

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Михаил Валерьевич ГОРДИН¹

Валерий Игнатьевич ГУРОВ²

Антон Николаевич ВАРЮХИН³

Александр Валикоевич ГЕЛИЕВ⁴

Елена Владимировна ЩЕРБАКОВА⁵

УДК 661.96:533.581

ВОДОРОД — НОЛЬ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА

¹ кандидат технических наук, генеральный директор,
Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва)
mvgordin@ciam.ru

² доктор технических наук, начальник сектора,
Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва)
vigurov@ciam.ru

³ кандидат физико-математических наук, начальник отдела,
Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва)
anvaryukhin@ciam.ru

⁴ кандидат физико-математических наук, начальник сектора,
Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва)
avgeliev@ciam.ru

⁵ кандидат технических наук, начальник сектора,
Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва)
evscherbakova@ciam.ru

Цитирование: Гордин М. В. Водород — ноль углеродного следа / М. В. Гордин, В. И. Гуров, А. Н. Варюхин, А. В. Гелиев, Е. В. Щербакова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 1 (25). С. 10-25.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-10-25

Аннотация

Представлены основные достижения России за прошедшие 65 лет по разработке опережающего научно-технического задела по внедрению водорода в качестве топлива в различных энергосистемах. На базе полученных результатов мирового уровня обоснована необходимость создания Центра водородных инновационных разработок (ЦВИР) с определяющим участием предприятий, имеющих реальный опыт получения жидкого водорода ($H_{2ж}$) с возможностью его длительного хранения. Сформулирована концепция проведения в рамках ЦВИР отработки прорывных технологических решений по широкому применению водорода в качестве эффективного и экологически чистого (без образования окислов углерода) топлива в различных энергосистемах. В частности, разработана стратегическая направленность проекта ЦВИР в целях создания развитой инфраструктуры по надежному обеспечению транспортных средств требуемым количеством топлива в ограниченный промежуток времени. Этого можно достичь путем применения способа криогенной заправки транспортных баллонов с учетом реальных свойств водорода в области сверхвысокого давления в заправляемых баллонах (70 МПа и выше). Раскрыты возможности по дальнейшему наращиванию опережающего научно-технического задела по широкому освоению водорода на основе комплексной реализации решений, представленных в проекте ЦВИР. Проведено сравнение разработанных технологий с зарубежными аналогами.

Ключевые слова

Водородное топливо, проблема длительного хранения жидкого водорода, поставка водорода потребителю, Центр водородных инновационных разработок, способ криогенной заправки емкостей, прорывные технологии, мировые достижения России.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-10-25

Введение

В середине 50-х гг. прошлого столетия головной научный центр авиамоторов выступил с инициативой применения водорода в авиации для тяжелых самолетов с экспериментальным подтверждением высоких показателей эффективности и экологичности универсального энергоносителя будущего. В 1967 году — в подкрепление предложенной инициативы — проведены разносторонние испытания авиационного двигателя ГТД-350, в качестве топлива использовали газообразный водород попеременно с природным газом. Успех испытаний подтвердил прогнозируемое улучшение показателей и по эффективности, и по экологичности исследуемой системы. Вместе с тем результаты работы двигателя дополнительно засвидетельствовали — что не менее важно — достаточную надежность испытанного двигателя при соблюдении установленных норм эксплуатации особо сложных объектов. Установленные нормы предопределяют допустимое содержание вредных примесей прежде всего в помещении с размещенными в нем локальными источниками водорода и природного газа. При превышении установленных норм автоматически предусматривается включение системы аварийного отключения

работы двигателя с одновременным уменьшением (специальными средствами) уровня содержания вредных примесей. Предложение по использованию водорода в авиации нашло поддержку у академика В. В. Струминского, а также в руководстве страны. В 1988 году состоялся успешный полет летающей лаборатории Ту-155 с двигателем НК-88, работающим на жидком водороде в качестве топлива. Спустя три года новые достижения России укрепили первенство нашей страны в использовании жидкого водорода при создании сверхзвукового ПВРД (1991 г.) с получением скоростей полета с числом Маха на уровне 5,8, а также при разработке кислородно-водородного двигателя РД-0146 тягой 10 тонн, созданного, по сути дела, «с листа» — в рекордно сжатые сроки (2001 г.).

