

Системы хранения водорода

О.К. Алексеева,

начальник отдела Института водородной энергетики и плазменных технологий ФГУ РНЦ «Курчатовский институт», к.ф.-м.н.,

С.И. Козлов, зам. генерального директора ООО «Газпром ВНИИГАЗ», д.т.н.,

Р.О. Самсонов, генеральный директор ООО «Газпром ВНИИГАЗ», д.т.н.,

В.Н. Фатеев, директор Института водородной энергетики и плазменных технологий ФГУ РНЦ «Курчатовский институт», профессор, д.х.н.

В XXI в. водород становится одним из главных мировых источников альтернативного топлива. Существует несколько вариантов его эффективного использования на транспорте: для автомобилей на топливных элементах и для применения в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) в качестве основного топлива и в качестве добавки к традиционным углеводородным топливам. Для реализации программы использования водорода в качестве альтернативного топлива необходимо решить важную проблему организации эффективного хранения водорода как на борту транспортного средства, так и в стационарных хранилищах.

Хранить водород можно в газообразном виде под давлением, в жидком состоянии, в связанном виде в твердых или жидких носителях и в форме химических соединений, которые при разложении выделяют водород (аммиак, жидкие углеводороды).

Для транспорта наиболее важными являются следующие технологии:

- хранение сжатого газообразного водорода в резервуарах высокого давления;
- хранение жидкого водорода;
- хранение водорода в виде гидридов;
- хранение водорода в носителях.

Следует отметить, что хранение водорода отличается от хранения других видов моторных топлив, например, бензина, тем, что системы хранения должны работать в неблагоприятных условиях: при криогенных температурах, при высоком давлении или при использовании материала, активного на воздухе или в присутствии воды. Следовательно, необходимо обеспечивать надежность и безопасность системы хранения водорода.

Важнейшей характеристикой, определяющей эффективность хранения, является плотность как массовая (весовая по другой терминологии), так и объемная. Системы хранения водорода «на борту» имеют свои специфические требования. Для оценки используются следующие ориентировочные значения, принятые в разных странах:

6,5-10% масс. (отношение массы водорода к массе системы) и 62 кг H_2/m^3 для обеспечения пробега автомобиля 480 км при размерах хранилища, близких к размерам бензобака легкового автомобиля.

Схема возможностей разных технологий хранения водорода, цели министерства энергетики США для транспорта на 2010 и 2015 гг. и оценки стоимости хранения приведены на рис. 1 [1, 2].

Отличительная особенность этой схемы заключается в том, что на ней, в отличие от других аналогичных, приведены результаты анализа параметров более 60 автомобилей на топливных элементах. На большинстве автомобилей были использованы баллоны с водородом под давлением 35 МПа (350 атм), на меньшем числе автомобилей – под давлением 70 МПа (700 атм) или с сжиженным водородом. Эти параметры таковы: от 3,5 до 4,7 % масс. и от 14 до 28 кг/ m^3 при пробеге от 165 до 300 км [1], что свидетельствует о том, что они не отвечают необходимым требованиям.



Рис. 1. Характеристики и оценки стоимости различных систем хранения водорода

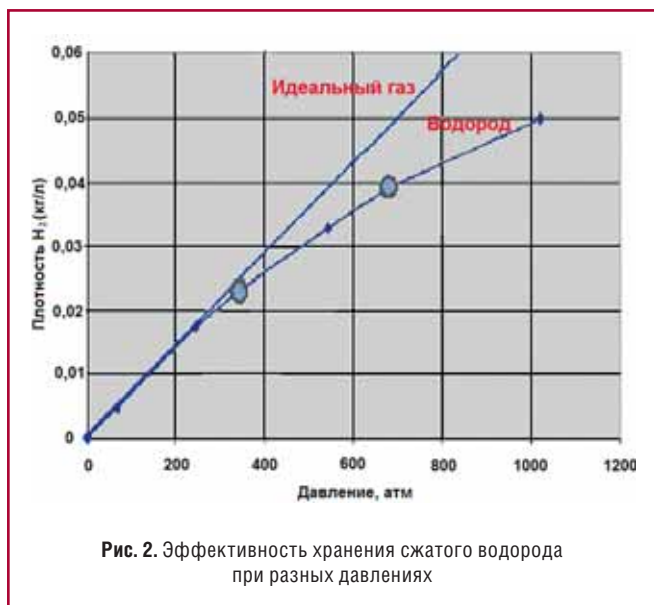
ХРАНЕНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ВОДОРОДА

Хранение газообразного водорода под давлением.

Это достаточно простой и недорогой способ, технология хорошо отработана, энергозатраты на выдачу газа отсутствуют, однако, при этом требуется использовать высокопрочные баллоны большого объема. При атмосферном давлении и комнатной температуре 1 кг водорода в свободном состоянии занимает объем 11,2 m^3 , поэтому для хранения он должен быть сжат. Чем больше давление газа, тем меньше требуется объем V . В соответствии с уравнением состояния идеального газа

$$PV = nRT,$$

где n – количество водорода в молях, T – температура, а R – газовая постоянная.



Эффективность хранения газообразного водорода в резервуарах под давлением проиллюстрирована на рис. 2 как для идеального газа, так и для реальных условий.

