процессах, таких, например, как высокотемпературное приготовление пищи. Кроме того, «универсальные» системы позволят связать расход электроэнергии с реальными потребностями. Появится топливо для переносных электростанций и даже легкого автомобильного транспорта. А потребности в охлаждении будут удовлетворены за счет систем контроля окружающей среды, следящих за уровнем отопления, охлаждения и влажности.

Однако реализация этих проектов требует значительно более продуманной системы преобразования солнечной энергии. Помимо этого, потребуются новые способы хранения и распределения энергии внутри системы. Такие традиционные способы, как нагрев воды больше не смогут решать все поставленные задачи.

Предполагается, что новым средством для достижения стоящих перед современными энергетическими системами целей может стать «водородная энер-



гия», которая подразумевает использование в качестве топлива газообразного водорода или водородно-кислородной смеси, полученной путем разложения воды на ее составляющие с помощью солнечной энергии.

В настоящей главе рассматриваются способы достижения этих целей в контексте новейших бытовых и промышленных систем преобразования солнечной энергии и связанных с ними технических требований.

Авторами обсуждаются вопросы: 1) получения солнечного водорода; 2) хранения и распределения водорода в солнечных энергетических системах; 3) использования водорода в качестве топлива; 4) разработки обогревателей, работающих на водороде; 5) разработки систем кондиционирования и охлаждения на основе водорода; 6) получения электроэнергии за счет водородных технологий.

## 2. Получение солнечного водорода

### 2.1. Общая концепция

Водород – это вторичное топливо, или синтетический вид энергии наподобие электричества, который можно получать за счет использования первичного энергоресурса. Традиционным способом является процесс разложения воды, например, хорошо известный электролиз, в результате которого происходит выделение как водорода, так и кислорода (составляющие воды) в виде свободного газа. В настоящее время ведутся исследования более сложных процессов, таких как многоступенчатый процесс термохимического разложения воды. В будущем они смогут дополнить и даже полностью заменить электролиз воды. Однако следует отметить, что и технология электролиза не стоит на месте и непрерывно совершенствуется.

Несомненно, среди первичных источников энергии, которые используются для получения водорода, солнце еще долгое время будет оставаться основным кандидатом. Получение солнечного водорода по своей сути сводится к захвату и преобразованию энергии солнечного излучения в целях разложения воды, выступающей в качестве «исходного сырья», на водород и кислород. Этот процесс можно представить как технологический, в том или ином виде, или как биологический. В последнем случае можно наблюдать, что процесс фотосинтеза в значительной степени обусловлен расщеплением воды в довольно сложном биоцикле. В настоящей работе рассматриваются только «технологические» процессы.

В работе было уделено внимание двум принципиально разным масштабам получения солнечного водорода: крупномасштабному «заводскому» производству (в тоннах полученной продукции) и мелкомасштабному «распределенному» производству (в киловаттах и меньше).

В настоящей главе рассматривается небольшой масштаб производства, которое подходит как для

бытового, так и для коммерческого применения. Другими словами, использование энергии солнца для получения водорода (и кислорода) из воды посредством электролиза воды (единственный существующий на сегодня метод) рассматривается в контексте новейшей системы преобразования солнечной энергии, которую можно использовать в бытовых и коммерческих целях, а также в легкой промышленности.

### 2.2. Электролиз воды

Электролиз воды – это электрохимический процесс, протекающий в специальных устройствах, которые называются электролизерами. На мировом рынке представлены различные модели электролизеров, выпускаемые такими компаниями, как Lurgi AG, Asea Brown Boveri Ltd, DeMag, The Electrolyser Corporation, а также DeNora и Teledyne Energy Systems. Электролизер преобразует электрическую энергию в водородную энергию, а эффективность его работы, колеблющаяся на сегодняшний день в диапазоне 65 ÷ 75 %, зависит от типа и рабочих характеристик устройства. Это определение основывается на высшей теплотворной способности полученного водорода по отношению к мощности постоянного тока, подаваемого на электролизные ячейки.

Описание методики использования электролизеров воды выходит за рамки настоящей работы, кроме краткого упоминания основных процессов. При определенных условиях постоянный ток, проходя через воду между двумя электродами, вызывает разложение воды на ее составляющие. При наличии такого электролита, как гидроксид калия (вода сама по себе является слабым проводником электричества) образуются ионы водорода и гидроксиды ( $H^+$  и  $OH^-$ ). Положительные ионы водорода мигрируют к катоду или отрицательному электроду, где они объединяются с электронами и образуют молекулы водорода  $H_2$ . Собираясь на поверхности электрода, молекулы отрываются от него и в виде пузырьков поднимаются к поверхности электролита, где газ может быть собран. Аналогичным способом ионы гидроксидов притягиваются к положительному электроду, или аноду, где электрон отдается с образованием воды и кислорода. Кислород переходит в свою молекулярную форму  $O_2$  и собирается точно таким же способом, как и водород.

На сегодняшний день существуют два основных подхода к конструкции электролизеров: монополярный и биполярный. Первый иногда называют электролизером «бункерного» типа, а второй – фильтр-прессного типа. Схематические изображения этих типов электролизеров представлены на рис. 1. В обоих случаях напряжение, которое подается на каждую отдельную ячейку, а также на повторяющийся элемент, включающий анод и катод, на разделитель (выполненный, как правило, из асбеста) и электролит, составляет порядка 2,0 В. При этом чем меньше напряжение, тем выше общая эффективность устройства, соответствующая в среднем около 1,48 В на 100 % КПД преобразования.



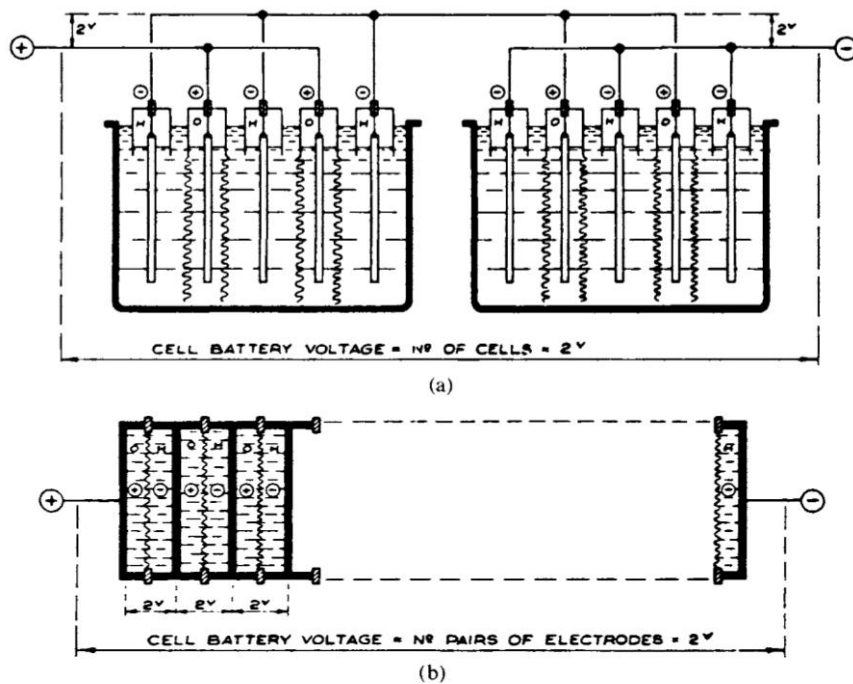


Рис. 1 – Схематические изображения монополярного (а) и биполярного (б) электролизера (предоставлено компанией The Electrolyser Corporation Ltd)  
 Fig. 1 – Schematic diagrams of (a) unipolar and (b) bipolar electrolyzer construction. (Courtesy of The Electrolyser Corporation Ltd.)

На рынке представлены портативные электролизеры различных производителей. Например, производительность электролизера компании Electrolyser Corporation составляет  $0,57 \text{ м}^3/\text{ч H}_2$ . Для сравнения стандартный сварной цилиндр для хранения водорода под давлением 2 250 psi вмещает около  $6,23 \text{ м}^3$ , или  $0,4536 \text{ кг H}_2$ . Большие промышленные установки рассчитаны на входные мощности порядка  $1 \div 2 \text{ МВт}$  электроэнергии с перспективой их увеличения в будущем до  $5 \div 20 \text{ МВт}$  на каждую установку. Электролизная система фирмы Asea Brown Boveri Ltd, установленная на Асуанском гидроузле в Египте и задействующая множество агрегатов, дает в общей сложности около  $150 \text{ МВт}$  электроэнергии.

В отдаленной перспективе стоит вопрос не столько разработки крупных проектов для промышленного производства водорода, сколько повышения эффективности и окупаемости электролизеров будущего поколения. Эффективность на уровне более 90 % будет весьма ощутима вместе со снижением себестоимости с сегодняшнего уровня  $\$250/\text{кВт}$  электроэнергии до порядка  $\$100/\text{кВт}$ . Следует отметить, что значительная часть затрат связана с «процессом преобразования» поступающего переменного тока в требуемый для подачи на ячейки постоянный ток. В этот процесс вовлечено множество устройств, таких как выпрямители, преобразователи, как правило, дорогие, а также управляющие устройства, переключатели и прочие приборы. При использовании локального источника генерации энергии, его будет достаточно для соблюдения всех условий, необходимых для функционирования ячеек. Например, исследования показали, что выработка постоянного тока и прямое подсоединение к электролизеру могут вдвое сократить расходы по сравнению с использо-

ванием переменного тока, требующего «преобразования». Как будет показано, выработка постоянного тока может стать практическим шагом на пути к сокращению расходов и повышению общей эффективности преобразования применительно к устройству, рассматриваемому в рамках настоящей работы.

### 2.3. Генерация солнечной электроэнергии для электролиза

Как уже отмечалось, для процесса расщепления воды требуется электроэнергия. Существует множество способов получения электроэнергии с помощью солнечных энергосистем: некоторые из них уже проверены и широко применяются, в то время как другие существуют пока только в теории, хотя технически могут быть признаны целесообразными. Мы остановимся только на двух основных методах, работающих в пилотном режиме: фотоэлектрическое (прямое) преобразование и использование тепловых двигателей или генераторов. С развитием фотоэлектрического, термоэлектрического, термоэлектронного и ряда других смешанных методов преобразования их можно будет применять в солнечноводородных системах.

### 2.4. Фотоэлектрические системы

Так называемые солнечные элементы (фотоэлементы) хорошо изучены и имеют практическое применение непосредственно для генерации электроэнергии из солнечного излучения. Впервые этот метод был продемонстрирован в качестве способа снабжения электроэнергией искусственного спутника земли и ракетоносителя Авангард-1, запущенного в 1958 г. С тех пор данный метод нашел применение в ряде наземных проектов в области солнечной энер-



гетики, например, в устройствах удаленной связи, на буйках в море.