Полученные результаты позволили обосновать необходимость объединения возможностей наукоемких и высокотехнологических предприятий в целях создания Центра водородных инновационных разработок (ЦВИР) для дальнейшего наращивания опережающего научно-технического задела по исследованию перспектив широкого внедрения водорода в качестве топлива в общую промышленность. Выявлены, в частности, основные проблемы создания развитой инфраструктуры по длительному хранению водорода с эффективной системой быстрого распределения водорода среди потребителей, как внутренних, так и внешних. Проработана задача оптимального выбора заправочных баллонов (по их объему, стоимости, доступности и апробированной надежности) для использования в различных видах транспортных средств: наземного, водного, воздушного и космического.

Предпринята попытка обоснования того, что реализация прорывных идей возможна только на платформе высокой научно-технической подготовленности специалистов передовых отраслей промышленности, постоянного внимания руководства страны к проблемам повышения эффективности и надежности создания передовых образцов техники, а также при умении выбрать лидеров и организовать творческое сотрудничество коллективов ведущих головных наукоемких и высокотехнологичных организаций страны.

Основная часть

Водород — универсальный энергоноситель будущего

Водород является универсальным энергетическим носителем с высокими экологическими показателями: при его сжигании в воздухе не образуются окислы углерода. Универсальность его заключается прежде всего в возможности использования в качестве топлива в различных энергетических системах.

Первые попытки создания экологически чистых кислородно-водородных паровых котлов в нашей стране предприняты без малого 90 лет назад [9]. В 1991 г. в АО «Конструкторское бюро химической автоматики» (далее — КБХА (г. Воронеж)) под эгидой Центрального института авиационного моторостроения им. П. И. Баранова (далее — ЦИАМ) испытан демонстратор с подводным стехиометрическим сжиганием водорода в кислороде в соответствии с техническим решением [10]. Созданию ряда опытных образцов современных

кислородно-водородных парогенераторов посвящены совместные работы ОАО КБХА и Объединенного института высоких температур РАН [7].

Интересен зарубежный опыт освоения водорода при его закачивании [6] в газораспределительные сети низкокалорийного природного газа на острове Амеланд (Нидерланды) в количестве 20% по объему. Успешная реализация представленного проекта позволила накопить уникальный опыт оптимальной эксплуатации газовой системы, транспортирующей смесь газов, и объединенной системы электролиза воды, работающей на электричестве от эффективно-го использования солнечной энергии. Кроме того, многолетняя работа голландских исследователей позволила выяснить влияние смеси газов на работу элементов штатной газотранспортной сети (ШГТС), включая обычные газовые приборы. При этом установлен минимальный потребный объем необходимых доработок ШГТС. Следует особо подчеркнуть, что добавление водорода в ПГ и его транспортировка рассматривается и в наше время (как и десять лет назад) в качестве важного направления на пути расширения возобновляемой энергетики (см. [8]). Однако представленное техническое решение имеет ограниченное применение.

Вместе с тем известно, что определяющее значение в научно-техническом обновлении промышленности имеют широкомасштабные достижения в наукоемких и высокотехнологических отраслях народного хозяйства. В этом отношении заметны перспективные наработки ЦИАМ в создании (с середины 50-х гг. прошлого столетия) опережающего научно-технического задела по возможности использования водорода в авиационных двигателях тяжелых самолетов. Технический документ, выпущенный в то время коллективом авторов под руководством С. М. Шляхтенко, показал возможность увеличения не только дальности полета самолета (до 60%) с жидким водородом на борту, но и улучшение экологических показателей прежде всего по выбросам окислов углерода. Насколько актуальной остается и в наше время проблема снижения содержания окислов углерода в атмосфере, свидетельствует недавнее заявление генерального директора SpaceX и Tesla Илона Маска, пообещавшего награду в 100 млн долларов тому, кто создаст лучшую технологию улавливания углекислого газа.

Успешные испытания в 1967 г. двигателя ГТД-350 на одном из стендов ЦИАМ [2] нашли поддержку группы специалистов ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского под руководством академика АН СССР В. В. Струминского. В дальнейшем группа ЦАГИ предложила интересный вариант сопровождения самолета с водородным двигателем отдельным самолетом-заправщиком. В итоге появились комплексно-целевые программы (КЦП) «Холод-1», «Холод-2» и т. д. Одним из главных результатов упомянутых программ стал первый в мире полет 15 апреля 1988 г. летающей лаборатории (ЛЛ) самолета Ту-155 с водородным двигателем НК-88 разработки ОКБ Н. Д. Кузнецова. В последующем по результатам длительных полетов установлено четыре мировых рекорда, в том числе с использованием в качестве топлива сжиженного природного газа (СПГ) в двигателе НК-89.

