

© В. И. ГУРОВ

Центральный институт авиационного машиностроения, г. Москва  
gurov@ciam.ru

УДК 62-622

## ПРОДВИЖЕНИЕ ВОДОРОДА В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ HYDROGEN ADVANCE INTO INDUSTRY

*Представлен краткий отечественный и зарубежный опыт по хранению и использованию водорода в различных энергосистемах. Поставлены задачи по разработке водородных технологий с привлечением специалистов в области криогенной техники. Предложен проект Центра водородных инновационных разработок для инициирования широкого продвижения водорода в промышленность.*

*This article gives a brief summary on domestic and foreign experience in keeping and using hydrogen in various power systems. It aims at hydrogen technologies development with the help of cryogenic technology specialists. The "Centre of hydrogenic innovative elaboration to widely use hydrogen in industry" project is suggested.*

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Водород, энергетика, проблемы, пути решения.  
KEY WORDS. Hydrogen, energy, problems, solution.*

Жизнедеятельность человека неизбежно сопряжена с загрязнением окружающей среды. Чем выше комфортность жизни и гуще население городов, тем сильнее страдает природа и сами люди от производимого ими мусора. Нобелевский лауреат Нильс Бор предсказывал: «Человечество погибнет не от атомной бомбы, бесконечных войн: оно похоронит себя под горами собственных отходов». Под отходами можно разумеать не только бытовые и промышленные отходы, но и в более широком смысле ухудшение экологических показателей среды обитания и от мусорных полигонов, и от работающих энергогенерирующих источников. Заметному улучшению экологических показателей окружающей среды способствует широкое применение водорода в качестве топлива в различных энергосистемах.

Водород является универсальным энергоносителем будущего. Самый распространенный элемент во Вселенной, он при стехиометрическом сжигании в кислороде образует только воду. Прямое стехиометрическое сжигание водорода в кислороде является достаточно совершенным по экологии процессом, т. к. не сопровождается выбросами никаких вредных веществ. Вместе с тем, очевидно, что образующаяся при этом вода в разных фазовых состояниях не должна выбрасываться в атмосферу, ибо, повышая ее влажность и температуру, она со

временем может стать весьма неблагоприятным фактором для среды обитания людей. Достаточно напомнить, что, например, для получения 70 МВт электроэнергии по самым передовым технологиям необходимо каждую секунду сжигать 1 кг водорода, что приведет к образованию 9 кг воды каждую секунду работы энергогенерирующего источника. Цифра немалая — более 32 т/ч! Однако указанный фактор в настоящее время можно считать вторичным по отношению, например, к оксидам азота или окислам углерода — непременным спутникам процесса сжигания углеводородных топлив.

Первые попытки создания экологически чистых кислородно-водородных паровых котлов предприняты в нашей стране почти 85 лет назад [1]. В 1991 г. в КБХА (г. Воронеж) под эгидой ЦИАМ испытан демонстратор с подводным стехиометрическим сжиганием водорода в кислороде в соответствии с техническим решением по патенту [2]. Созданию ряда опытных образцов современных кислородно-водородных парогенераторов посвящены совместные работы ОАО КБХА и Объединенного института высоких температур РАН [3].

В качестве перспективного технического решения разработана [4] энергосистема, представленная на рис. 1, по совершенствованию известных разработок.