Существует несколько видов фотоэлектрических устройств: кремниевые элементы; тонкопленочные структуры, например, на основе сульфида кадмия; ячейки из более сложных трехкомпонентных материалов. Все они достаточно дорогие и обладают ограниченной в некоторой степени эффективностью порядка  $10 \div 15$  %. Тем не менее перспективы технологии массового производства в свете снижения издержек и повышения эффективности выглядят вполне обнадеживающими, хотя полное развертывание систем преобразования солнечной энергии для бытового и коммерческого использования будет ограничено до появления соответствующих разработок. Положительным аспектом фотоэлектрического преобразования является то, что вырабатываемый постоянный ток можно напрямую подключать к электролизным системам без необходимости во вспомогательном оборудовании и процессах, увеличивающих издержки и снижающих эффективность. Эксперименты с фотоэлектрическими/электролизными системами, проведенные в калифорнийской Лаборатории реактивного движения, показали неплохие результаты с точки зрения сочетаемости компонентов.

### 2.5. Тепловые двигатели и генераторы

При наличии действующих среднетемпературных и высокотемпературных солнечных коллекторов тепловые двигатели, работая на солнечной энергии, могут вырабатывать мощность на валу, которую, в свою очередь, можно использовать для питания стандартных генераторов, вырабатывающих электроэнергию для электролиза. Несмотря на то что генераторы обладают, как правило, высокой эффективностью (порядка 90 % и выше в зависимости от типа и размера устройства), КПД теплового двигателя ограничен температурными факторами (С. Карно), а также эффективностью механической системы. Вместе с тем, в зависимости от выбора конкретной системы, общий уровень эффективности выработки электроэнергии может быть значительно выше, чем у аналогичных фотоэлектрических установок. Ключевым моментом в данном случае является обеспечение высокой температуры рабочей жидкости на выходе из солнечного коллектора, что предполагает использование фокусирующих коллекторов.

Таким образом, в любой эффективной системе преобразования солнечной тепловой энергии в мощность на валу присутствуют фокусирующие коллекторы, способные отслеживать солнце. С достижением высоких температур можно выбрать соответствующий термодинамический цикл и подходящее механическое оборудование.

В большинстве случаев применяются циклы двигателей внешнего сгорания, например, цикл Стирлинга, цикл Ренкина и цикл Брайтона. Здесь уместно отметить параболоцилиндрический зеркальный концентратор с системой слежения за солнцем и уста-

новленным в его фокусе теплоприемником двигателя Стирлинга. Такая система может обеспечить температурные условия на уровне  $815,6 \div 982$  °С, требуемые для работы двигателя с КПД вала порядка 40 %.

На высокотемпературном конце может применяться также газовая турбина цикла Брайтона, использующая в качестве рабочей жидкости инертные газы и даже воздух. В таком случае в фокус концентрирующего коллектора того или иного типа, обладающего высокой концентрацией, также устанавливается теплообменное устройство.

При необходимости в получении более низких температур можно применять установки, работающие по циклу Ренкина, например, паросиловую установку, функционирующую в температурном диапазоне рабочей жидкости от 260 °С до 538 °С и вырабатывающую мощность на валу со средним и высоким значением КПД. Эффективность таких систем составит порядка  $25 \div 35$  % в зависимости от условий охлаждения или отвода тепла. В малых проектах могут применяться поршневые расширители, обеспечивающие работу по циклу Ренкина, в частности, стандартные паровые двигатели.

Ключевое значение приобретает выбор генераторов, наиболее подходящих к тепловому двигателю. Следовательно, как отмечалось в главе об электролизерах, оптимальное электрическое соответствие ячейкам обеспечит значительное снижение издержек и позволит повысить эффективность работы. Таким образом, ожидается, что выработка постоянного тока будет играть важную роль в солнечно-водородных энергоустановках будущего поколения.

## 3. Хранение и распределение водорода в солнечных энергоустановках

### 3.1. Введение

Для солнечных энергоустановок, задействующих энергию водорода в качестве накопителя энергии и несущей среды, необходимо разработать способы хранения водорода (и, возможно, кислорода) и его распределения в требуемых условиях до места использования, например, нагревательных установок. Аналогичным образом функционируют современные системы газоснабжения, которые сегодня применяются в гораздо больших масштабах.

На данный момент подземные газохранилища используются для «поддержания уровня нагрузки» систем производства и транспортировки с учетом резких сезонных колебаний спроса на газ в течение календарного года. После поставки газа в городскую сеть, где обычно происходит одоризация и падение давления, его необходимо доставить до всех конечных потребителей. Поэтому частные дома и организации должны быть оснащены специальным газовым оборудованием, включая газовые трубы, клапаны, регуляторы и счетчики. В солнечной энергосистеме большинство этих функций будет выполняться за счет водородных технологий.



Итак, в данном контексте должны рассматриваться системы хранения и распределения водорода и кислорода. Система хранения требуется для обеспечения соответствия между темпом производства водородной энергии, который ограничен максимальной продолжительностью солнечного излучения, и «пиковым» спросом на водородную энергию со стороны конечного потребителя. Система распределения требуется для транспортировки водорода и кислорода до точки потребления при соответствующих значениях давления и скорости потока, а также для обеспечения безопасности процесса на всех его этапах.

### 3.2. Системы хранения

Системы хранения водорода и кислорода для солнечных энергосистем бытового и коммерческого назначения, вероятно, ограничены установками, способными оперировать с этими составляющими в газообразной форме. В случаях когда для удобства хранения и использования требуется жидкая форма (как в некоторых типах систем транспортировки), может быть применено криогенное сжижение. В целом для систем рассматриваемого в работе масштаба это оказалось экономически невыгодно, поэтому криогенный водород и кислород не будут рассматриваться.

Водород и кислород в газообразном состоянии можно хранить в различных видах контейнеров или баллонов высокого давления при разных значениях давления. Кроме того, существует отдельный способ хранения водорода, предоставляющий значительные преимущества с точки зрения повышения плотности хранения при низких и средних значениях давления. В этом случае используется металлгидридная система хранения, которая будет рассматриваться ниже.

### 3.3. Хранение водорода и кислорода в баллонах высокого давления

Некоторые типы электролизеров могут вырабатывать водород при повышенном давлении (около 100 psi), однако большая часть из них генерирует газ при давлении чуть выше атмосферного, что требует сжатия водорода до уровня максимального значения давления хранения. Вероятно, это значение окажется ниже уровня 2 250 psi, который требуется при коммерческой поставке в баллонах, что обусловлено трудностью сжатия водорода с высоким коэффициентом давления. Кислород, обладающий более высокой молекулярной массой, является гораздо более плотным газом и сжимается легче, поэтому «задавать выбор» верхнего уровня давления будет водород.

Баллоны высокого давления для хранения водорода бывают металлические и неметаллические. Традиционный металлический резервуар состоит из бесшовных сварных или цельных труб с приварен-

ными на каждом конце полусферическими головками. При высоких давлениях используются такие же кованые «трубные пучки», как и при промышленных поставках газа. В неметаллических баллонах применяются эпоксидные стекловолоконные структуры с последующей установкой герметизирующего вкладыша внутри резервуара. Одно из преимуществ эпоксидной стекловолоконной структуры заключается в невозможности появления в ней трещин, которые могут возникнуть в металлических баллонах.

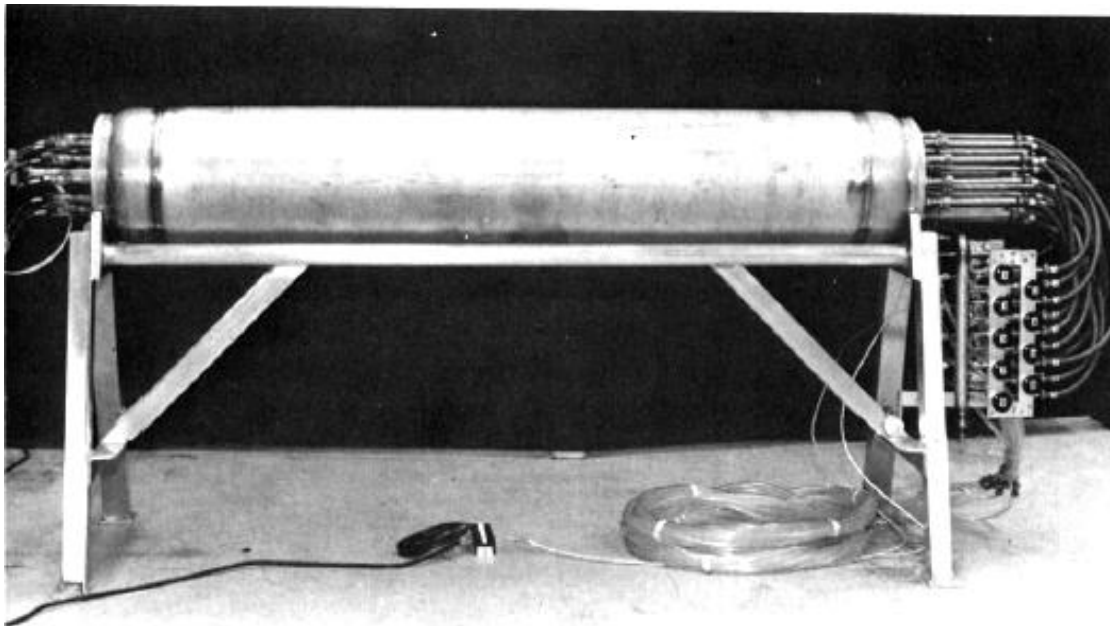
Отдельную проблему водородных технологий представляет водородное охрупчивание – процесс разрушения некоторых металлов вследствие воздействия атомарного водорода, особенно в местах возникновения локальной текучести материала. Это приводит к потере эластичности и прочности поврежденных структур. Большинство металлов, за исключением алюминиевых сплавов и сплавов на основе меди, восприимчиво к этому явлению, поэтому при разработке резервуаров такого типа нужно учитывать опыт эксплуатации баллонов высокого давления.

### 3.4. Металлогидридные системы хранения водорода

Значительный интерес вызывает другой способ хранения газообразного водорода, который с помощью отдельных металлических сплавов и интерметаллических соединений обеспечивает плотность хранения, в объемном исчислении значительно превосходящую хранение в баллонах высокого давления. Специалисты Брукхейвенской национальной лаборатории (Brookhaven National Laboratory, BNL) в США получили такое металлгидридное соединение – железотитановый гидрид. Несмотря на то что это соединение слишком тяжело для применения в большинстве типов систем транспортировки (имеются исключения), его можно уверенно использовать в стационарных системах хранения водорода, рассматриваемых в рамках настоящей работы.

Экспериментальная установка для хранения водорода на основе железотитанового гидрида, разработанная в Брукхейвенской национальной лаборатории по заказу Государственной электрической и газовой компании Нью-Джерси (Public Service Electric and Gas Company, PSE&G), вмещает около 5,9 кг водорода. Установка (рис. 2) содержит примерно 408 кг сплава Fe-Ti в твердой форме. Под давлением водород насыщает металл, а теплота образования гидрида отводится охлажденной водой (см. многочисленные водоотводы в правой части устройства на рис. 2).