Для описания реального газа было предложено несколько моделей. В соответствии с моделью Ван-дер-Ваальса

$$(P + n^2 \frac{a}{V^2})(\frac{V}{n} - b) = RT,$$

где a и b – постоянные, учитывающие притяжение и отталкивание молекул.

Другой подход вводит коэффициенты сжимаемости Z , определяемые экспериментально и имеющиеся в таблицах и справочниках, например, [3], тогда уравнение приобретает следующий вид

$$PV = nZRT.$$

Работа на сжатие 1 моля водорода от давления p_0 до давления p_1 при изотермическом сжатии равна

$$W_{\Delta T=0} = p_0 V_0 \ln(p_1/p_0),$$

где W – работа сжатия 1 моля водорода, p_0 – начальное давление, p_1 – конечное давление, V_0 – начальный удельный объем.

Для Ван-дер-Ваальсовского газа

$$W_{\Delta T=0(BB)} = RT \ln \frac{V_2 - b}{V_1 - b} + \frac{a}{V_2} - \frac{a}{V_1};$$

для модели с учетом фактора сжимаемости Z

$$W_{\Delta T=0(Z)} = ZRT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Уравнение изоэнтропного (адиабатного), то есть обратимого и без теплообмена между компрессором и окружающей средой, сжатия наиболее близко описывает термодинамический процесс для идеальных газов [4, 5]

$$W = \frac{k}{k-1} p_0 V_0 \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right],$$

где k – показатель адиабаты; c_p/c_v – отношение удельных теплоемкостей, равное 1,41 для водорода и других двухатомных газов.

Для реальных газов необратимость адиабатического процесса учитывается с помощью соотношения

$$W_{\text{реал}} = W/\eta_{\text{ад}},$$

где $\eta_{\text{ад}}$ – адиабатный КПД процесса ($\eta_{\text{ад}} = 75-85\%$).

Значения энергии, требуемой для сжатия, приведены ниже в табл. 1 [2].

Таблица 1

Вход – выход, кг/см²	Адиабатный КПД, %	Требуемая энергия для сжатия, кВт·ч/кг
20-70	70-80	0,6-0,7
7-500	50-70	2,6-3,6

Работа сжатия зависит от природы газа. На рис. 3 [5] показана энергия, требуемая для адиабатного сжатия водорода, гелия и метана. Из представленной на рис. 3 зависимости видно, что для сжатия водорода требуется гораздо больше энергии, чем для метана.

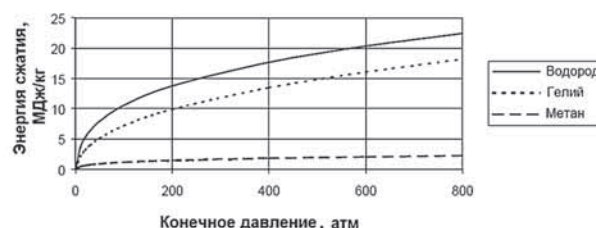


Рис. 3. Зависимость адиабатного сжатия для водорода, гелия и метана от атмосферного давления до конечного давления (1 Дж = 2,78 · 10⁻⁷ кВт·ч) [5]

Независимо от используемой модели, работа сжатия – нелинейная функция давления (рис. 4). Следовательно, работа, требуемая на сжатие водорода на одно и то же давление $\Delta p = p_1 - p_0$, зависит от начального давления. Так, гораздо меньше энергии требуется, чтобы увеличить давление водорода от 350 до 700 кгс/см², чем от 1 до 350 кгс/см². В связи с этим перспективным способом является использование электролизеров воды, рассчитанных на производство водорода (и кислорода) под

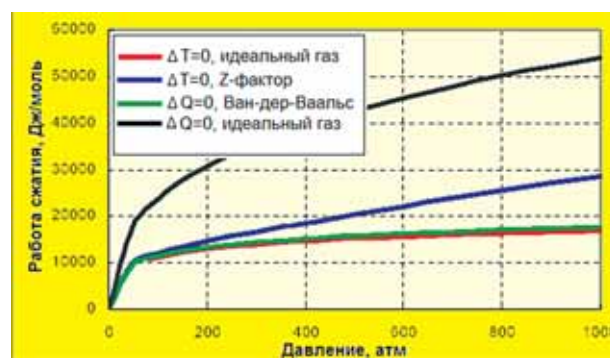


Рис. 4. Работа адиабатного и изотермического сжатия водорода [4]

давлением. В частности, использование электролизера, работающего под давлением 30 кгс/см² и более, позволяет исключить первую и наиболее энергоемкую ступень сжатия водорода (необходимо отметить, что для набора давления газов в электролизере дополнительные энергозатраты не требуются). В настоящее время разрабатываются электролизеры с твердым полимерным электролитом (ТПЭ), позволяющие производить водород под давлением 200-350 кгс/см² и выше.

Работа сжатия в реальных условиях

$$W_{политр} = [n/(n-1)] RT_1 [(p_1/p_0)^{(n-1)/n} - 1],$$

где n – показатель политропы, $W_{политр}$ – работа сжатия 1 моля водорода.