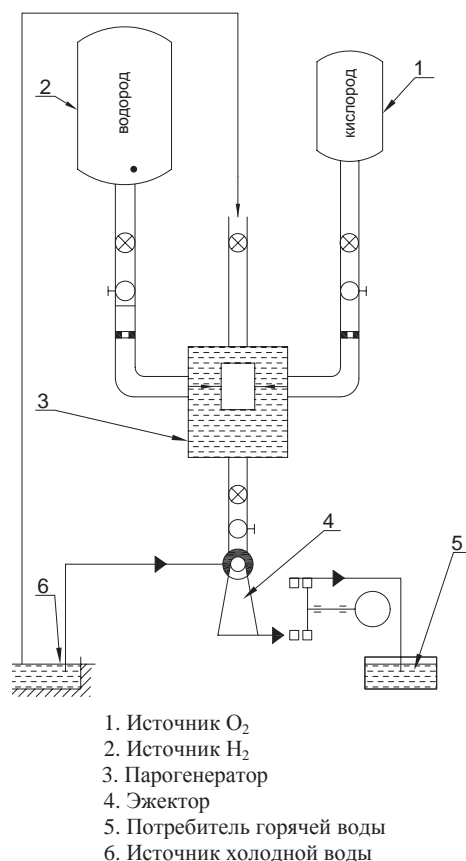


Рис. 1. Экологическая чистая энергосистема

Основное назначение представленной энергосистемы заключается в экологически чистом нагреве воды. Ее технические показатели таковы: при стехиометрическом сжигании в кислороде  $3,5 \cdot 10^{-3}$  кг водорода в секунду в потребитель 5 при пополнении емкости 3 водой с расходом 1 кг/с поступает 1,5 кг воды (за счет работы эжектора 4, связанного пассивной частью с источником 6) с температурой в диапазоне 330-340 К. При этом возможно получение электроэнергии до 0,1 кВт для нужд электронных устройств, причем температура воды в емкости 3 достигает значения 395 К при давлении 0,2 МПа. Испытания модельного демонстратора по схеме рис. 1 объемом в 100 л проводятся в испытательном комплексе ОАО КБХА.

Представленные на основании краткого патентного обзора различные технические решения по сжиганию кислородно-водородных смесей в наземных энергосистемах иллюстрируют достаточно высокий интеллектуальный потенциал отечественных исследователей. Однако отсутствие промышленной реализации полученных по личной инициативе изобретателей результатов объясняется практическим отсутствием государственной и инвестиционной финансовой поддержки. Насколько может быть эффективна такая поддержка, свидетельствует опыт создания фирмой «Toyota» первого в мире серийного автомобиля с водородным двигателем. До конца 2015 г. планируется выпустить 2100 седанов «Mirai» с пониженной стоимостью продаж за счет правительственных преференций. Работа двигателя осуществляется за счет электрохимического генератора (ЭХГ) на базе топливных элементов с их подпиткой водородом из баллонов высокого давления на уровне 70 МПа. Одна заправка двух баллонов обеспечивает пробег автомобиля до 650 км. Очевиден прогресс японских специалистов в достижении высокого давления в баллонах в сочетании с надежностью их работы. Однако эта технология, основанная на использовании топливных элементов, неприемлема для применения в промышленных энергоустановках большой мощности (более 1 МВт). Только объединение интеллектуального, технологического и научно-технического потенциалов специалистов высокотехнологических и наукоемких предприятий, прежде всего, авиационно-ракетного комплекса сможет обеспечить широкое продвижение в промышленность водородных технологий. Наша страна обладает примером уникальных пионерских достижений мирового уровня в результате создания под руководством Генерального конструктора Н. Д. Кузнецова водородного авиационного двигателя НК-88, успешно испытанного в 1988 г. в составе летающей лаборатории ТУ-155, а также двигателя, работающего на жидком водороде, с его результативным использованием на гиперзвуковом летательном аппарате. Указанный двигатель впервые в мире разработан и успешно испытан в 1991 г. под эгидой ФГУП ЦИАМ им. П. И. Баранова (далее — ЦИАМ) на 13 лет раньше, чем в США.

Полученный непревзойденный опыт по испытаниям ЛЛ ТУ-155 обобщен в книге «Внимание — газы: криогенное топливо для авиации» (М.: Московский рабочий, 2001). В ней авторы обращают внимание на следующие обстоятельства: «... Тема криогенных топлив вышла из моды. Бесценные наработки в этой области, как и во многих других, где российские специалисты занимали ведущие



Жидкий водород давлением 7,0 МПа нагнетается турбонасосом 4 в емкости накопителя-газификатора 2. При заполнении указанных емкостей они герметизируются и за счет тепла окружающей среды в них происходит менее чем за сутки изохорический нагрев и газификация водорода до практически атмосферной температуры с повышением его давления до 80-85 МПа. Привод водородного насоса осуществляется турбиной турбонасоса 4 при ее работе на водороде, газифицируемом в газификаторе 5. После турбины водород поступает в емкость 11. В качестве резервуара жидкого водорода может использоваться модифицированный вариант автоцистерны ЦТВ 25/06 объемом 25 м<sup>3</sup> и с содержанием жидкого водорода массой 1,5 т. В качестве теплоносителя в газификаторе 5 могут использоваться либо тепло выхлопных газов газотурбинной установки (ГТУ) 1, либо тепло от парогенераторов, представленных в [3]. Особым представляется вариант добавки газообразного водорода расходом до 4% по объему к природному газу, поступающему в камеру сгорания через специальные многоствольные горелки газотурбинных установок. Следует упомянуть об эффективности такой добавки в котле с погружным нагревом воды (линия к ПНВ на рис. 2), схема которого подробно раскрыта в [6-7]. На фото изображен демонстратор котла с погружным нагревом воды мощностью 50 кВт, созданный в ООО «КОМАС» (г. Апрелевка) в соответствии с техническим решением [7]. Демонстратор подготовлен к проведению сертификационных испытаний.