**Рис. 2.** – Экспериментальная установка для хранения водорода на основе железотитанового гидрида (фотография предоставлена Брукхейвенской национальной лабораторией)  
**Fig. 2** – Experimental iron titanium hydride hydrogen storage unit (Brookhaven)  
 (Courtesy of Brookhaven National Laboratory.)

Водород выделяется по требованию за счёт нагретой воды, циркулирующей в каналах сквозь гидридный слой. В большинстве случаев избыточное тепло, выделяемое в смежных процессах, можно использовать для подачи подогретой воды с сохранением, как правило, тепловой энергии. Гидридный слой прошел множество циклов в экспериментальном контуре хранения электроэнергии, оснащённом электролизером и топливным элементом. Более подробная информация об этой установке и ее работе была представлена Брукхейвенской национальной лабораторией.

### 3.5. Системы распределения

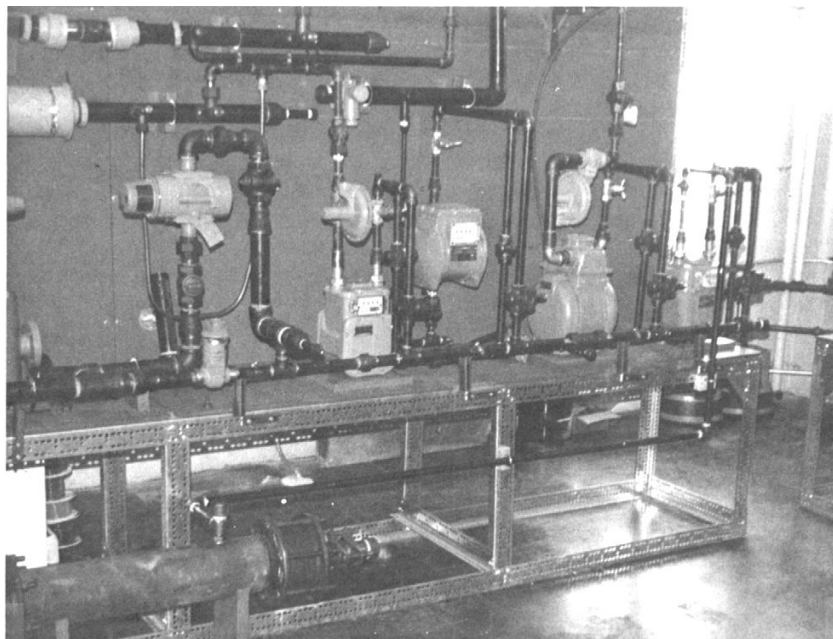
Для солнечной энергосистемы, использующей водород, как и для небольшой газовой системы требуются трубы, соединительные элементы, клапаны и задвижки, а также другое соответствующее оборудование для транспортировки водорода и, при необходимости, кислорода, от электролизера в хранилище, а затем из хранилища – к работающим в системе устройствам, таким как воздухонагреватели и водонагреватели.

В целом оборудование для газораспределения считается хорошо отработанным и доступным. Однако сегодня на рынке отсутствуют качественные и недорогие устройства для домашнего и коммерческого производства наподобие газовых приборов.

Очевидно, активная разработка и внедрение таких устройств начнется тогда, когда в отрасли с достаточной силой заработают рыночные механизмы.

Между тем работа в данном направлении ведется в ряде исследовательских лабораторий. Наибольший интерес представляет проект Института газовых технологий, реализуемый при финансовой поддержке Управления энергетических исследований и разработок США. Специалисты института разработали серию испытательных контуров для бытовых и коммерческих устройств, применяющихся сегодня в современной газораспределительной системе, но работающих на газообразном водороде. Основная задача заключается в оценке эффективности и надежности газового производственного оборудования в условиях потока водорода. Экспериментальная конструкция состоит из датчиков, регуляторов, клапанов, задвижек, труб и других элементов (металлических и пластиковых), скрепленных между собой и смонтированных посредством различных технологий, что обеспечивает циркуляцию водорода в системе при реальных значениях рабочего давления. Испытательный контур бытового устройства представлен на рис. 3.

Следует отметить, что все оборудование для испытаний предоставлено производителями и рядом газовых компаний, которым направят результаты по итогам проекта, стартовавшего весной 1977 г.



**Рис. 3** – Экспериментальная бытовая установка с испытательным водородным контуром (предоставлено Институтом газовых технологий, США)

**Fig. 3** – Experimental residential system hydrogen test loop (IGT) (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)



По всей видимости, кроме вопросов, связанных с разработкой и испытаниями, требования к распределительной системе в новейшей солнечной энергоустановке не вызывают затруднений.

#### 4. Водород в качестве топлива

##### 4.1. Общие положения

Сегодня водород, несмотря на перспективу занять ведущую позицию в качестве синтетического топлива или «энергоносителя», редко используется как газообразное топливо. Несмотря на то что в технологическом контексте водород является высококачественным чистым топливом, его стоимость значительно превышает стоимость ископаемого топлива, в частности природного газа (преимущественно метана и его производных). Это обусловлено тем, что на земле не существует водорода в свободном состоянии. Практически весь водород находится в виде химических соединений, например воды. Но по мере истощения запасов жидкого ископаемого топлива с последующим повышением его стоимости обозначатся явные конкурентные преимущества водородных технологий. Кроме того, разработка эффективных методов серийного производства водорода посредством одного или более процессов «расщепления воды» выйдет на новый более плодотворный уровень, что приведет к снижению стоимости водорода по сравнению с сегодняшним уровнем цен.

С другой стороны, можно отметить тенденцию к широкому применению газообразного топлива со значительным содержанием водорода. В качестве примера можно привести сегодняшний «низкокалорийный природный газ», получаемый путем газификации угля, а также промышленный или городской газ, использовавшийся несколько десятилетий назад. Последний был вытеснен природным газом в 30-40-х

гг. XX в. во многих промышленно развитых странах. Сегодня на производственных и перерабатывающих установках, где в качестве отходящего газа образуется нечистый водород, его иногда используют как топливо, например, в бойлере для образования пара.

Североамериканская производственная компания (North American Manufacturing Company), занимающаяся строительством линий для подачи природного газа и поставкой топочного оборудования, разработала несколько систем сжигания водорода, включая специальные средства контроля. Рабочие элементы системы, подобранные специальным образом под работу с водородом, продемонстрировали хорошие характеристики.

В последнее время водород стал экспериментально применяться в качестве топлива для электростанций на базе поршневых и роторных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а также топлива для газотурбинной установки. В данной работе авторы рассматривают перспективу использования водорода в качестве транспортного топлива. Кроме способности к длительной эксплуатации, водород, получаемый из воды с помощью неископаемых первичных энергоресурсов, таких как солнечная энергия, обладает неплохими техническими характеристиками. Например, водород рассматривается в качестве отличной альтернативы авиационному топливу. В криогенном (сжиженном) состоянии водород обладает энергией на единицу массы, в 2,8 раз превышающей этот показатель для используемых сегодня видов углеводородного топлива. Это особенно важно в авиации, поскольку вес и рабочие характеристики самолета крайне чувствительны к гравиметрической теплотворной способности (теплота сгорания) топлива. С другой стороны, помимо достоинств, у водорода есть и недостатки: слишком низкое значение объемной теплоты сгорания, чрезвычайно низкая температура и крайне неустойчивый характер (в криогенном состоянии).



В настоящее время водород применяется в основном в качестве химического посредника и технологического раствора в химической промышленности и нефтепереработке. В частности, для производства аммиака требуется получить водород из углеводородного сырья на этапе производства синтез-газа.

Возвращаясь к перспективам использования водорода в качестве топлива для бытовых и коммерческих устройств, следует отметить ряд исследовательских центров, разрабатывающих опытные образцы приборов на водороде, и пилотные системы распределения водорода. К числу таких центров относятся лаборатории Американской ассоциации газовой промышленности (англ. American Gas Association (AGA) Laboratories) в Кливленде и Огайо, а также Институт газовых технологий в Чикаго. Результаты работы, ведущейся в этих исследовательских центрах, будут рассмотрены в соответствующих разделах данной главы.

#### 4.2. Значимые характеристики водородного топлива

Нижний (обедненный) предел воспламеняемости водорода в воздухе составляет около 4 % (по объему), в то время как верхний (обогащенный) предел – приблизительно 75 %. Этот диапазон значений воспламеняемости значительно шире, чем у природного газа (около 5 % и 15 % соответственно). Однако у некоторых видов топлива, применяемых сегодня (особенно у жидкого топлива), нижний предел значительно ниже, чем у водорода. В случае аварийной утечки или разлива такое значение нижнего предела означает возможность возникновения пожара или взрыва. В этом отношении водород может оказаться более безопасным топливом, чем жидкое горючее (например, бензин).

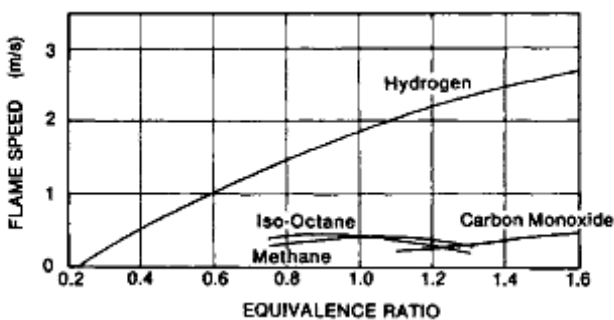


Рис. 4 – Сравнительные характеристики скорости распространения пламени  
(из Journal of Chemical & Engineering, № 4, 226 (1959))  
Fig. 4 – Comparative fuel laminar flame speed characteristics  
[From J. Chem. Eng. 4, 226 (1959).]

Рабочие характеристики газа в таких системах сгорания, как горелки приборов, обусловлены тремя ключевыми техническими аспектами: скоростью распространения ламинарного пламени, дистанцией гашения и минимальной энергией зажигания. Характеристики водорода в сравнении с другими видами топлива представлены на рис. 4, 5 и 6 соответствен-

но. Графики показывают, что водород ведет себя совершенно уникально.

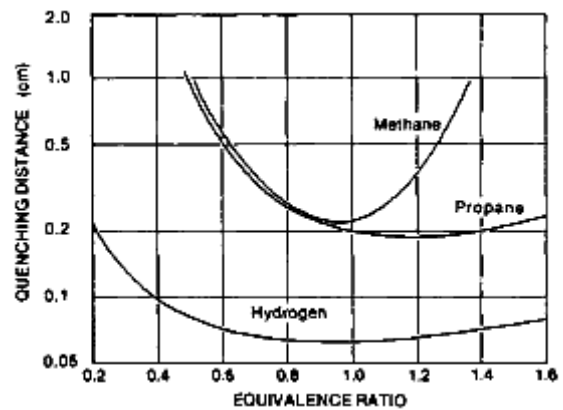


Рис. 5 – Сравнительные характеристики дистанций гашения топлива  
(из Journal of Chemical & Engineering, №15, 798 (1947))  
Fig. 5 – Comparative fuel quench distance characteristics.  
[From J. Chem. Phys. 15, 798 (1947).]