Полеты ЛЛ Ту-155 — достижение мирового уровня

Мощный толчок началу конкретных работ по проектированию ЛЛ дало совещание в ЦК КПСС, которое проводил секретарь ЦК Д. Ф. Устинов. На совещании рассматривались принципиальные вопросы использования в авиации жидкого водорода [1]. Президент АН СССР Анатолий Петрович Александров и генеральный конструктор Алексей Андреевич Туполев сделали конкретные предложения по развитию представленного направления. Д. Ф. Устинов, который хорошо знал перспективные наработки ОКБ Н. Д. Кузнецова, прямо предложил рассмотреть вариант ЛЛ на базе самолета Ту-154Б.

Успешная реализация проекта ЛЛ Ту-155 является убедительной иллюстрацией возможностей плодотворного объединения (на основе общей нацеленности на пригодный для контроля результат) ресурсов — научных, технических, технологических, инновационных и финансовых, а главное, кадровых. В результате тесного взаимодействия специалистов ОКБ Туполева (А. А. Андреев, В. М. Вуль, С. Б. Гальперин, В. П. Логвинюк, В. В. Малышев, В. И. Солозобов и др.), ОКБ Кузнецова (В. Н. Орлов, В. А. Козлов, А. И. Иванов, И. П. Косицын, В. В. Харламов и др.), ЦИАМ (А. И. Гулиенко, В. И. Гуров, В. М. Калнин, В. В. Карпушин, Ф. Н. Олифинов, Д. Г. Пажи и др.) удалось в достаточно сжатые сроки достичь результата мирового уровня. Полученный опыт обобщен в работе [1], в которой 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 мировые позиции, могут быть безвозвратно утеряны. Но переход на новые альтернативные источники энергии является жестокой необходимостью. Ученые могут ошибаться на 50 и даже на 100 лет, однако ископаемые топлива в какой-то момент будут исчерпаны. Потеря источников энергии такой же „конец света“, как и любые другие глобальные катастрофы и беды. Та страна, ученые и специалисты которой первыми найдут оптимальное решение проблемы перехода на неисчерпаемые источники энергии, получит доминирующее положение в мире. Особенно это важно для России с учетом огромного населения, богатейших природных ресурсов, занимаемого географического положения, климатических зон и расстояний» [1, с. 211].

Трудно что-либо добавить к этому убедительному прогнозу ведущих организаторов успешной реализации проекта ЛЛ Ту-155. Безусловно, что 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. Вместе с тем за несколько десятилетий до высказывания авторов фундаментального труда [1] с убедительным прогнозом выступил знаменитый физик Нильс Бор. Нобелевский лауреат предсказывал: «Человечество погибнет не от атомной бомбы, бесконечных войн: оно похоронит себя под горами собственных отходов», причем под отходами можно разуметь не только бытовые и промышленные отходы, но и — в более

широком смысле — ухудшение экологических показателей среды обитания: и от мусорных полигонов, и от работающих энергетических источников. Заметному улучшению экологических показателей окружающей среды способствует широкое применение водорода в качестве топлива в различных энергосистемах.

Жидкий водород — в качестве топлива и источника холодильного ресурса — еще раз заявил о себе результатами успешного пуска 27 ноября 1991 г. высокоскоростного ПВРД с достижением числа Маха, равного 5,8. Проект разработан множеством организаций страны под эгидой ЦИАМ (ответственный исполнитель — кандидат технических наук В. Л. Семенов) с опережением на 13 лет подобных достижений специалистов США. Основные итоги выполнения КЦП «Холод-1», «Холод-2» и др. представлены в работе [4].

Времена перестройки (когда политика опережала остро назревшую необходимость экономического преобразования страны) и последующее за этим десятилетие падения экономики России существенно замедлили системное внедрение водорода в общую промышленность.

Вместе с тем, несмотря на трудные времена, подспудно продолжались исследования возможностей использования жидкого водорода в различных энергетических системах. В частности, в КБХА в 2001 г. был успешно испытан [3] кислородно-водородный жидкостный ракетный двигатель РД-0146 тягой 10 тонн. В нем впервые в отечественной практике намеренно использованы (рис. 1) для ускорения доводки и наземного применения раздельные двухвальные турбонасосные агрегаты для жидкого кислорода (ТНАО) и жидкого водорода (ТНАГ). РД-0146 успешно испытан с заменой жидкого водорода на сжиженный природный газ (СПГ) с обоснованием возможностей применения ТНАГ в целях перекачки СПГ (с расходом 4 кг/с и с избыточным давлением 0,35 МПа) в земных условиях для обеспечения топливом различных энергетических систем. Стоимость изготовления трех агрегатов ТНАГ в размере 45 млн рублей со сроком поставки через один год подтверждена [3] в январе 2021 г. генеральным директором АО «Турбонасос» С. Г. Валуховым (г. Воронеж).