Рис. 3. Демонстратор котла с погружным нагревом воды с мощностью 50 кВт

В настоящее время в России имеется практически только два предприятия с возможностью стабильного получения жидкого водорода: ФКП НИЦ РКП (вблизи г. Сергиев Посад) с производительностью 200 кг/час (установка 501) по стоимости 20 долл./кг. Небольшая установка с производством 100 кг жидкого водорода в сутки имеется в КБХА (г. Воронеж). Для сравнения, в США в настоящее время получают жидкий водород в объеме 120 тыс. т/г. при его стоимости 5 долл./кг. Из этого объема только 14% направлялось до последнего времени в сферу ракетной тематики, а остальное потребляется при производстве медицинских препаратов, в пищевой, металлургической и химической промышленности. Ныне германская фирма «The Linde Group» изготовила комплекс по получению жидкого водорода в количестве 180 кг/час. Эта фирма рекламирует трейлер со ста баллонами объемом 0,4 м<sup>3</sup> каждый и с давлением водорода 50 МПа, причем масса газа в каждом баллоне достигает 11 кг.

В настоящее время в ОАО «Криогенмаш» по информации Главного специалиста А. М. Домашенко разработан проект установки по ожижению водорода с производительностью 100 кг/час. Ее создание совместно с абсорбирующим комплексом по очистке водорода от примесей кислорода и азота потребует не менее 1,5 лет при финансировании в 10 млн долл.

Использование водорода сверхвысокого давления неизбежно приводит к вопросу о повышении по давлению степени несовершенства газа. Учет проявления реальности газа по отношению к его идеальному состоянию может привести к ошибке свыше 20% по массе газа в фиксированном объеме, например, для водорода при давлении 50 МПа и при нормальной температуре. В связи с этим большое значение приобретают данные об изменении параметров термодинамической несовершенности водорода в диапазоне изменения его давления от 50 до 100 МПа. Для такого диапазона изменения давления автору настоящей публикации неизвестны экспериментальные данные (кроме данных фирмы «LINDE» для давления 50 МПа) по водороду, что вынуждает ограничиваться только расчетами по приведенному уравнению Ван-дер-Ваальса, представленному в виде:

$$\left(\pi + \frac{3}{\omega^2}\right)(3\omega - 1) = 8\tau,$$

где  $\pi = \frac{P}{P_{кр}}$ ,  $\frac{v}{v_{кр}} = \omega$  и  $\frac{T}{T_{кр}} = \tau$  — приведенные к критическим значениям па-

раметры соответственно по давлению  $P$ , удельному объему  $v$  и температуре  $T$ . В табл. 1 представлены результаты расчета параметров водорода по уравнению (1) для температуры  $T = 290$  К в диапазоне изменения давления  $P$  от 30,0 до 100 МПа. Из данных таблицы, в частности, следует, что для  $P = 85$  МПа параметр  $z = Pv/RT$  водорода превышает его значение применительно к идеальному газу практически в 1,5 раза. А это означает, в соответствии с формулой (2), что в заданном объеме при давлении  $P = 85$  МПа и температуре  $T = 290$  К реальная

масса водорода меньше идеальной массы в 1,5 раза. Вместе с тем по данным фирмы «Linde» это отличие в действительности может быть еще больше, ибо фирменный баллон объемом  $0,4 \text{ м}^3$  вмещает только 11 кг водорода при давлении 50 МПа и температуре 290 К, а по данным таблицы (строка 4) должен вмещать 14,3 кг. Отсюда следует настоятельная необходимость экспериментальной проверки изменения параметров водорода в диапазоне по давлению от 30 до 100 МПа. Такая проверка необходима и для установления протекания кривой инверсии, как совокупности точек с нулевым дроссельным эффектом.