При этом, как и в случае изоэнтропного сжатия, должна быть учтена эффективность процесса η_p

$$n = \frac{\eta_p k}{1 + \eta_p k - k} \quad \text{и} \quad \frac{n}{n-1} = \frac{k}{k-1} \eta_p.$$

На практике технология хранения водорода под давлением в резервуарах используется уже много лет, она аналогична технологии хранения природного газа. Как правило, при хранении водорода используются баллоны цилиндрического типа или контейнеры в виде труб большого объема. При использовании обычных стальных баллонов, заполненных водородом с давлением до 20 МПа, 4 кг водорода занимают объем 225 л. Массовая плотность по разным данным при давлении ~35 МПа составляет 6,7-8,7% масс. Использование специальных баллонов позволит увеличить массовую плотность. В России созданы системы газобаллонного хранения водорода под давлением до 40 МПа, в том числе криволинейные титановые баллоны.

Для хранения водорода на борту транспортных средств наиболее перспективными являются композитные баллоны, которые имеют цилиндрическую форму и состоят из внутреннего лайнера с обмоткой из углеродного волокна. Для предотвращения взаимодействия водорода с композитным материалом требуется инертное внутреннее покрытие. Лейнер может быть сделан из алюминиевого сплава или полимера высокой плотности. Он является непроницаемым барьером для газа и в то же время служит основой для намотки волокна, которое пропитывается эпоксидной смолой, формируется также внешний защитный слой.

Существуют три основных типа металлокомпозитных баллонов [6]:

- металлокомпозитные – баллоны с металлической внутренней оболочкой (лейнером) и кольцевой намоткой различными высокопрочными волокнами, которые скреплены эпоксидными связующими; по международной классификации тип баллона 2;

- металлокомпозитные – баллоны с металлическим лейнером, кольцевой и спиральной обмоткой по всей поверхности лейнера (обмотка типа «кокон»); по международной классификации тип баллона 3;

- композитные – баллоны со структурой предыдущего типа намотки волокон, но имеющие неметаллические

лейнеры (резина, полимеры и т.п.) с закладными металлическими элементами со штуцерами; по международной классификации тип баллона 4.

Следует отметить, что такая конструкция может использоваться также для автомобильного транспорта, служить основой для контейнеров общего назначения, применяться для систем хранения – сжатого и жидкого водорода, хранения в носителях, в том числе и криогенного хранения в адсорбентах.

Однако даже для баллонов из новых композитных материалов плотность хранимой энергии при 20 МПа составляет 0,5-2 кВт·ч/кг, что существенно меньше значения для жидкого водорода, равного ~6 кВт·ч/кг. Из композитных материалов, упрочненных углеродными волокнами, разработаны баллоны, выдерживающие до 70 МПа, продолжается работа по оптимизации материалов и снижению стоимости [2]. Даже при таком высоком давлении энергетическая плотность низка по сравнению с бензином (4,4 МДж/л для баллона с водородом при 70 МПа, что составляет только 14% от 31,6 МДж/л для бензина) [2].

В настоящее время водородные баллоны на 35 и 70 МПа сертифицированы в соответствии со стандартами ISO 11439 (Европа), NGV-2 (США), Reijikijun Betten (Исландия) и одобрены TUV (Германия) и КНК (Япония). Баллоны были использованы на нескольких опытных образцах автомобилей на топливных элементах и имеются в продаже. В соответствии с требованиями European Integrated Hydrogen Project (EIH) для композитных баллонов на 70 МПа был продемонстрирован фактор безопасности 2,35 (давление разрыва ~ 165 МПа) [2].

Композитный баллон, выпускаемый фирмой «Quantum Technologies, Inc.», показан на рис. 5 [2].

Главный недостаток этого метода заключается в его небезопасности. К системе клапанов предъявляются жесткие требования (должны быть исключены утечка водорода и возможность образования взрывоопасной гремучей смеси). При использовании баллонов высокого давления требуется дополнительный контроль.

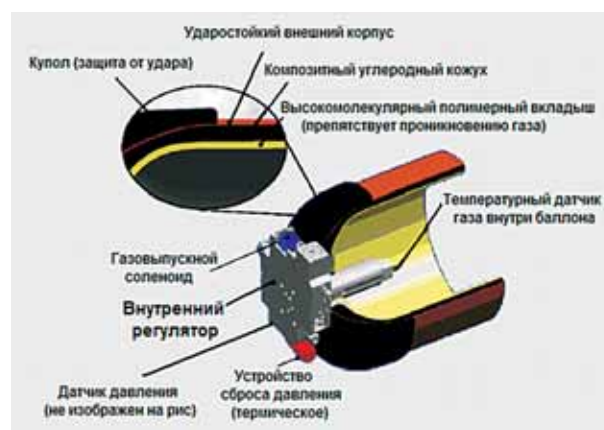


Рис. 5. Композитный баллон с намоткой из углеродного волокна, выпускаемый фирмой «Quantum Technologies, Inc.»

Для стационарных условий наиболее широко используются цилиндрические баллоны и контейнеры – трубы. Так, в [2] приведены примеры баллонов объемом 54 л на 0,61 кг водорода (давление ~ 16 МПа при 21°C), которые хранятся вертикально и могут использоваться по отдельности или в связках.

Основной вклад в капитальные и эксплуатационные затраты при использовании систем хранения газообразного водорода вносят компрессоры. Требования на компримирование зависят от технологии производства водорода и требований его хранения и доставки.