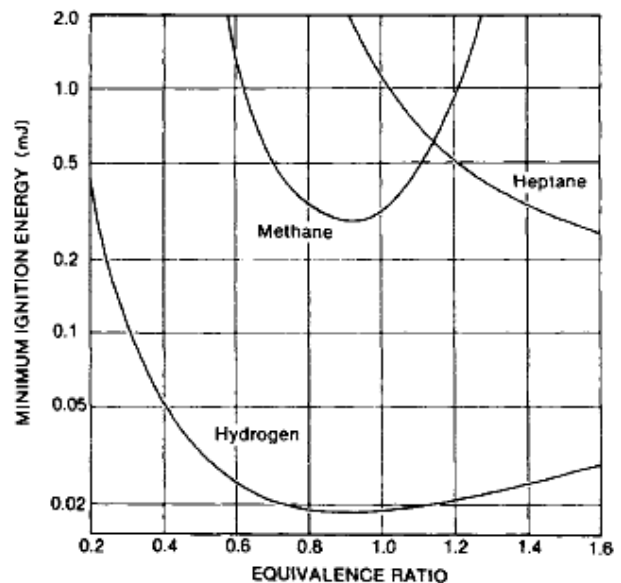


Рис. 6 – Минимальный уровень энергии зажигания различных видов топлива  
(из журнала Journal of Chemical Physics, №15, 798 (1947))  
Fig. 6 – Comparative fuel minimum ignition energy characteristics. [From J. Chem. Phys. 15, 798 (1947).]

Применительно к практическому применению таких устройств, как, например, бытовые газовые приборы, можно назвать два следствия этого поведения водорода:

1. Устройства, предназначенные для работы на традиционном топливе, в частности природном газе, не совсем подходят для использования водорода и могут демонстрировать неудовлетворительные рабочие характеристики или вовсе не работать.
2. Устройства, разработанные специальным образом для использования всех преимуществ водорода, способны продемонстрировать превосходные



рабочие характеристики и маневренность в эксплуатации. Более того, использование водорода в таких устройствах открывает значительные возможности для упрощения системы и снижения затрат.

На рис. 4–6 показано, как практически подойти к выбору конструкции устройств, работающих на водороде, с точки зрения вышеизложенных выводов.

#### *Скорость распространения пламени*

Чрезвычайно высокая скорость распространения пламени водорода в очень широком диапазоне стехиометрии (соотношение топливо/воздух от обедненного до обогащенного состояния) является прямым следствием высокой реактивности водорода в качестве топлива (см. рис. 4). В системах, работающих на предварительно смешанных топливно-воздушных смесях, такие водородно-воздушные смеси сгорают очень быстро (короткое интенсивное пламя), и пламя может выходить за расчетные пределы распространения, то есть может возникнуть эффект «обратного потока» в канале предварительного перемешивания.

#### *Дистанция гашения*

По сравнению с другими видами топлива, пламя водорода может распространяться сквозь более узкие отверстия и проходы, не угасая вследствие теплопроводности и других поверхностных эффектов. Поэтому пламегасящие и другие устройства подобного типа, хорошо взаимодействующие с другими видами топлива, не могут надежно функционировать с водородом или могут вовсе не работать, поскольку их действие основано на принципе гашения. Это также обусловлено эффектом обратного потока водородно-воздушных смесей (см. рис. 5).

#### *Энергия зажигания*

Минимальный уровень энергии зажигания водорода на порядок ниже аналогичного показателя для других видов топлива: 0,02 МДж по сравнению с 0,3 МДж (рис. 6).

С одной стороны, это сводится к проблеме безопасности в случае утечки газа в устройствах. Общее правило относительно утечек водорода обязывает автоматически признать возникновение пожароопасной ситуации. С другой стороны, это свойство легкой воспламеняемости водорода способствует внесению ряда усовершенствований в конструкцию систем зажигания, таких как отведение пламени пилотной горелки и другие способы высокоэнергетического зажигания. Далее будет продемонстрировано, что для работы с водородом подходят исключительно системы каталитического зажигания.

### **4.3. Сжигание водорода в сравнении с другими видами топлива**

Как будет показано, существует две базовые модели сжигания водорода в соединении с кислородом в воздухе или в качестве чистого реагента: пламенное и каталитическое сжигание. Мы рассмотрим тот факт, что среди прочих видов топлива только водород хо-

рошо подходит для каталитического сжигания, а на этом методе базируется ряд интересных экспериментальных проектов. Тем не менее, в силу наибольшей популярности и распространенности метода пламенного сжигания, будет полезно ознакомиться в первую очередь с основами пламенного сжигания водорода.

Возможно, наиболее значимым качеством водородного пламени является его *прозрачность* и отсутствие цвета. В условиях дневного света пламя водорода полностью невидимо, его можно обнаружить только по образованию «тепловых полос» – следствие изменения плотности и индекса преломления в зависимости от температуры продуктов горения и нагретого воздуха. В ночное время, а также внутри помещений с плохим фоновым освещением водородное пламя обретает мягкое приглушенное сияние, которое в большинстве случаев можно отслеживать по микропримесям и другим газам в потоке водорода.

Невозможность обнаружения пламени водорода повышает риск непреднамеренного воспламенения, влекущего за собой телесные повреждения и порчу имущества. Для решения этой задачи часто предлагается включение *дополнительного источника света* в систему подачи водорода. Такое дополнение позволит придать цвет и светимость, что будет аналогично добавлению одорантов в природный газ. По сути, для того чтобы получить средство обнаружения утечек и визуализации пламени в водородных системах, необходимо подобрать правильное сочетание одоранта с дополнительным источником света. При выборе подобного дополнительного компонента нужно помнить, что каталитические устройства весьма чувствительны к отравлению и другим разрушительным эффектам вследствие особого состава компонента. Это может свести на нет преимущества каталитического сжигания.

Ввиду высокой скорости распространения (см. рис. 4), форма пламени водорода может резко отличаться от формы пламени других видов топлива с меньшей скоростью распространения. Например, в простой бунзеновской горелке, работающей стандартно на природном газе, использование водорода даст более короткое и интенсивное пламя при тех же параметрах воздушного отверстия. Кроме того, как уже отмечалось, могут возникнуть проблемы, связанные с обратным потоком. Это характерно для всех типов горелок с полным предварительным смешением газа с воздухом, в частности, для стандартного элемента верхнего предела или газовой горелки, изображенной на рис. 7. Этот тип горелок работает на природном газе, подаваемом в газовое сопло при низких давлениях, то есть порядка нескольких 5 ÷ 8 см.

По данным Института газовых технологий и компании Billings Energy Corporation (г. Прово, Юта), в традиционном газовом оборудовании, модифицированном для работы на водороде, необходимо перекрыть все отверстия первичного воздуха и обеспечить хорошее уплотнение во избежание попадания воздуха, чтобы пламя водорода не смогло проник-



нуть в смесительную камеру (центральный патрубок, выводящий вверх потоки от отверстий горелки). Но даже в этом случае сотрудниками института были обнаружены шумы при зажигании (включении) и отключении (гашении). Пламегаситель здесь, возможно, не подойдет из-за сопротивления потоку, создаваемого в системе реально низкого давления. В качестве решения этой проблемы группой ученых из Института газовых технологий (ИГТ) предложено уменьшить внутренний объем горелки, что в действительности означает модификацию ее конструкции для использования водорода.

Однако в горелках, работающих на предварительно подготовленной смеси (например, в бунзеновской горелке), длину пламени можно уменьшить, повысив давление подачи газа. По оценкам ИГТ, десятикратное увеличение способно привести пламя в исходную форму. Другим важным аспектом пламенного сжигания водорода является образование побочных продуктов и выбросов, влияющих на поддержание качества воздуха, что имеет принципиальное значение в бытовых неветилируемых приборах и устройствах с открытым пламенем. Водород в сво-

ем составе вообще не имеет углерода, поэтому он абсолютно свободен от оксида углерода и несгоревшего углеводородного пара, а единственными отходами, остающимися в устройстве на основе водорода в случае неполного сгорания или невоспламенения, будет несгоревший водород. Вероятность образования оксидов углерода и выбросов будет существовать до тех пор, пока не решены такие проблемы, как сгорание смазки в водородном двигателе внутреннего сгорания. В свете вышеизложенного можно отметить, что метод пламенного сжигания водорода может эффективно применяться в неветилируемых и бестопливных системах, которые будут выбрасывать, как правило, только водяной пар.

К сожалению, существует одна проблема – образование *оксида азота*. Это единственный «загрязняющий фактор», которому в устройствах на основе водорода придается особая важность. Более того, в процессе пламенного сжигания водорода при несколько более высоких температурах, чем, например, метана (аналог природного газа) уровень выброса оксидов азота ( $NO_x$ ) водородных устройств будет значительно выше.

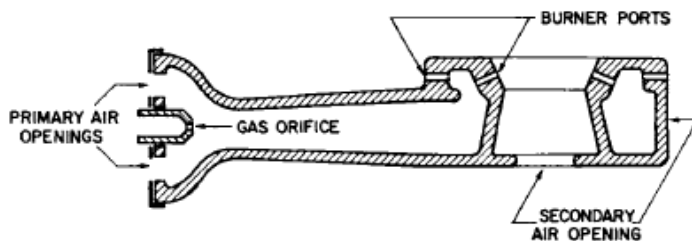


Рис. 7 – Вид стандартной атмосферной горелки в разрезе (предоставлено Институтом газовых технологий, США)  
 FIG. 7 – Sectional view of a typical atmospheric range-top burner. (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

По сути, высокая локальная температура, достигаемая пламенем, приводит к образованию из азота и кислорода, содержащихся в воздухе, оксида азота ( $NO$ ), который впоследствии может быть окислен до  $NO_2$  (обозначаются как « $NO_x$ »). Тенденция к образованию выбросов  $NO_x$  усиливается с повышением температуры. Сотрудникам лаборатории Американской ассоциации газовой промышленности удалось определить количество выбросов  $NO_x$ , которые осу-

ществляют устройства на основе природного газа, модифицированные для работы на водороде, и сравнить результаты с показателями традиционных газовых приборов. В табл. 1 представлены показатели по выбросам  $NO_x$ , где уровень природного газа оценен в  $80 \div 100$  частей на миллион (ppm), а данные по конверсии водорода открытым пламенем разбиты по двум типам исходного воздушного отверстия или воздушной заслонки (рис. 7).

Выбросы  $NO_x$  из водородной горелки<sup>1</sup>

Таблица 1

$NO_x$  Emissions from Hydrogen Burner

Table 1

Воздушная заслонка	$NO_x$ (ppm)	Повышение (%) по сравнению с природным газом <sup>2</sup>	
		Макс. значение	Мин. значение
Полностью открыта	257	221	157
Полностью закрыта	335	319	235

<sup>1</sup> Данные, предоставленные лабораторией Американской ассоциации газовой промышленности.  
<sup>2</sup> Оценивается на уровне  $80 \div 100$  ppm.