Таблица

**Изменения параметров водорода высокого давления при температуре 290 К и разных значениях давления**

$P_{кр} = 1,28 \text{ МПа}; T_{кр} = 33,2 \text{ К}; v_{кр} = 0,032 \text{ м}^3/\text{кг};$ $R_{ид} = 4,13 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$						
1	$P, \text{ МПа}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$R, \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$	$p \cdot v, \text{ кДж/кг}$	$z = R/R_{ид}$
2	30	0,0401	24,96	4,14	1202	1,00
3	40	0,0325	30,78	4,48	1300	1,09
4	50	0,0280	35,70	4,83	1400	1,17
5	60	0,0251	39,89	5,19	1504	1,26
6	70	0,0230	43,50	5,55	1609	1,34
7	80	0,0214	46,64	5,91	1715	1,43
8	90	0,0202	49,39	6,28	1822	1,52
9	100	0,0193	51,82	6,65	1930	1,61

Таким образом, из представленных рассуждений следует, что для грамотного построения инфраструктуры длительного, надежного и эффективного хранения водорода и эффективной заправки баллонов для автомобилей и БПЛА необходимо экспериментальное исследование его свойств в диапазоне изменения давления от 30 до 100 МПа при температуре окружающей среды.

В заключение отметим, что одна из основных задач ЦВИР связана с необходимостью исследования возможностей длительного и безопасного хранения большого количества водорода при учете его реальных свойств для использования в качестве универсального экологически чистого энергоносителя в стационарных и передвижных энергогенерирующих системах, а также в комплексе НИР. Такое хранение возможно только [8] в газообразном состоянии водорода сверхвысокого давления (100 МПа и более), ибо его длительное хранение в жидком состоянии неэффективно и опасно. При этом надо иметь в виду неизбежное повышение температуры заполняемого в баллоны водорода, как из-за эффекта инверсии, так и в связи с совершением работы сжатия. Расчеты показывают, что при заполнении теплоизолированного баллона до давления 50 МПа из емкости с давлением 100 МПа повышение температуры водорода может превысить  $50^\circ\text{C}$ . Расчеты основаны на подходах к подобным оценкам профессора В. Е. Михальцева, представленных в [9].

В целом, задачи, решаемые в составе ЦВИР, можно представить следующим образом:

— Разработка технологий безопасного получения, транспортировки, компримирования, хранения и использования водорода сверхвысокого давления (до 100 МПа).

— Разработка технологии взрывобезопасной эксплуатации водородных стэндов, энергетических установок, газотурбинных двигателей.

— Исследование реальных свойств водорода в области сверхвысокого давления (более 50 МПа).

— Исследования процессов горения водородно-воздушных и водородосодержащих топливовоздушных смесей на основе синтеза газов, в том числе низкокалорийных.

— Создание блока смешения водорода с природным газом.

— Исследование характеристик водородно-кислородных топливных элементов различного типа.

— Создание общероссийского Фонда данных по объектам интеллектуальной собственности в области водородных технологий.

— Объединение усилий динамически развивающихся структур в сфере водородных технологий, прежде всего, для обмена опытом и формирования Фонда данных по объектам интеллектуальной собственности.

— Организация обучения персонала предприятий, заинтересованных в использовании водорода.

— Сертификационные испытания агрегатов, предназначенных для работы на водороде в составе энергосистем различного назначения.

— Исследование возможностей коммерциализации полученных результатов.

Для научно-методического сопровождения разработок ЦВИР создана межведомственная рабочая группа под председательством академика РАН О. Н. Фаворского. На ее заседании 27.02.2014 г. было поддержано [8] утверждение: «Водород нам не обойти». На наш взгляд, очень точный прогноз.

По материалам статьи можно сформулировать некоторые частные, но вместе с тем актуальные выводы.

### **Выводы**

1. Установлено, что длительное хранение водорода в жидком состоянии неэффективно и опасно. В рамках проекта ЦВИР предложена новая технология безопасного хранения и использования водорода, заключающаяся в эффективном достижении его сверхвысокого давления (100 МПа и более) при плотности, близкой к плотности жидкости. Сверхвысокое давление обеспечивается заправкой емкостей жидким водородом с последующей его изохорной газификацией за счет тепла окружающей среды.

2. Для успешной реализации новой технологии длительного хранения и эффективного использования водорода необходимо:

— исследовать реальные свойства водорода в диапазоне от 50 до 130 МПа;



— разработать надежные составные емкости, включающие внутреннюю емкость, из композитных материалов желательнее с массовым удельным показателем не более 0,3 кг/л. Составные емкости должны обеспечивать безопасную заправку криогенной жидкостью при большом числе циклов заполнения и опорожнения;

— исследовать особенности заполнения транспортируемых баллонов из стационарных емкостей сверхвысокого давления с учетом значительного нагрева рабочего тела в процессе заполнения баллонов. Расчеты показывают, что при заполнении теплоизолированного баллона до давления 50 МПа из емкости с водородом при давлении 100 МПа температура идеального газа при полном заполнении баллона повысится на 48°С по отношению к нормальной температуре.