ХРАНЕНИЕ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

Достоинствами этого метода хранения являются большие величины емкости по массе и объему (плотность жидкого водорода 70,8 кг/м³). Жидкий водород, производство которого растет в мире ежегодно на 5%, является важным элементом инфраструктуры снабжения потребителей. Например, в США производственные мощности позволяют в год получать до 120 тыс. т жидкого водорода, из которых 15% расходуется на ракетно-космическую технику, остальное – в химической промышленности (37%), металлургии (21%), электронике (16%), стекольной промышленности (4%). Однако имеются жесткие требования к материалам по хладостойкости. Требуется постоянное охлаждение (20 K), эффективная изоляция. Чтобы не допустить местных перегревов, сосуды, заполняемые жидким водородом, следует предварительно охладить, что приводит к большим расходам водорода на захлаживание емкости. Существует проблема потерь на испарение. Кроме того, это небезопасный способ. Испаряющийся водород должен или каталитически дожигаться воздухом в специальном объеме или собираться в металлическом гидриде.

Ожижение водорода. Процесс ожижения водорода – энергоемкий. На ожижение расходуется от 25 до 45% энергии сжиженного водорода. Затраты электроэнергии составляют 10-14 кВт·ч на 1 кг H₂ и выше [3, 7].

Для сжижения могут использоваться различные холодильные циклы. Простейший цикл – цикл Линде, или цикл изотермального расширения Джоуля – Томпсона, основан на эффекте дросселирования. Цикл Линде работает для таких газов, как азот, которые охлаждаются при расширении при комнатной температуре. Однако водород при обычной температуре, в отличие от других газов, имеет отрицательный дроссель-эффект, то есть нагревается при расширении. Для получения положительного дроссель-эффекта сжатый водород предварительно охлаждается, как правило, до температуры ниже 80 K с помощью жидкого азота [7]. Кроме того, большие затраты на ожижение связаны с тем, что водород при комнатной температуре (~ 25°C) является смесью двух модификаций: 75% ортоводорода и 25% параводорода. При температуре ожижения (20,4 K) равновесное содержание параформы составляет 99,82%. Процесс перехода ортоформы в параформу (орто-

пара-конверсия) протекает спонтанно и сопровождается выделением теплоты в количествах, в 1,15 раза превышающих теплоту испарения водорода. Теплота ортопара-конверсии равна 0,146 кВт·ч/кг, теплота ожижения 0,123 кВт·ч/кг [2]. Для процесса ожижения водорода теплота конверсии является балластной, поскольку она отводится непосредственно в поток водорода, и в результате производительность ожижителя существенно снижается. В жидкой фазе без катализатора ортопара-конверсия происходит со скоростью 1% в час, и после ожижения нормального водорода за счет выделения теплоты при конверсии за 1 сутки испаряется 18% сжиженного водорода, за неделю – 50%. Поэтому на промышленных установках ожижения водорода имеются конверторы, предназначенные для ортопара-конверсии водорода в присутствии катализатора; при этом водород, идущий на конверсию, должен быть тщательно очищен во избежание отравления катализаторов. Кроме того, наличие примесей может нарушить работу ожижителя. Все это повышает стоимость получения жидкого водорода и, следовательно, этого способа хранения.

Другие циклы основаны на изотропном расширении водорода с производством внешней работы в расширительной машине – детандере.

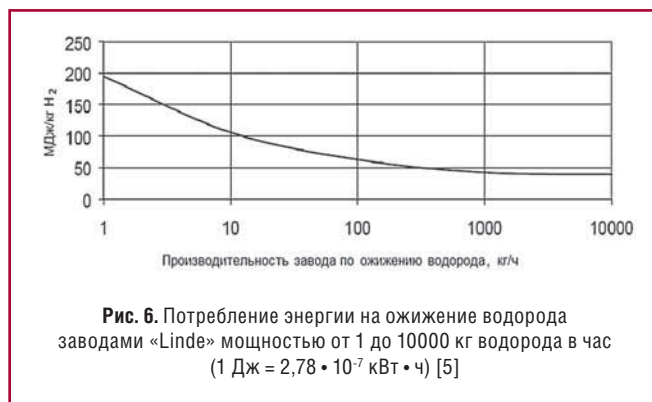
Для оценки эффективности реальных циклов ожижения рассмотрим идеальный процесс, потребляющий минимальное количество энергии. Этот процесс представляет собой изотермное сжатие, за которым следует обратимое изотропное расширение для охлаждения газа и превращения его в жидкость. Работа этого идеального ожижения $W = T_o (S_n - S_k) - (H_n - H_k)$, где индексы *n* и *k* – начальное и конечное состояние системы, *T_o* – температура окружающей среды, *H* – энтальпия, *S* – энтропия, равна для водорода по разным расчетам 3,228-3,332 кВт·ч/кг [4, 8]. Идеальная работа включает энергию, необходимую для снижения температуры газа до точки кипения, энергию фазового превращения газ–жидкость и энергию ортопара-конверсии при охлаждении. Для сравнения, идеальная работа ожижения азота примерно в 15 раз меньше (всего 0,207 кВт·ч/кг [8]). Идеальная работа ожижения зависит от начального давления и температуры, а также исходной концентрации параводорода.

Однако на практике такой цикл неосуществим. В реальных условиях общие затраты энергии на ожижение могут превышать эту величину в 5-10 раз и зависят от принятого цикла ожижения [3]. Например, для цикла Линде с предварительным охлаждением с помощью жидкого азота расчетные энергозатраты около 20 кВт·ч/кг водорода [8]. Энергопотребление для процесса ожижения PRAXAIR от 12,5 до 15 кВт·ч/кг водорода [2].