Таким образом, в случаях, требующих удержания выбросов оксидов азота на крайне низком уровне, могут возникнуть определенные проблемы с пламенным сжиганием водорода, по крайней мере, в устройствах, традиционно работающих на газе. По всей видимости, было бы неплохо разработать специальные

системы пламенного сжигания водорода, способные существенно сократить выбросы  $NO_x$ , однако в научной литературе пока нет сведений о проектах подобного рода. В остальном можно отметить, что пламенное сжигание водорода является экологически чистым процессом и эффективным способом преобразо-

вания химической энергии топлива в тепловую. Об этом позволяют судить скудные на сегодня экспериментальные данные, но впереди предстоит еще большая работа по созданию оптимального устройства на основе пламенного сжигания водорода.

#### 4.4. Каталитическое сжигание водорода

Представляется очевидным, что ряд обозначенных выше проблем, связанных с устройствами на основе пламенного сжигания водорода, можно избежать или смягчить с помощью принципов *каталитического сжигания*. Как отмечалось ранее, среди прочих видов топлива только водород подходит для этого способа. В настоящей главе рассматриваются процессы каталитического сжигания с указанием преимуществ и недостатков этого метода. Далее, для иллюстрации возможностей каталитического сжигания, будет представлен ряд проектов, находящихся в настоящее время на стадии разработки опытных образцов.

Правильный выбор катализатора (например, платины в очень небольшом количестве), а также его нанесение на подходящий носитель или подложку способствует тому, что водород можно зажигать и сжигать с контролируемой температурой, что отличается от метода пламенного сжигания. Эта методика (рис. 8) разработана сотрудниками Института газовых технологий. На рис. 8 показано, как с добавлением водорода в катализируемую зону самопроизвольное повышение активности катализатора приводит к реакции взаимодействия водорода и кислорода в воздухе (или чистого кислорода) с образованием водяного пара. Повышение температуры, вызывающее полную активацию при постоянной температуре (1-й этап), ведёт к увеличению шага скорости (2-й этап). После этого температура продолжает повышаться. Если процесс выйдет из-под контроля, то начнется обычное пламенное сжигание (приблизительно в точке самовозгорания смеси), которого не следует допускать, поскольку в большинстве случаев это перечеркивает все преимущества метода каталитического сжигания и может постоянно выводить из строя горелку, разрушая, например, катализируемую зону.

Институтом газовых технологий подготовлен список рекомендаций относительно конструкции и рабочих характеристик водородных каталитических устройств:

1. Горелки должны обладать свойством самозапуска, но без задействования методов пламенного сжигания. Разработка стендовых установок или систем электрического зажигания считается нецелесообразной (отказ от них является значительным достижением с точки зрения энергосбережения, а также стоимости и надежности оборудования).

2. Необходимо разработать конфигурацию катализатора, которая позволяет (преимущественно) полностью сжигать топливо и включает множество параметров, требующих рассмотрения, такие как внешний вид горелки, активность и загрузка катализатора.

3. Требуется система, которая способствовала бы не только подаче воздуха в горелку, но и распространению топливно-воздушной смеси к поверхности катализатора, а также рассеиванию продуктов горения (водяной пар) с поверхности катализатора.

4. Обратное зажигание недопустимо. Оно возникает при превышении температуры воспламенения газообразного топлива. Пламя возникает и распространяется обратно к соплу коллектора топливного газа.

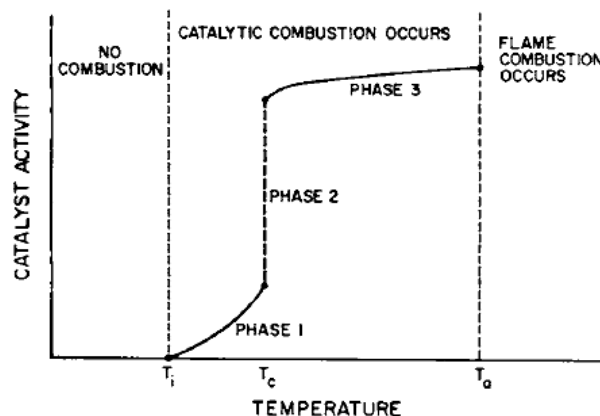


Рис. 8 – Этапы каталитического сжигания (предоставлено Институтом газовых технологий, США)

Fig. 8 – Phases of catalytic combustion.  
(Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

В одном из своих патентов на разработку «Каталитического нагревателя на основе жидкого топлива» научные сотрудники Института газовых технологий дали следующее определение катализируемой поверхности (Патент США № 3 955 556): «Разработанная методика включает в себя метод анодирования, который заключается в электролитическом окислении алюминия до  $Al_2O_3$  на поверхности металла. Затем на эту поверхность наносится платинохлористоводородная кислота, после чего платину можно восстановить мягким пламенем для получения высокоактивного самовоспламеняющегося катализатора» (подробное описание процесса приведено в патенте).

Можно выделить следующие преимущества метода каталитического сжигания по сравнению с пламенным сжиганием:

1. Процесс сжигания является самовоспламеняющимся, что обуславливает исключение отдельных систем зажигания, требующих затрат топлива, увеличения капитальных затрат и эксплуатационных расходов, а также снижающих надежность системы.

2. Температуру сжигания можно ограничить на уровне  $260 \div 316$  °С, предотвращая образование  $NO_x$  – единственный компонент выбросов, вызывающий озабоченность с точки зрения качества воздуха (см. раздел, посвященный пламенному сжиганию).

3. Можно добиться полного сгорания, используя по максимуму энергию топлива и устраняя любые угрозы, связанные с потоком свободного водорода.

4. Можно обеспечить точный всеохватывающий контроль над процессом выделения тепла, чтобы наилучшим образом отвечать требованиям энергопотребления системы.

5. Умеренная температура продуктов горения, которую можно контролировать с помощью каталитического сжигания, позволяет довольно просто обеспечивать в бытовых приборах, например, водонагревателях, конденсат водяного пара и регенерацию сопутствующего тепла.

Другая форма каталитического сжигания, продемонстрированная специалистами компании Billings Energy Corporation, предусматривает использование модифицированной системы пламенного сжигания. В 1974 г. компания опубликовала результаты экспериментов с опытными образцами горелок на основе водорода. Вокруг газоотводной секции стандартной горелки, работающей на природном газе, поместили нержавеющую сталь из тонколистового материала, внешне напоминающую «стальную стружку». После воспламенения водород горел в каталитическом режиме над нержавеющей сталью, нагревая ее до красного каления без заметного эффекта пламени. Тепло было перенесено в помещенную над горелкой термopосуду как с потоком горячего газа, так и с помощью инфракрасного излучения от раскаленной стальной стружки. Эту технологию можно легко и недорого применять в целях конвертации.

## 5. Водородные нагревательные устройства и приборы

### 5.1. Водородные водонагреватели. Введение

Существует два основных типа бытовых и небольших промышленных водонагревателей: накопительные и проточные (ненакопительные), – которые отличаются наличием водяного бака большой емкости для нагретой воды. Ненакопительные водонагреватели обеспечивают «мгновенный подогрев» холодной воды по требованию до заданной температуры. Хранение горячей воды в такой системе не предусмотрено. При этом у каждого типа есть свои характерные достоинства и недостатки, и оба являются работоспособными.

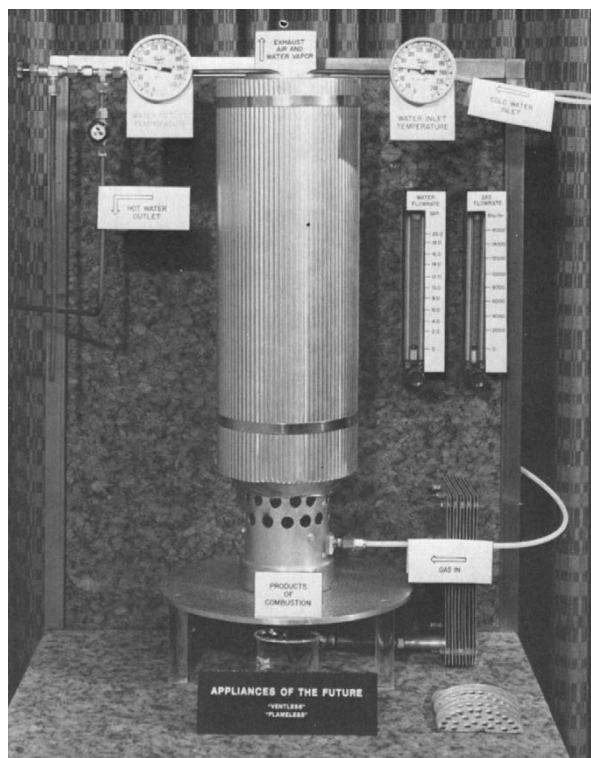
Водородные водонагреватели бывают обоих типов в силу схожести сжигания водорода с процессом сжигания природного газа и других видов используемого сегодня топлива. Более того, как обсуждалось в предыдущем разделе, в устройстве на основе водорода можно применять либо пламенное, либо каталитическое сжигание. Водородные водонагреватели на основе пламенного сжигания очень похожи на устройства, работающие на углеводороде (с различием в деталях конструкции горелки), поэтому здесь мы сосредоточимся исключительно на водонагревателях на основе каталитического сжигания. Напомним, что эти устройства обладают такими значительными преимуществами, как самовоспламенение (не требует стендо-

вых испытаний), ничтожно малый уровень выбросов  $\text{NO}_x$  и максимальная эффективность сжигания.

### Ненакопительные водонагреватели на основе каталитического сжигания водорода

Эта концепция, реализованная недавно в экспериментально-демонстрационном режиме в Институте газовых технологий, предусматривает мгновенный подогрев проточной холодной воды в системе сжигания/теплообмена до температуры, показанной на управляемом чувствительном элементе (датчике) на выходе горячей воды. На катализируемой поверхности возникает процесс горения водорода с воздухом, обеспечивая теплопередачу к водяному контуру для быстрого нагрева.

На рис. 9 представлена рабочая модель ненакопительного водонагревателя на основе каталитического сжигания водорода, разработанная Институтом газовых технологий.