В настоящее время продолжается тесное взаимодействие специалистов ЦИАМ и КБХА в направлении широкого внедрения жидкого водорода ($H_{2ж}$) в народное хозяйство с пониманием необходимости проведения системных исследований свойств $H_{2ж}$, в частности, в условиях его длительного надежного хранения применительно и к электрическим самолетам, и к беспилотным летательным аппаратам длительного пилотирования. Необходимость определения реальных свойств водорода особо диктуется потребностью достаточно точной оценки массы H_2 при реализации способа криогенной заправки баллонов с выходом на заданный предельный уровень давления, определяемый конечной температурой нагрева. Например, баллон объемом 0,4 м³ при давлении 50 МПа и температуре 288 К, по данным немецкой фирмы Linde, реально вмещает 11 кг H_2 . Это соответствует коэффициенту сжимаемости $Z = 1,52$ в уравнении состояния газа. Уместно заметить, что расчет по уравнению Ван-дер-Ваальса приводит к результату по коэффициенту Z на 21% меньше опытного значения. При заполнении баллона компании

Linde с начальным давлением $H_{2ж}$, равным 1,35 МПа при температуре $T = 28$ К, баллон нагревается (за счет тепла окружающей среды стандартной температуры) до $T = 288$ К с достижением давления 50 МПа за время, равное 105 минутам.

В результате совместно проведенного анализа специалистами ЦИАМ и КБХА выбрано наиболее подготовленное предприятие, имеющее опыт работы с криогенными жидкостями, располагающее апробированным источником эффективного получения $H_{2ж}$ и высококвалифицированными кадрами. В итоге в 2016 году разработано совместное технико-экономическое обоснование (ТЭО) по необходимости создания Центра экспериментально-теоретических исследований возможностей использования водорода в качестве универсального энергоносителя в самых разных сферах — от наземного до космического.

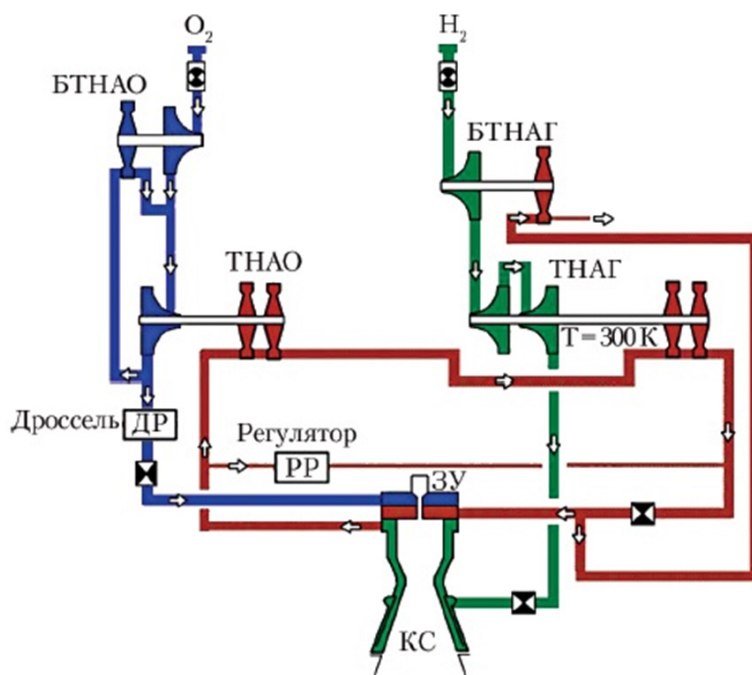


Рис. 1. Обобщенная пневмогидравлическая схема двигателей семейства РД-0146

БТНАГ — бустерный турбонасосный агрегат горючего; БТНАО — бустерный турбонасос окислителя; ТНАГ (ТНА «Г») — турбонасосный агрегат горючего; ТНАО (ТНА «О») — турбонасосный агрегат окислителя; КС — камера сгорания; ЗУ — запальное устройство; РР — регулятор расхода; ДР — дроссель