3. Для успешной реализации проекта ЦВИР в целом актуальной остается проблема дешевого получения жидкого водорода в России по стоимости не выше, чем в США (5 долл. за 1 кг). Это повысит привлекательность криогенной заправки емкостей водородом и заметно сократит затраты энергии на получение сверхвысокого давления водорода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сатонин-Бакурев И. М. Паровой котел: авт. свид. СССР № 31448 с приоритетом от 25.12.1931.
2. Гуров В. И., Чернов А. Ю., Чернов Ю. С. Парогенератор: пат. РФ № 2018048 на изобретение с приоритетом от 28.12.1991.
3. Малышенко С. П., Пригожин В. И., Рачук В. С. Водородно-кислородные парогенераторы. Современное машиностроение. 2009. № 2-3. С. 54-58.
4. Гуров В. И., Пригожин В. И., Савич А. Р. Энергетическая система: пат. РФ № 2538979 на изобретение с приоритетом от 20 июня 2013 г.
5. Гуров В. И., Рачук В. С., Фаворский О. Н., Харьковский С. В. и др. Комбинированная энергетическая система: пат. РФ № 2463463 на изобретение с приоритетом от 24.12.2010 г.
6. Гуров В. И., Иванов П. С., Курносков В. В. Теплоснабжение зданий на основе котла с погружным нагревом воды. Энергия: экономика — техника — экология. 2012. № 5. С. 32-36.
7. Гуров В. И., Иванов П. С., Курносков В. В., Азаров Н. В. Водонагревательное устройство: пат. РФ № 2469244 с приоритетом от 08.06.2011 г.
8. Архипов В. В., Гуров В. И., Селиванов О. Д., Шестаков К. Н. Водород нам не обойти. Энергия: экономика — техника — экология. 2014. № 12. С. 18-22.
9. Елисеев Ю. С., Манушин Э. А., Михальцев В. Е. и др. Теория и расчет газотурбинных и комбинированных установок. Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. С. 640.

#### REFERENCES

1. Satonin-Bakurev, I. M. Parovoi kotel: avt. свид. SSSR № 31448 s prioritetom ot 25.12.1931.
2. Gurov, V. I., Chernov, A. I. Chernov, U. S. Parogenerator: part. RF № 2018048 na izobretenie s prioritetom ot 28.12.1991.

3. Malishenko, S. P., Prigozhin, V. L., Rachuk, V. S. Vodorodno-kislorodnie parogeneratory. *Sovremennoe mashinostroenie*. 2009. № 2-3. S. 54-58
4. Gurov, V. T., Prigozhin, V. I., Savich, A. R. Energeticheskaja sistema: pat. RF № 2538979 na izobrenie s prioriteto ot 20.06.2013.
5. Gurov, V. I., Rachuk, V. S., Favorskii, O. N., Kharkovskii, S. V. i dr. Kombinirovannaja energeticheskaja sistema: pat RF № 2463463 na izobrenie s prioriteto ot 24.12.2010.
6. Gurov, V. I., Ivanov, P. S., Kurnosov, V. V. Teplosnabzhenie zdanii na osnove kotla s pogruzhnym nagrevom vody. *Energiia: ekonomika — tehnika — ekologiia*, 2012. № 5. S. 32-36
7. Gurov, V. I., Ivanov, P. S., Kurnosov, V. V., Azarov N. V. Vodonagrevatelnoie ustroistvo: pat. RF №2469244 s prioriteto ot 08.06.2011.
8. Atkhipov, V. V., Gurov, V. I., Selivanov, O. D., Shestakov, K. N. Vodorod nam ne oboiti. *Energiia: ekonomika — tehnika — ekologiia*. 2014. № 12. S. 18-22.
9. Eliseev, U. S., Manushin, E. A., Mikhaltsev, V. E. i dr. Teoriia i raschet gazoturbinnikh i kombinirovannikh ustanovok. *Izd-vo MGTU imeni N. E. Baumana*, 2000. S. 640.

#### **Автор публикации**

**Гуров Валерий Игнатьевич** — начальник сектора (ГНЦ РФ ЦИАМ), профессор Центрального института авиационного машиностроения (г. Москва), доктор технических наук

#### **Author of the publication**

**Valeriy I. Gurov** — Doctor of Tech. Sciences, Professor, Central Institute of Aviation Engineering, Head of sector (SSC RF CIAE)