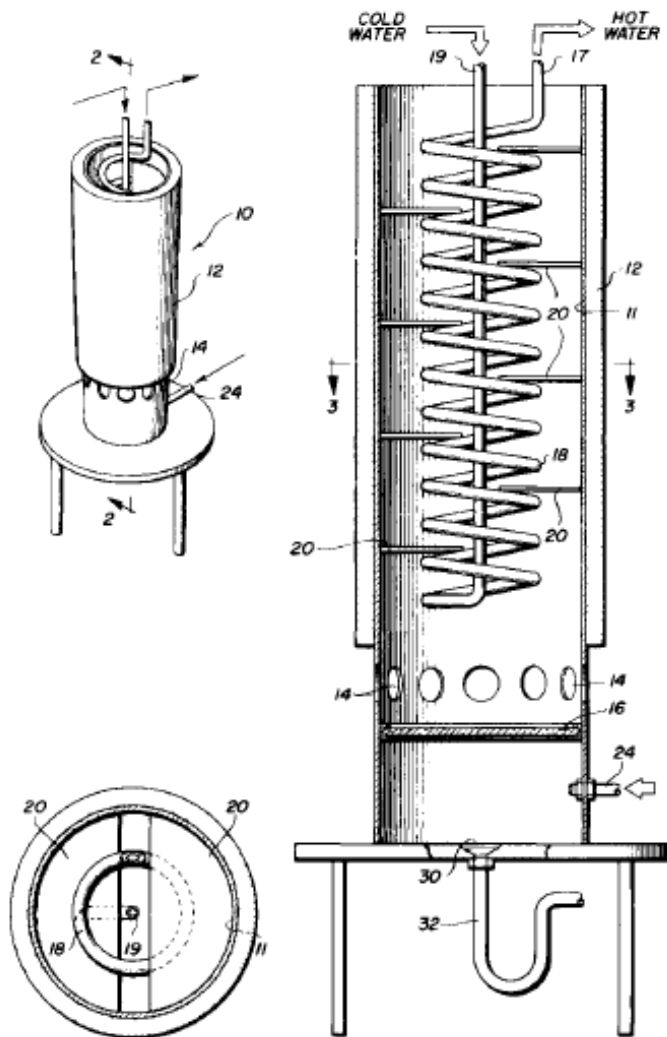


**Рис. 9.** – Экспериментальная рабочая модель ненакопительного водонагревателя на основе каталитического сжигания водорода (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)  
**Fig. 9** – Experimental working model of a catalytic combustion hydrogen-fueled nonstorage water heater (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

Установка была спроектирована и собрана в 1975 г. при финансовой поддержке Газовой компании Южной Калифорнии (англ. Southern California Gas Company) и запатентована в США (патент № 3 910 255).

Для описания работы этого устройства можно использовать патентный чертеж, представленный на рис. 10.

**Рис. 10.** – Вид ненакопительного водонагревателя на основе каталитического сжигания водорода в разрезе (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)  
**Fig. 10** – Sectional view of a catalytic combustion Hydrogen-fueled nonstorage water heater design (IGT/Southern California Gas Company).  
 (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)



Водород напускается в условиях регулируемого потока в нижней части хорошо изолированного цилиндрического корпуса 24, затем проходит сквозь пористую распределительную пластину 16 и поднимается вверх, смешиваясь с воздухом, попавшим через входные отверстия 14 под действием естественной тяги. Полукруглые металлические перегородки, катализируемые с нижней стороны, расположены в шахматном порядке вдоль цилиндрического корпуса, а в целях обеспечения теплоотдачи их монтируют в водный циркуляционный контур (змеевик). В разделительных перегородках проделаны отверстия для того, чтобы конденсат, образовавшийся из продуктов сгорания, попадал в нижнюю часть устройства.

Процесс каталитического сжигания происходит постепенно по мере подъема водородно-воздушной смеси в установке. Выделяемое тепло посредством конвекции и теплопроводности передается на змеевик. Нагретый поток воздуха поднимается вверх, создавая эффект естественной тяги и пропуская в

устройство больше воздуха для сжигания. Как отмечалось выше, на трубах холодной воды часть водяного пара в продуктах горения конденсируется в жидкость, которая в конечном счете собирается в нижней части устройства и отводится 32 с целью ее возможного использования в качестве дистиллированной воды, например в утюгах.

*Накопительные водонагреватели на основе каталитического сжигания водорода*

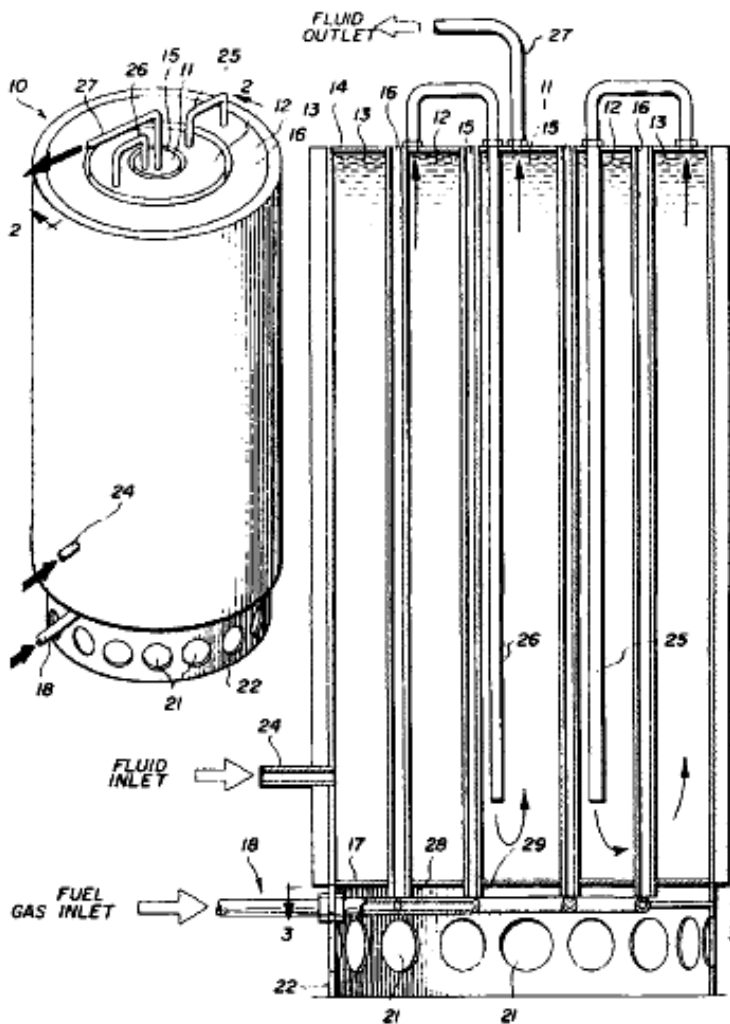
В рамках отмеченной программы, Институтом газовых технологий была также разработана и испытана рабочая модель накопительного водонагревателя на основе каталитического сжигания водорода. Патентные чертежи устройства представлены на рис. 11 (патент США № 3 995 556). Конструкция представляет ряд концентрических кольцеобразных отсеков для воды с направлением потока снаружи к центру, а именно, два кольцеобразных контейнера 12 и 13, установленных концентрично вокруг центрального цилиндрического корпуса 11. Холодная вода поступает

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

снаружи 24, а горячая извлекается из верхней мертвой точки хранилища 27. Между контейнерами с водой

образуются кольцеобразные пространства, в которых происходят процессы каталитического сжигания.



**Рис. 11.** – Вид накопительного водонагревателя на основе каталитического сжигания водорода в разрезе (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)  
**Fig. 11** – Sectional view of a catalytic combustion, hydrogen-fueled, storage water heater design (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

Водород напускается через расположенные соответствующим образом в нижней части пространства кольцевые коллекторы. Водород смешивается с воздухом, проникшим под действием естественной тяги через отверстия 21. Катализу подвергается только одна поверхность каждого кольцеобразного пространства, в котором происходит сжигание, в то время как другая выполняет функцию конденсирующей поверхности для водяного пара (который отдает свою теплоту испарения на нагрев воды). Как обсуждалось выше, катализируемая поверхность обеспечивает самовоспламенение, высокую эффективность и равномерное сжигание водорода. На рис. 11 не показано, что конденсат воды можно также собирать для дальнейшего использования, как в ненакопительных нагревателях. Оба устройства классифицируются как «невентилируемые» приборы и, как правило, не требуют вытяжки при условии организации циркуляции таким образом, чтобы в систему сжигания поступало достаточное количество свежего воздуха.

#### *Концепция накопительного водонагревателя на основе сжигания водородно-кислородной смеси*

С доступностью кислорода и водорода для работы нагревательных приборов появится возможность реализации и других концепций. Проиллюстрируем это на примере нагревателя накопительного типа, хотя на сегодня еще не все теоретические расчеты подтвердились экспериментально. Сжигание водородно-кислородной смеси бывает пламенным и каталитическим, аналогично водородно-воздушным системам, рассмотренным выше. Общеизвестным примером может служить кислородно-водородная горелка, применяемая в резке и сварке под водой. Такер (Tucker) еще в 1924 г. запатентовал кислородно-водородный парогенератор, в котором вода подается по направлению кислородно-водородного пламени, функционируя в стехиометрической точке (то есть при правильном химическом соотношении, предотвращающем образование избыточного водорода и кислорода).

Концепция накопительного водонагревателя должна включать в себя резервуар для горячей воды

с погружной водородно-кислородной горелкой в объеме воды. Такая горелка не требует воздуха для сжигания и, следовательно, вообще не образует никаких газообразных выбросов. Передача тепла к воде осуществляется напрямую, а не сквозь металлические поверхности. Вода для сжигания полностью перерабатывается в регулируемой системе. Таким образом, вся высокая теплотворная способность водорода преобразуется в нагрев воды с условием полного сжигания при установлении должного контроля за водородно-кислородной смесью.

Это устройство будет весьма компактным, обладать чрезвычайно высоким быстродействием и, как уже отмечалось, максимально возможной эффективностью. Устройства на основе сжигания водородно-кислородных смесей представляют особый интерес для солнечных энергоустановок.

### 5.2. Водородные каталитические обогреватели воздуха для отопления помещений

Каталитическое сжигание на поверхности, описанное в предыдущем разделе для водонагревателей, можно использовать для прямого обогрева воздуха, как в системах отопления помещений. Основной принцип представлен на чертеже образца для испытаний на каталитическую устойчивость (рис. 12). Это устройство разработано и подвергнуто тщательным испытаниям в Институте газовых технологий. Как показано на рис. 12, водород поступает сквозь отверстия из коллектора между двумя катализируемыми поверхностями, где  $H_2$  смешивается с воздухом и воспламеняется, а на поверхности происходит его каталитическое сжигание. Воздух нагревается непосредственно пламенем и, косвенным образом, посредством переноса тепла от противоположной стороны металлического образца.

Принцип, проиллюстрированный на рис. 12, был запатентован Институтом газовых технологий (патент США № 3 916 869) и применен к разным моделям обогревателей воздуха. На рис. 13 показано ци-

линдрическое устройство, представляющее собой двухповерхностную каталитическую камеру сгорания, похожую на образец, изображенный на рис. 12.