Fig. 1. A generalized pneumohydraulic scheme of the RD-0146 engines

БТНАГ — booster turbopump unit for fuel; БТНАО — booster turbopump unit for oxidizer; ТНАГ (ТНА “Г”) — fuel turbopump unit; ТНАО (ТНА “О”) — oxidizer turbopump unit; КС — combustion chamber; ЗУ — ignition; РР — flow regulator; ДР — throttle

Стратегическая направленность проекта ЦВИР

На основе совместно проведенных работ со многими значимыми предприятиями авиационной и ракетной промышленности под эгидой ЦИАМ в 2016 году разработано предложение, которое поддержало руководство КБХА и академик О. Н. Фаворский, о создании Центра водородных инновационных разработок (ЦВИР). Стратегической направленностью проекта ЦВИР является [5] разработка инновационных технологий надежного и экономного получения, хранения, транспортировки и широкого применения водорода в различных отраслях промышленности прежде всего в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), автотранспорте, в наземных стационарных и передвижных энергосистемах. Реализация проекта ЦВИР предусматривает достижение критического давления водорода при длительном хранении, при котором плотности пара и жидкости становятся равными. В условиях подобного равенства применительно к $H_{2ж}$ существенно снижается вероятность аварийных исходов при эксплуатации систем длительного хранения жидкого водорода, что косвенно подтверждается и практикой устранения разгаров в криогенных турбо-насосах мощных жидкостных ракетных двигателей. Разгар — это воспламенение и катастрофическое горение (в течение 7-10 мс) металла конструкции при касании, например, ротора о статор. Кроме того, по проекту ЦВИР необходимо оптимально (при минимальных финансовых затратах с учетом платного предоставления прав на использование результатов интеллектуальной деятельности) обеспечить совмещение инфраструктур эффективного использования водорода и в наземных энергосистемах, и в обеспечение работы БПЛА, и в комплексе научно-исследовательских работ. На рис. 2 представлена схема [5] одного из вариантов такого инфраструктурного совмещения, представленного руководством и специалистами Испытательного комплекса КБХА.

Предоставлены данные прежде всего по источнику получения $H_{2ж}$ в количестве 100 кг/сутки, а также по технологии получения высокого давления газа в емкости путем заполнения ее криогенной жидкостью (без использования компрессора с применением прорывного технического решения [12]). Суть указанного решения основана на заполнении резервуара криогенной жидкостью с практически атмосферным давлением с последующим нагревом ее в изохорическом процессе за счет тепла окружающей среды. Повышение температуры криогенной жидкости, сопровождаемое снижением ее плотности, приводит к повышению давления. Предельный уровень повышения давления заранее определяется оценкой потребной массы жидкости, поступающей в резервуар, с учетом ее реальных свойств в газообразном состоянии. При этом важным фактором является определение с высокой точностью коэффициента сжимаемости в уравнении состояния газа на предельном уровне значения давления с достижением конечной температуры газа, близкой к температуре окружающей среды.

Важно отметить, что в настоящее время данные по реальным свойствам водорода получены преимущественно до давления 75 МПа. Вместе с тем известны попытки использования в автомобильных баллонах (емкостью до 100 л) давлений, приближающихся к 100 МПа. Такие разработки стимулируют проведение

интенсивных исследований легких и сверхпрочных материалов, способных в то же время противостоять повышенной проницаемости водорода.

Следует обратить внимание на широкие возможности схемы по эффективному использованию водорода для обеспечения функционирования и турбонасосного агрегата 4, и газотурбинной установки 1 с возможностью ее эксплуатации на смеси H_{2r} и СПГ с автономным агрегатом подачи. Важным фактором обеспечения внебюджетного финансирования потребностей Испытательного комплекса (ИК) КБХА является повышение его доходности за счет постановки на баланс предприятия патентов на изобретения и непрерывного заполнения транспортных водородных баллонов. Большой опыт повышения доходности предприятия за счет реализации возможностей объектов интеллектуальной собственности имеет родственная организация в Воронеже — ВИЛМ (генеральный директор — кандидат экономических наук С. А. Повекевчных). Освоение технологии криогенной заправки жидкого