Эффективность процесса (%) по [9] определяется как

$$\eta = \frac{W_{\min}}{W_{\text{comp}} + W_{N_2} - W_{ET}} \times 100,$$

где *W_{min}* (кВт) – минимальная работа; *W_{comp}* (кВт) – мощность, требуемая компрессорам; *W_{N₂}* (кВт) – мощность,



требуемая для обеспечения азотом; W_{ET} (кВт) – возвращаемая от турбин мощность.

Эффективность различных промышленных процессов составляет 46-47%.

По данным работы [5], учитывающим реальные условия работы заводов «Linde», энергозатраты на охлаждение 1 кг водорода для завода мощностью 100 кг жидкого водорода в час составляют 60 МДж (~17 кВт·ч/кг). При увеличении мощности завода потребление энергии снижается, но не достигает минимума, примерно равного 40 МДж (~11 кВт·ч/кг), рис. 6 [5].

Концепция комбинированного изоэнтальпного и изоэнтальпийного цикла охлаждения, предложенная в [10], снизит вклад менее эффективного (8-12 кВт·ч/кг) изоэнтальпийного расширения и позволит приблизиться к идеальной работе охлаждения.

Общее количество теплоты Q_k , выделяющейся при конверсии, может оказаться значительным. Поскольку жидкий водород использовался в качестве ракетного топлива, в 60-х гг. прошлого века были разработаны и построены промышленные установки по получению жидкого параводорода.

На космодроме Байконур хранилища жидкого водорода ракетно-космического комплекса «Энергия» представляют собой четыре резервуара емкостью 1400 м³ жидкого водорода каждый [11].

При производстве таких больших количеств жидкого параводорода суммарное значение выделяющейся теплоты конверсии составляет значительную величину. Так, для объема 5000 м³ суммарная теплота конверсии составляет $Q_k = \rho q_k \cdot 5000 = 70,8 \cdot 5,25 \cdot 10^5 \cdot 5000 = 1,8585 \cdot 10^{11}$ Дж, где $\rho = 70,8 \text{ кг/м}^3$ – плотность жидкого водорода, ($5,25 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг} = 0,146 \text{ кВт·ч/кг}$) – теплота конверсии.

Для уменьшения потерь жидкого водорода на испарение в процессе конверсии предлагается усовершенствованная технология производства жидкого параводорода [11]. Сущность этой технологии заключается в том, что энергия, высвобождаемая в процессе конверсии, преобразуется в работу и передается за пределы потока охлаждаемого водорода. Для реализации способа организуется прямой термодинамический цикл, в котором приемником теплоты является криогенная жидкость в емкости хранения, а источником теплоты – конвертор. Рабочим телом

в термодинамическом цикле может выступать гелий или водород.

В СССР ОАО «Криогенмаш», ОАО «Гелиймаш», ОАО «Уралкриомаш», институтами РАН, ГИАП и другими была создана инфраструктура снабжения страны жидким водородом, прежде всего для ракетно-космических программ [12]. Были разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию установки охлаждения производительностью 180 кг/ч параводорода (НИИхиммаш в г. Сергиев-Посад, ПО «Электрохимпром» в г. Чирчик). Созданные охлаждающие установки были построены по дроссельному холодильному циклу высокого давления (15 МПа) с тремя ступенями предварительного охлаждения (жидкие аммиак, азот и азот, кипящий под вакуумом). В качестве сырья использовался электролизный водород. Модернизация этих установок путем включения в схему турбодетандеров и аппаратов ортопара-конверсии на температурных уровнях от жидкого азота до жидкого водорода позволила увеличить их производительность до 500 кг/ч и уменьшить удельные энергозатраты с 40 до 26 кВт·ч/кг жидкого водорода.

В ОАО «Криогенмаш» разработаны проекты установок ОВ-04 и ОВ-06 производительностью 400 и 700 кг/ч с удельными затратами 22,4 и 21,7 кВт·ч/кг продукта соответственно, которые, к сожалению, остались нереализованными. В мировой практике удельный расход энергии составляет для охладителей водорода 13-16 кВт·ч/кг. Подобные показатели обеспечиваются обычно в установках с применением азотного охлаждения, двух детандерных ступеней и четырех ступеней ортопара-конверсии. Исследования, выполненные в ОАО «Криогенмаш», показали, что аналогичные показатели по энергозатратам могут быть получены также при использовании гелиевого холодильного цикла [12].

Некоторые исследователи предлагают использовать криогенное хранение водорода под высоким давлением для увеличения емкости и в то же время снижения затрат на охлаждение. Хранение сжатого водорода при температуре 80 К не требует этапа ортопара-конверсии при охлаждении