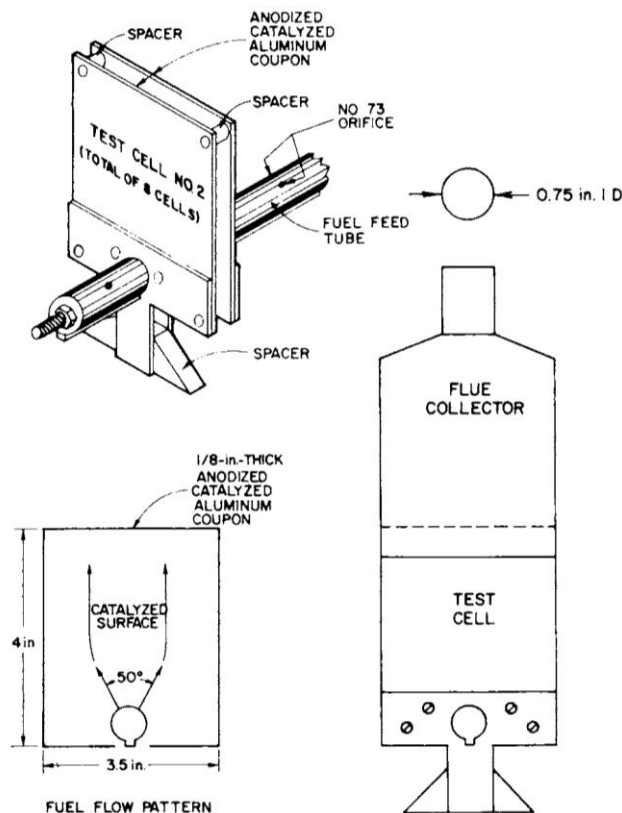


Рис. 12. – Чертеж экспериментального устройства для оценки каталитического сжигания (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)  
 Fig. 12 – Sketch of experimental catalytic combustion evaluation unit (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

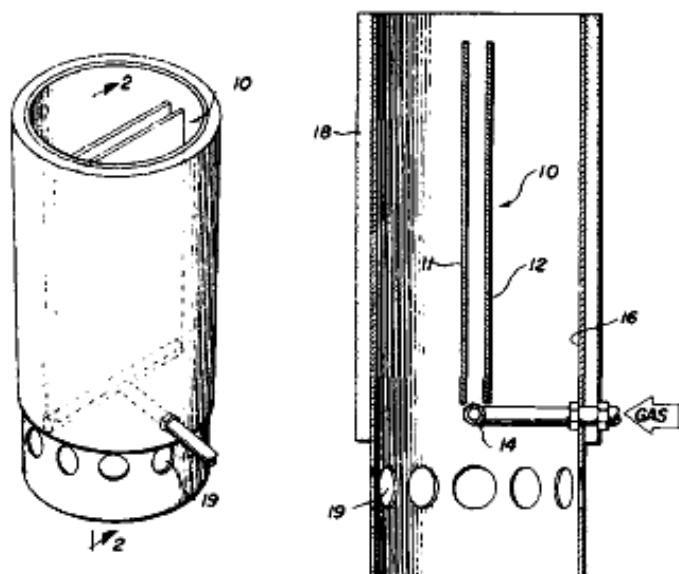
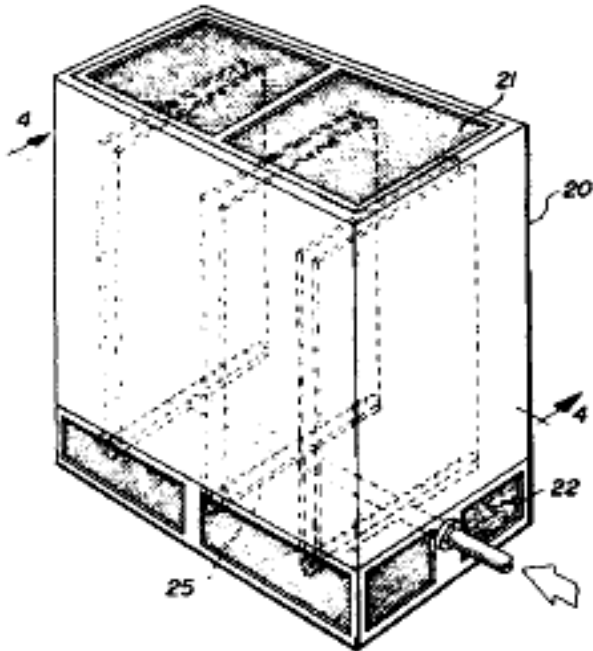


Рис. 13 – Вид в разрезе обогревателя воздуха на основе каталитического сжигания водорода, предусматривающего прямое бездымное отопление помещений (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)  
 Fig. 13 – Sectional view of a catalytic combustion, hydrogen-fueled, air heater design employing flueless direct space heating (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)



На рис. 14 представлена прямоугольная модель с несколькими такими поверхностями сжигания. В таком устройстве поток циркулирует непосредственно в пространство для нагрева без вытяжки или других наружных отводов.



**Рис. 14** – Вид в разрезе обогревателя воздуха на основе каталитического сжигания водорода, предусматривающего прямое бездымное отопление помещений (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)

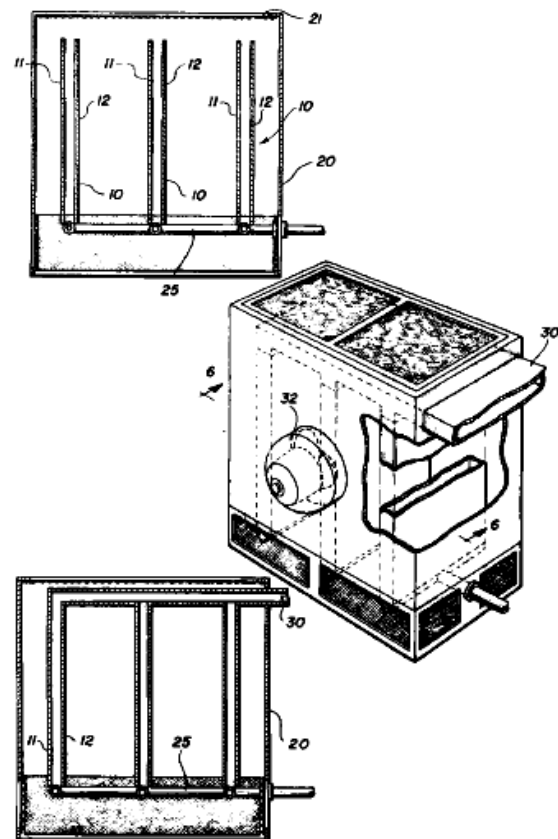
**Fig. 14** – Sectional view of a catalytic combustion, hydrogen-fueled, air heater design employing flueless direct space heating (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

В конструкции, изображенной на рис. 15, поток из камер сгорания уносится через вытяжку 30, а в качестве альтернативы чистой конвекционной циркуляции показано использование воздухоподводящего устройства. Такая конструкция полностью совместима с современными системами центрального отопления с принудительной циркуляцией воздуха для жилых помещений. С другой стороны, обогреватели воздуха на основе каталитического сжигания водорода подойдут, очевидно, для систем индивидуального (покомнатного) отопления, поскольку эти модели могут быть неветилируемыми.

### 5.3. Водородная плита верхнего диапазона на основе каталитического сжигания

Как уже отмечалось, компании Billings Energy Corporation удалось преобразовать углеводородный

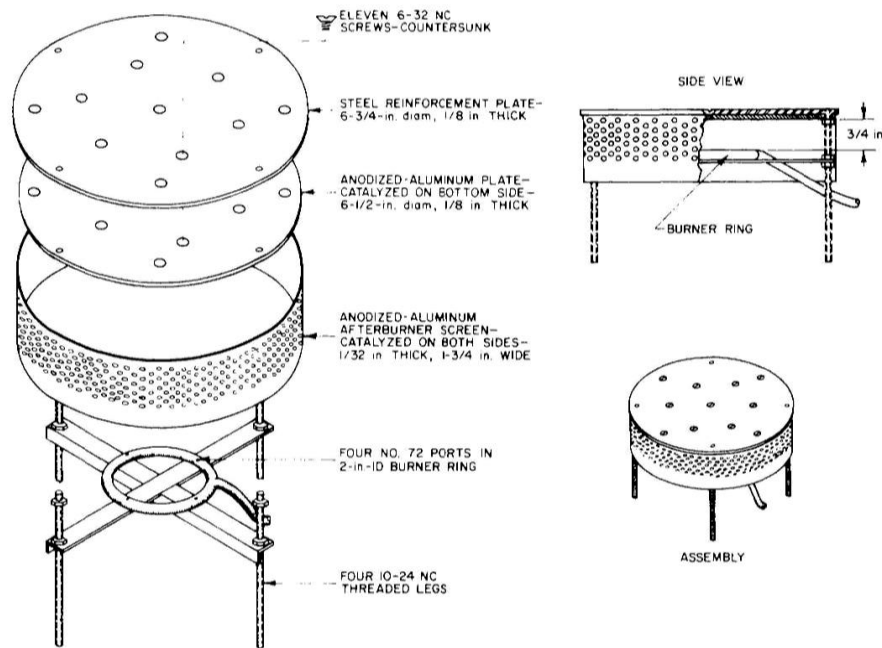
газ в работу водорода, поместив вокруг стандартной горелки сетку из нержавеющей стали, что обеспечило приемлемое качество каталитического сжигания и работы обогревателя. Институтом газовых технологий разработано несколько моделей устройств на основе каталитического сжигания, в которых используются те же принципы, что и в водонагревателях, рассмотренных выше.



**Рис. 15** – Вид в разрезе водородного обогревателя воздуха на основе каталитического сжигания с вытяжкой и принудительной подачей воздуха (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)

**Fig. 15** – Sectional view of a catalytic combustion, hydrogen-fueled, air heater design employing a flue and providing direct space heating with forced air (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

На рис. 16 представлена одна из моделей таких установок. В конструкции устройства используется катализируемая алюминиевая поверхность, присоединенная напрямую к пластине из армированной стали. Стальная поверхность поддерживает нагретое состояние. Авторами испробовано множество вариантов расположения отверстий и циркуляции потока, прежде чем было достигнуто требуемое воспламенение и функционирование.



**Рис. 16** – Изображение экспериментальной водородной плиты на основе каталитического сжигания (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)  
**Fig. 16** – Several views of a catalytic combustion, hydrogen-fueled, experimental range-top cooking unit (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

Другое устройство, разработанное Институтом газовых технологий, было продемонстрировано Американской ассоциации газовой промышленности в 1970-х гг. на выставке «Дом будущего». В этом устройстве обеспечены требуемое распределение водорода и контроль, а катализатор размещен непосредственно с обратной стороны керамической панели. Новинка была представлена вместе с другими водородными устройствами, такими как настенный обогреватель, поддон с подогревом и домашняя система экологического контроля.

## 6. Водородное кондиционирование и охлаждение воздуха

### 6.1. Введение

В течение длительного времени газовая энергия широко используется на рынке домашних и коммерческих систем кондиционирования. В дополнение к системам «охлаждения» абсорбционного типа, работающим на топливе и/или использующим рекуперацию тепла для кондиционирования, появился ряд новых системных подходов к применению газовой энергии, обеспечивающих «полный контроль над окружающей средой». В целом эти концепции ориентированы на природный газ, широко применяемый в настоящее время в бытовых и коммерческих системах. Как представляется, водород, полученный путем преобразования солнечной энергии, может вполне заменить его и дать ряд уникальных преимуществ. Далее

рассмотрим проекты, находящиеся сегодня на стадии разработки и их типичное применение.