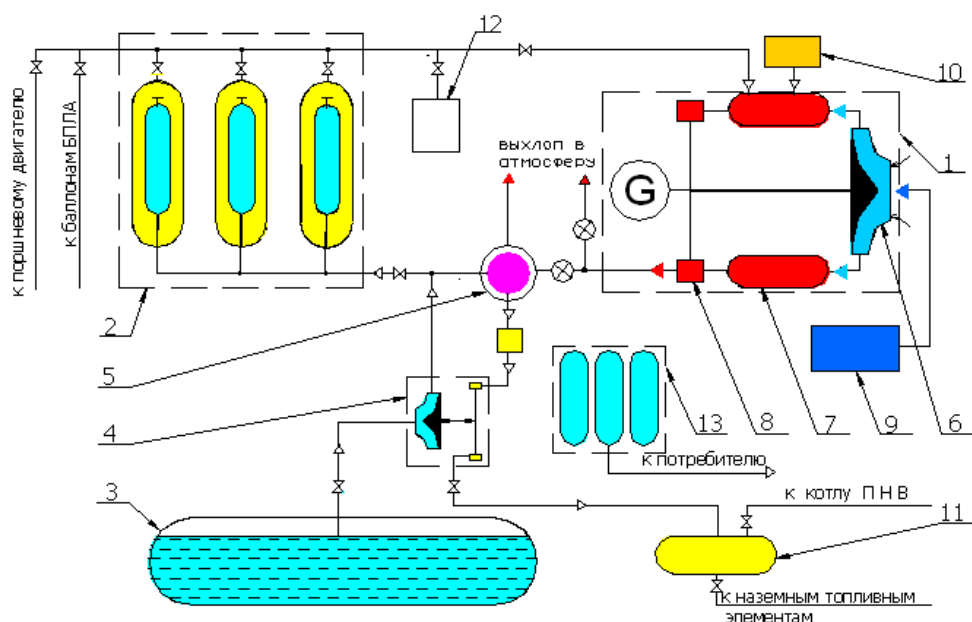


Рис. 2. Схема комбинированной водородной энергосистемы

- 1 — ГТУ; 2 — накопитель-газификатор;
- 3 — резервуар жидкого водорода;
- 4 — турбонасос; 5 — газификатор;
- 6 — компрессор; 7 — камера сгорания;
- 8 — турбина; 9 — источник холодного воздуха;
- 10 — агрегат подачи топлива;
- 11 — емкость газообразного водорода;
- 12 — комплекс установок НИР;
- 13 — баллонная рампа кислорода

Fig. 2. Combined hydrogen energy system

- 1 — gas turbine; 2 — storage-gasifier;
- 3 — liquid hydrogen reservoir;
- 4 — turbo pump; 5 — gasifier;
- 6 — compressor; 7 — combustion chamber;
- 8 — turbine; 9 — cold air source;
- 10 — fuel supply unit;
- 11 — capacity of gaseous hydrogen;
- 12 — set of R&D installations;
- 13 — balloon oxygen ramp

водорода в транспортные композитные баллоны германской фирмы Linde может обеспечить бесперебойную эксплуатацию источника получения $H_{2ж}$. Указанная фирма предлагает потребителям большой запас композитных баллонов с их транспортировкой на трейлере в количестве 100 экземпляров с общей массой $H_{2г}$ равной 1 100 кг (см. рис. 3). Наличие большого количества указанных баллонов предоставляет возможность их широкого использования для заполнения водородом по способу криогенной заливки.

Описание проекта	
<ul style="list-style-type: none"> — 2010: начало проекта по разработке нового трейлера с использованием композитных цилиндров — Расширение существующих мощностей станции по наполнению газов современной технологией наполнения до 500 атм — 50% было проинвестировано Германским правительством 	
Текущий статус	Технические данные
<ul style="list-style-type: none"> — Трейлер эксплуатируется с июня 2013 — > 45 000 кг водорода успешно доставлено клиентам (successfully delivered to customer) — > 40 наполнений до 500 атм 	<ul style="list-style-type: none"> — Количество композитных цилиндров: 100 — Рабочее давление: 500 атм — Объем водорода: 1 100 кг 13 000 Nm³ — Время загрузки/разгрузки: 45-60 мин

Рис. 3. Водородный трейлер фирмы Linde

Fig. 3. Hydrogen-powered lorry of Linde

Оценим в простейшей постановке время нагрева жидкого водорода в сосуде фирмы Linde. Композитный баллон для хранения сжатого водорода фирмы Linde емкостью 0,4 м³, в который быстро залили $H_{2ж}$ массой 11 кг, с начальной температурой 28 К и начальным давлением 1,35 МПа. Требуется определить время нагрева баллона до температуры $T_k = 288$ К при давлении $P_k = 50$ МПа. Известно из практики фирмы Linde, что коэффициент сжимаемости при заданных T_k и P_k в конкретном баллоне равен $Z = 1,52$. Оценку проводим в диапазоне нулевого и первого приближений. Для определения скорости нагрева водорода в композитном баллоне исходим из упрощенного уравнения энергетического баланса (1):

$$M\bar{C}_v \frac{dT}{dt} = \kappa S \frac{T_{окр} - T}{\delta}, \quad (1)$$

где $M = 11$ кг — масса водорода в баллоне, $\bar{C}_v \approx 9,5$ КДж/кг·К — усредненная по диапазону рабочих температур и давлений удельная изохорная теплоемкость водорода, T — средняя по объему баллона температура водорода, K , t — текущее