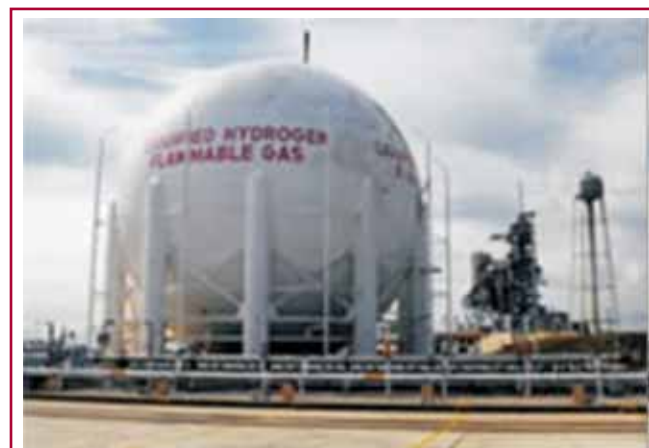


Рис. 7. Резервуар для хранения жидкого водорода объемом 3800 м³



Рис. 8. Стационарный резервуар РЦГВ-250/0,25 транспортируется к месту его установки

нии. Конечно, требуются энергия для охлаждения газа и изоляция контейнера. Такие новые криогенные контейнеры высокого давления (20-40 МПа) могут быть заполнены сжатым или жидким водородом [2].

Резервуары для хранения жидкого водорода. К резервуарам для хранения жидкого водорода предъявляются следующие основные требования:

- конструкция резервуара должна обеспечивать длительную безопасную эксплуатацию;
- расход жидкого водорода на предварительное охлаждение хранилища должен быть минимальным;
- резервуар должен быть снабжен устройствами для быстрого заполнения и выдачи хранимого продукта.

Резервуары обычно выполняют сферическими или цилиндрическими. Хранилища большего объема делают сферическими для уменьшения потерь на испарение. Емкости находятся в диапазоне от 5,7 до 95 тыс. л (или 400-6650 кг) водорода по данным [2]. Большие резервуары были разработаны в США в рамках космической программы. NASA использует и хранит жидкий водород более 30 лет. На мысе Каннавэрал имеется сферический резервуар диаметром 20 м, объем хранения 3800 м³, испарение 0,03% в день (рис. 7) [13].

В бывшем СССР также были созданы системы хранения и транспортировки жидкого водорода для ракетно-космической техники [12]. Среди важнейших сооружений необходимо отметить водородные комплексы для наземной отработки ЖРД ракет-носителей, «Криогенный центр» на Байконуре, обеспечивающий весь цикл работ с системой «Энергия – Буран», и др. Криогенные заправочные системы «Центра» построены на базе шаровых резервуаров вместимостью 1400 м³ с высокоэффективной экранно-вакуумной изоляцией и суточными потерями 0,033-0,130% (резервуар по этому показателю относится к лучшим в мире).

Определяющим этапом создания оборудования систем хранения явилась разработка конструкций резервуаров объемом от 5 до 1400 м³, трубопроводов и арматуры диаметром до 400 мм с экранно-вакуумной изоляцией, в которых нашли применение новые изоляционные материалы и новые технологии изолирования поверхностей.

В перспективе отечественное криогенное машиностроение способно создавать шаровые резервуары с высокоэффективной экранно-вакуумной изоляцией объемом до V=4200 м³. Разработано новое оборудование – унифицированный ряд криогенных резервуаров вместимостью 8, 25, 63, 75 м³ вертикального типа (РЦВ), вместимостью 50, 100, 230, 250 м³ горизонтального типа (РЦГ). Важно, что принципы построения комплексов заправки потребителей жидким водородом и криогенного оборудования практически одинаковы и для космической, и для народнохозяйственных отраслей.

Технические характеристики последних разработок оборудования для хранения жидкого водорода ОАО «Криогенмаш» представлены в табл. 2. На рис. 8 показан наиболее крупный, изготовленный предприятием, стационарный резервуар РЦГВ-250/0,25 в процессе его доставки наземным транспортом к месту установки [14]. Резервуар предназначен для сбора жидкого водорода после его ожижения, постоянного хранения и периодической выдачи. Испаряющийся в резервуаре за счет теплопритоков из окружающей среды водород направляется на повторное ожижение.

Таблица 2

Технические характеристики криогенных резервуаров для хранения жидкого водорода ОАО «Криогенмаш»

Основные характеристики	Резервуар РЦГВ 60/1,1	Резервуар РЦГВ 250/0,25
Вместимость, м ³	60	248
Рабочее давление, МПа	1,1	0,25
Масса хранимого водорода, кг	3850	16680
Потери водорода от испарения, кг/ч (% в сутки)	0,95 (0,6)	1,39 (0,2)
Масса изделия, кг	35000	86300
Габаритные размеры, мм		
длина	14600	36642
ширина	3900	3806
высота	3610	3971

Технологические схемы жидководородных резервуаров являются более сложными и многоэлементными по сравнению со схемами других типов криогенных резервуаров. Они обеспечивают заправку жидким водородом и его выдачу, безопасную эксплуатацию резервуара, замещение в нем газовой среды и другие функции. Система предохранительных клапанов и разрывных мембран позволяет безопасно эксплуатировать резервуар в соответствии с требованиями отечественных и европейских норм. Используются высококачественные стали, предназначенные для требуемых температурных диапазонов. Резервуары оснащены фильтрами тонкой очистки жидкого водорода и пробоботборником специальной конструкции, имеют высокоэффективную теплоизоляционную систему.