### 6.2. Система контроля над окружающей средой фирмы Munters

Система, использующая газовую энергию для кондиционирования (охлаждения) воздуха, отопления и контроля над влажностью (англ. MEC), разработана компанией Munters, Швеция, и известна многим под названием «Лицензия». Эта система была запатентована в США и ряде других стран. Обладателем патента с правом на дальнейшее техническое и коммерческое развитие является дочерняя структура Института газовых технологий компания Gas Development Corporation (GDC).

Подробное описание системы MEC выходит за рамки настоящей главы, подробные сведения можно найти на официальных сайтах компании GDC и Института газовых технологий.

На рис. 17 представлено графическое и эскизное изображение этой системы. Принцип работы устройства основан на параллельных встречных потоках воздуха – поступающего снаружи и отработанного воздуха из жилого помещения, – а два вращающихся колеса из пористого материала обеспечивают регулирование влажности и теплообмена между ними.

В режиме охлаждения отработанный воздух в системе MEC нагревается с помощью теплообменного колеса с дальнейшим нагревом сушильного колеса из секции газовой горелки. При использовании природного газа обычным способом можно поставить водородную горелку пламенного или каталитического типа. Описание таких горелок представлено выше.



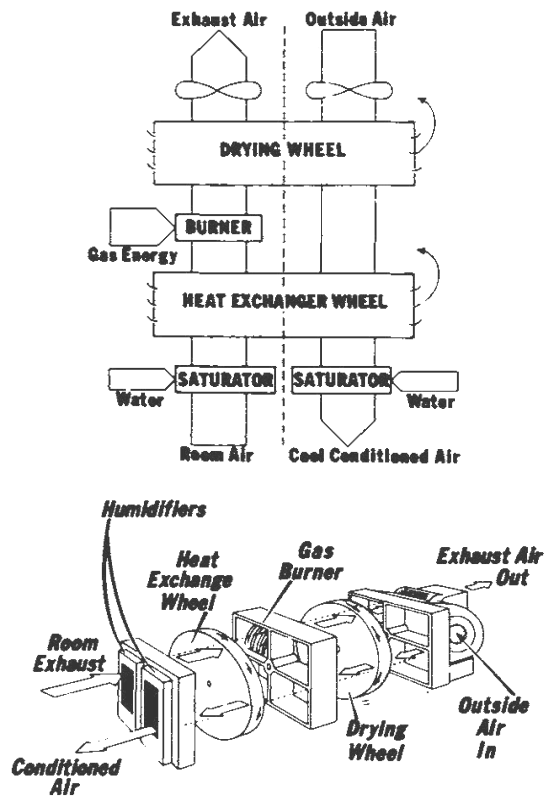


Рис. 17 – Принципиальная схема и расположение элементов системы контроля окружающей среды MEC (предоставлено Институтом газовых технологий)  
 Fig. 17 – Flow schematic and component layout of Munters Environmental Control (MEC) system. (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

### 6.3. Система охлаждения Servel

Системы охлаждения, работающие на природном газе, широко применяются на протяжении долгого времени. Системы Servel оснащены устройством нагрева хладоносителя газовым пламенем и работают без движущихся частей, что обеспечивает повышенный срок эксплуатации и простоту в обслуживании. Снова можно представить водородный контур охлаждения, работающий аналогичным образом.

### 6.4. Механическое охлаждение в сравнении с тепловыми двигателями на основе водородной энергии

Водород, будучи превосходным топливом для двигателей внутреннего сгорания, двигателей Ренкина, Стирлинга, а также для газотурбинных установок (работающих в цикле Брайтона), служит средством для передачи мощности на валу к механическим системам кондиционирования стандартного типа. Подобным образом могут работать теплонасосные установки, обеспечивающие нагревание и охлаждение. В силу сложной конструкции тепловых двигателей, эта технология больше подойдет для крупных промышленных проектов, в частности, для комплексных энергосистем, где относительно низкая эффективность теплового двигателя компенсируется рекуперацией отработанного тепла.

## 7. Выработка электричества с помощью водородной энергии

### 7.1. Общие сведения

Множество исследований показало, что в случае необходимости хранения энергии в системе электрического устройства можно использовать водород или водородно-кислородную смесь, которые являются эффективным и гибким средством хранения химической энергии для ее последующего преобразования (повторного преобразования) в электричество. Подобным образом можно хранить водородную энергию в солнечных энергоустановках, требуемых для круглосуточного удовлетворения потребностей в электричестве. Как предполагается, максимальную выработку и своевременную поставку электроэнергии для соответствующих солнечных энергосистем можно обеспечить в периоды инсоляции. Такие способы хранения и преобразования энергии потребуются для решения проблемы энергетических пиков и, что более важно, выработки электроэнергии в периоды отсутствия инсоляции. В качестве альтернативы могут применяться нехимические средства хранения, например, маховиковые накопители энергии. Для сравнения базового подхода можно привести стандартный электрический (электрохимический) аккумулятор.

Ниже будут рассмотрены два основных способа получения электроэнергии из водорода: топливный элемент и тепловой двигатель/генератор. Следует отметить, что можно использовать как водородно-воздушную, так и водородно-кислородную смесь, отдавая предпочтение последней в силу большего количества уникальных преимуществ, хотя этот метод изучен меньше всего. На основании общих сведений сложно судить, сможет ли водород в действительности заменить собой остальные альтернативные варианты, поскольку для этого требуется проведение определенных исследований, но, с технической точки зрения, это выполнимо.

### 7.2. Топливные элементы

Топливные элементы осуществляют прямое преобразование химической энергии в электрическую с помощью электрохимического преобразования. По этой причине на них не действуют «ограничения цикла Карно» тепловых двигателей, и, следовательно, они обладают достаточно высокой эффективностью. В идеальных условиях КПД устройства может достигать порядка 90 %. Несмотря на то что теоретически тепловые элементы могут работать на разных видах топлива, безусловно, водород является первым кандидатом на применение, поскольку он легко и непосредственно вступает в электрохимическую реакцию с кислородом, содержащемся в воздухе, или с подаваемым чистым кислородом. Примечательно, что топливные элементы, разработанные для эксплуатации на природном газе и легком углеводородном топливе (например, керосин и другие средние дистилляты), фактически используют водород, полученный из этих углеводородов. В так называемый топливный элемент TARGET на природ-

ном газе перед топливной ячейкой включен этап парового риформинга метана для получения реформированного газа, преимущественно водорода с незначительными примесями углекислого газа.

В системах, где водород поступает с самого начала, можно избавиться от процедуры «подготовки» топлива, а также добиться повышения общей эффективности и снижения расходов на оборудование и обслуживание. Таким образом, водород является наиболее подходящим топливом для топливных элементов.

Как правило, топливные элементы, использующие воздух для поддержания процесса «сжигания» водорода, базируются на системах с кислым электролитом, таким как фосфорная кислота. Несмотря на то что щелочные топливные элементы значительно проще и эффективнее, они, при прочих равных условиях, страдают от следующего недостатка: вступающий в реакцию атмосферный углекислый газ способствует снижению производительности устройства.

Таким образом, необходимо использовать бесщелочные топливные элементы на основе водородно-воздушной смеси. В случаях когда наряду с водородом возможно применение чистого кислорода, можно использовать щелочной электролит, что приведет к повышению эффективности и снижению расходов. Это также является важным вопросом получения водорода с помощью процессов разложения воды, как в случае с электролизом воды. Учитывая, что кислород гораздо легче хранить и обрабатывать, чем водород, топливные элементы на основе водородно-кислородных смесей выглядят предпочтительней водородно-воздушных систем. Тем не менее за последнее время второй вариант был значительно доработан.

Топливные элементы на основе водородно-кислородных смесей разрабатываются для применения в авиации и оборонном комплексе. Например, эти элементы обеспечивали электроэнергией космические корабли Аполлон, использовавшиеся в американских программах полетов на Луну. Несмотря на то что топливные элементы, предназначенные для этих целей, являются достаточно дорогими и имеют ограниченный срок эксплуатации, по всей вероятности, фундаментальная технология может быть применена к окончательной доработке коммерческих топливных элементов, в частности, для новейших систем преобразования солнечной энергии. Плановые издержки и прогнозируемые показатели эффективности разработанного топливного элемента на основе водородно-кислородной смеси составляют соответственно \$200/кВт электроэнергии и 70 % высшей теплотворной способности (ВТС).

### 7.3. Тепловые двигатели/генераторы

Другим вариантом получения электроэнергии из водорода является применение теплового двигателя для выработки мощности на валу, чтобы привести в действие стандартный генератор. В принципе водород, в силу его гибкости, можно использовать во

всех тепловых двигателях как внутреннего, так и внешнего сгорания. Тип двигателя определяется выбором оптимального соотношения между эффективностью и себестоимостью с учетом габаритов, рабочего цикла и других системных требований к узлу системы, генерирующему электроэнергию.

На рынке представлено множество моделей водородных двигателей внутреннего сгорания преимущественно с упором на использование в качестве основной тяги автомобиля. Предрасположенность к чрезвычайно бедному горению, при котором достигаются высокие значения эффективности, а также другие факторы, связанные с процессом сжигания, позволяют водородным двигателям внутреннего сгорания добиться более высоких показателей, чем при работе на углеводородном топливе. Аналогично водородные газотурбинные установки, разработанные специальным образом для максимального использования свойств водорода (например, его превосходящие охлаждающие свойства применительно к охлаждению лопастей турбины), могут продемонстрировать более высокие показатели эффективности и иметь более компактные размеры, чем в случае применения традиционных видов топлива, за счет повышения температур на выходе из турбины.

В рамках космической программы устройства на основе водородно-кислородной смеси, передающие мощность на валу, получили ограниченную разработку в качестве дополнительных источников питания. Проект представляет особый интерес в связи с потенциально высокой эффективностью, простотой и компактностью паровой турбины/турбинной установки на водородно-кислородной смеси, преимущественно паровой турбины, работающей по циклу Ренкина, где образование пара происходит в плотной топочной камере, и требования к условиям этого процесса не отличаются от стандартных условий парообразования в традиционных бойлерах. Кроме того, можно достичь значительно более высоких температур, чем в традиционных устройствах, что ведет к повышению эффективности до 55 % в крупных конденсационных вакуумных системах, которые также являются экологически чистыми и гибкими в эксплуатации.

#### Благодарности

Авторы выражают признательность Институту газовых технологий (Чикаго, США) за поддержку и предоставление материалов, использовавшихся при подготовке статьи. Особую благодарность авторы выражают доктору Джону Б. Пэнгборну, Вальтеру Дж. Язиновски и Дейлу Г. Джонсону за их ценные советы и рекомендации.

Фотографии предоставлены Институтом газовых технологий и Брукхейвенской национальной лабораторией.

#### Acknowledgments

The authors are pleased to acknowledge the support of the Institute of Gas Technology, Chicago, for information supplied in support of the preparation of this chapter. Particularly helpful were the advisements and contributions of Dr. Jon B. Pangborn, Walter J. Jasionowski, and Dale G. Johnson.

Photographs were supplied by the Institute of Gas Technology and Brookhaven National Laboratory.