время, $\kappa = \text{КВт}/(\text{мК})$ — эффективный коэффициент теплопроводности баллона, принимаемый — для упрощения — равным коэффициенту теплопроводности эпоксидной смолы при комнатной температуре, $S = 4,5 \text{ м}^2$ — площадь поверхности баллона, $\delta = 45 \text{ мм}$ — эффективная толщина стенки баллона, $T_{\text{окр}} = 288 \text{ К}$ — температура внешней среды.

Изменение температуры T от времени нагрева t , полученное по результатам расчета с использованием уравнения (1), приведено на рис. 4.

Как следует из рис. 4, температурам 200 К, 270 К и 280 К соответствуют времена нагрева от температуры, равной 21 К, 31,5 мин, 77,5 мин и суммарно 105 минут. Известно, что классическая асимптотическая функция обладает свойством достигать ожидаемого эффекта (нагрева) на 65% при одной трети затраченного времени.

Альтернативой трейлеру фирмы Linde, отражающей общую концепцию зарубежных фирм о длительном, рентабельном и безопасном хранении газообразного водорода в композитных емкостях сверхвысокого давления (от 70 МПа и выше) является отечественная транспортная цистерна ЦТВ-25/06, которая в сутки теряет 1% $\text{H}_{2\text{ж}}$ от его общей массы в 1 500 кг. При этом одновременно с указанной потерей происходит обогащение водорода кристаллами кислорода. При достижении таким кристаллом размера 30 мк может, например, в процессе перекачки $\text{H}_{2\text{ж}}$ из цистерны, произойти его воспламенение в результате трения кристалла о металл конструкции.

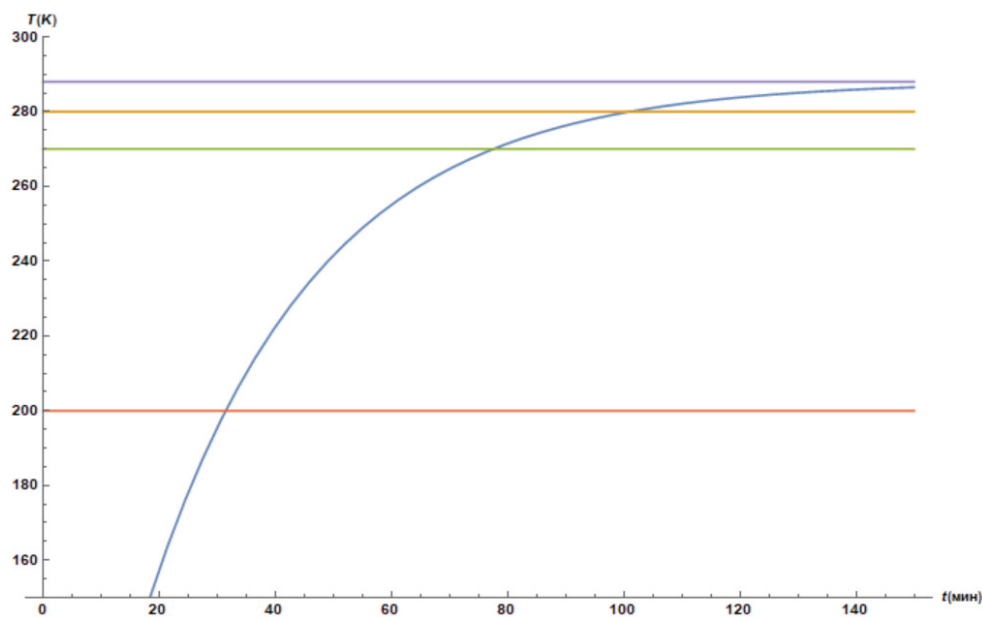


Рис. 4. Зависимость температуры водорода T в композитном баллоне фирмы Linde от времени нагрева t

Fig. 4. Hydrogen temperature T — heating time t connection in the Linde composite cylinder