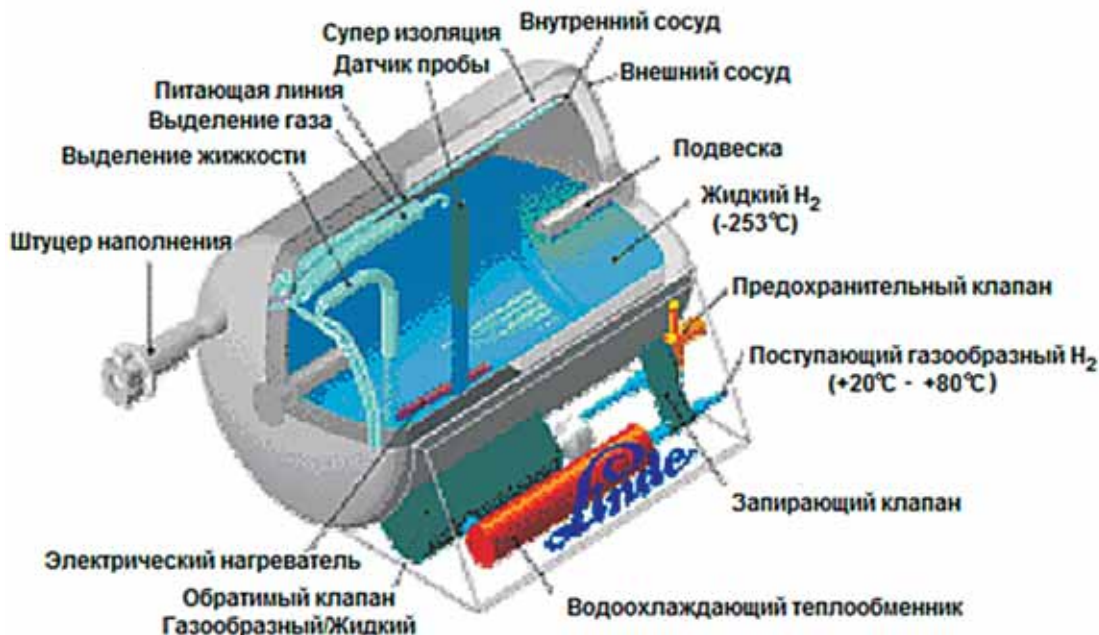


Рис. 9. Система хранения жидкого водорода

Оценки потерь водорода от испарения в стоимостном выражении сделаны в работе [14] на примере резервуара РЦГВ-250/0,25. При испарении водорода на уровне 0,2% в сутки и максимальном коэффициенте заполнения резервуара 0,95 потери составляют 1,39 кг/ч водорода. Если принять среднюю стоимость 1 кг газообразного водорода 1 евро, а 1 кг жидкого водорода – 4 евро, то годовые потери при сбросе испарившегося водорода в атмосферу для резервуара РЦГВ-250/0,25 достигнут 35 тыс. евро для одного резервуара. При повторном ожижении испарившегося водорода годовые потери можно снизить до 23 тыс. евро. Эти оценки объясняют, почему такое большое внимание уделяется потерям водорода от испарения.

Пример системы хранения жидкого водорода представлен на рис. 9 [2].

Конструкция отличается от конструкции композитного баллона для хранения газообразного водорода под давлением. Процесс производства таких контейнеров тоже другой. Внутренний контейнер содержит жидкий водород, важную часть конструкции составляют теплоизолирующие барьеры, которые должны быть очень эффективными.

Рассматривая перспективы внедрения альтернативных моторных топлив в России, авторы работы [15] сделали вывод, что предпочтительной является криогенная система хранения водорода на борту транспортного средства. Поэтому необходимо создать соответствующую инфраструктуру и поэтапно переводить автотранспорт на жидкий водород: на первом этапе (2007-2050 гг.) – на сжиженный природный газ (СПГ), а на втором этапе (2040-2060 гг.) – на жидкий водород.

Литература

1. **Satyapal S.** Hydrogen storage sub-program overview. – Annual Progress Report DOE Hydrogen Program. – 2007. – P. 331-339.
2. www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells.
3. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справочн. изд. под ред. **Гамбург Д.Ю., Дубровина Н.Ф.** – М.: Химия, 1989. – С. 672.
4. **Tzimas E., Filiou C., Peteves S.D., Veyret J.-B.** Hydrogen storage: state-of-the-art and future perspective. – Luxembourg. 2003. – P. 91. <http://www.jrc.ec.eu.int/>.
5. **Eliasson B., Bossel U.** The future of the hydrogen economy: Bright or bleak? http://www.woodgas.com/hydrogen_economy.pdf.
6. **Осадчий Я.Г., Крылов Е.Н., Русинович Ю.И., Кононов П.В.** Прочностная отработка металлокомпозитных баллонов высокого давления. – «Транспорт на альтернативном топливе», № 3 (3) 2008. – С. 30-32.
7. **Joseph T.** Hydrogen Fuel Air Products and Chemicals, Inc. Allentown, PA NGV TF Washington D.C. August 4, 2005.
8. **Amos W. A.** 1998. NREL/TP-570-25106 Costs of Storing and Transporting Hydrogen. – 1998.
9. **Matsuda H. and Nagami M.** Study of large hydrogen liquefaction process. <http://www.ena.or.jp/WE-NET/ronbun/1997/e5/sanso1997.html>.
10. **Shimko M.A.** Innovative Hydrogen Liquefaction Cycle. – Annual Progress Report DOE Hydrogen Program. – 2007. – P. 294-297.
11. **Полупан А.В.** Ресурсосберегающая технология при производстве параводорода. – Int. Sci.J. for Alternative Energy and Ecology ISJAEE. – 2002, № 2. HTML формат ISJAEE # 2,2002.
12. **Домашенко А.М., Горбатский Ю.В.** Состояние, проблемы и перспективы развития в России инфраструктуры жидкого водорода. – Материалы международного форума «Водородные технологии для производства энергии». – Москва, 6-10 февраля 2006 г. – С. 29.
13. Florida Solar Energy Center (FSEC) www.fsec.ucf.edu/.../basics/storage-liquid.htm.
14. **Кузьменко И.Ф., Румянцев Ю.Н., Сайдадь Г.И.** Современные тенденции в конструировании и изготовлении резервуаров для хранения и транспортирования жидкого водорода. – «Технические газы». – 2008, № 1. – С. 53-58.
15. **Кириллов Н. Г.** Когда наступит «водородная экономика»? – НефтьГаз-Промышленность. – 2008, № 1 (37).

Окончание в следующем номере



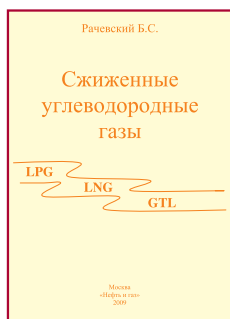
**История газового дела:
историко-технический очерк.
Научное издание.
Самсонов Р.О., Джафаров К.И.
2009. С. 200**

Газовая промышленность России, являющаяся «локомотивом» экономики страны, имеет большую историю, начавшуюся еще в середине XIX в. (1859 г.) на фотонафтильном (керосиновом) заводе В.А. Кокорева (с. Сураханы, г. Баку).

Газовая промышленность стала собственно промышленностью после того, как появилась возможность транспортировать газ на многие сотни километров, газ перестал быть топливом местного значения, а газовая промышленность выделилась в самостоятельную отрасль.

В книге авторов Р.О. Самсонова и К.И. Джафарова «История газового дела: историко-технический очерк» воссоздана целостная картина зарождения и становления газовой промышленности в дореволюционной России и СССР (1811-1956 гг.). Большинство приведенных сведений основано на материалах из Российского государственного архива экономики, Российского государственного архива социально-политической истории, Государственного архива Российской Федерации и других архивов. Главы книги посвящены началу газового дела в России, становлению газовой промышленности в СССР в 1920-1940 гг., проблемам транспортировки газа в 1941-1950 гг., особенностям управления газовой промышленностью. В очерке восстановлены имена некоторых инженеров и техников, а также организаторов газовой промышленности, внесших значительный вклад в становление газового дела: Ф.А. Рустамбеков, М.Х. Шахназаров, Ф.Ф. Нестеров, Г.Г. Петров, А.И. Израилович, И.Н. Стрижов и другие.

Материалы данной книги представляют интерес для специалистов и научных работников газонефтяной отрасли, студентов и аспирантов высших учебных заведений, а также для всех читателей, интересующихся историей развития газовой промышленности.



**Учебное пособие.
Рачевский Б.С.
Издательство «Нефть и газ».
2009. С. 640**

В книге показано мировое развитие газовой промышленности и, в частности, ее подотрасли, к которой относится производство сжиженных углеводородных газов – сжиженных нефтяных газов (СНГ) и сжиженного природного газа (СПГ), а также целесообразность производства и потребления синтетического жидкого топлива (СЖТ).

Рассмотрены физико-химические свойства жидких и газообразных углеводородов. Даны основы технологии крупнотоннажного и малотоннажного производства сжиженных углеводородных газов, а также синтетического жидкого топлива. Приведены все способы транспортировки и хранения СНГ (LPG) и СПГ (LNG), включая методы расчета систем хранения, перемещения и распределения.

Учебное пособие содержит современный анализ и пути повышения эффективности использования сжиженных углеводородных газов в качестве сырья для химической промышленности, моторного топлива и для автономного газоснабжения населенных пунктов и промышленных объектов.

Особое внимание в книге уделяется рассмотрению вопросов обеспечения промышленной безопасности объектов производства, транспортировки, хранения, распределения и использования сжиженных углеводородных газов.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, строительством и эксплуатацией систем сжиженных нефтяных газов и сжиженного природного газа, а также синтетического жидкого топлива. Издание может служить учебным пособием при изучении дисциплин газовой отрасли и будет также интересно руководителям и владельцам компаний, занимающихся бизнесом в этой области.

Весь приведенный в учебном пособии материал проиллюстрирован большим количеством формул, примеров, таблиц и рисунков.

Книга написана на основе многолетнего опыта автора, приобретенного за годы работы в газовой отрасли, и проведения им 11 Международных научно-практических конференций «Сжатый и сжиженный газ» в различных странах мира.

Стоимость книги – 2500 руб.

Порядок оплаты и получения книги:

1. Передать в адрес ЗАО «НефтегазТоп» по факсу или электронной почте заявку с указанием организации, количества экземпляров, контактного лица, адреса, телефонов и банковских реквизитов.
2. Получить от ЗАО «НефтегазТоп» счет и оплатить его.
3. Книга будет доставлена в ваш адрес по почте (в Москве и Московской области нарочным).

Контактные телефоны/факсы:

+7 (499) 782-34-27, (499) 782-33-62, (499) 782-31-95 • сайт: www.neftegaztop.ru • e-mail: info@neftegaztop.ru