Вместе с тем остается потребность в длительном хранении жидкого водорода в емкостях, предназначенных к применению в летательных аппаратах, чтобы компенсировать неизбежность утяжеления конструкции емкостей для хранения газа высокого давления из-за прочностных соображений. В ЦИАМ разработан способ длительного хранения $H_{2ж}$ в резервуаре с постоянным давлением $P = 1,4$ МПа, превышающим критическое давление водорода ($P_{кр} = 1,28$ МПа), что уменьшает возможность воспламенения водорода при его подаче потребителю. Расчеты реализации способа ЦИАМ показывают, что длительность нагрева жидкого водорода от начальной температуры, равной 21 К, до $T = 25$ К составляет не менее 1 600 часов с достижением давления 1,5 МПа от начального давления 1,4 МПа в резервуаре с объемом 25 м³ при полном его заполнении. Полученный результат (при температуре окружающей среды $T_{окр} = 288$ К при полном заполнении резервуара) существенно превосходит по длительности нагрева (почти в 3 раза) результат, равный 570 часам, с достижением давления около 1,0 МПа, что представлено в техническом решении [11]. Следует отметить, что проведенный расчет ориентирован на применение в современных криогенных резервуарах перспективных технологий теплоизоляции по сравнению с используемым способом теплоизоляции транспортной цистерны ЦТВ-25/06.

Заключение

Представленный анализ достижений России в использовании водорода в качестве эффективного и экологически чистого топлива в различных энергосистемах показал прорывной характер реализации самых передовых идей прошедших 65 лет. Это стало возможным благодаря высокой научно-технической подготовленности специалистов передовых отраслей промышленности, постоянному вниманию руководства страны к проблемам повышения эффективности и надежности создания передовых образцов техники в сжатые сроки, умению выбрать лидеров и организовать творческое сотрудничество коллективов ведущих головных наукоемких и высокотехнологичных организаций страны.

Раскрытые возможности по наращиванию опережающего научно-технического задела, представленные в Проекте водородных инновационных разработок, укрепляют уверенность в сохранении лидирующей роли России в успешном и широком продвижении водорода в общую промышленность с использованием прорывных технологий передовых отраслей, прежде всего авиационной и ракетной направленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. А. Внимание: газы: криогенное топливо для авиации. / В. А. Андреев, В. Д. Борисов, В. Т. Климов, В. В. Малышев, В. Н. Орлов. М.: Московский рабочий, 2001. 224 с.
2. Гуров В. И. 50 лет первым в СССР испытаниям авиадвигателя на водороде / В. И. Гуров, В. И. Щербаков // Двигатель. 2017. № 5. С. 27.

3. Гуров В. И. Наземное использование водородного турбонасосного агрегата двигателя РД-0146 / В. И. Гуров, Ю. В. Демьяненко, В. С. Рачук // Энергия: экономика — техника — экология. 2017. № 3. С. 23-27.
4. Гуров В. И. Применение водорода на земле, в воздухе и в космосе / В. И. Гуров, В. Л. Семенов // Энергия: экономика — техника — экология. 2009. № 1. С. 2-8.
5. Гуров В. И. Стратегическая направленность проекта Центра водородных инновационных разработок / В. И. Гуров, О. Д. Селиванов, А. М. Домашенко, В. С. Рачук // Энергия: экономика — техника — экология. 2015. № 4. С. 2-7.
6. Кипперс М. Маленький шаг в водородное будущее / М. Кипперс, Й. Де Лаат, Р. Хермкенс // Газ России. 2012. № 1. С. 28-34.
7. Малышенко С. П. Водородно-кислородные парогенераторы / С. П. Малышенко, В. И. Пригожин, В. С. Рачук // Современное машиностроение. 2009. № 2-3. С. 54-58.
8. Новое наполнение для газовых сетей // Газ России. 2011. № 4. с. 38-43.
9. Паровой котел: авт. свид. СССР № 31448 с приоритетом от 25.12.1931 / И. М. Сатонин-Бакурев.
10. Парогенератор: пат. РФ № 2018048 на изобретение с приоритетом от 28.12.1991 / В. И. Гуров, А. Ю. Чернов, Ю. С. Чернов.
11. Способ хранения жидкого водорода в емкости и устройство для его осуществления: пат. РФ № 2183000 на изобретение с приоритетом от 11.05.2000 / И. Н. Глухих, А. Н. Щербаков, А. Н. Старостин, В. Ф. Челябин.
12. Стенд для испытаний энергоустановок с криогенными компонентами: пат. РФ № 2445503 на изобретение с приоритетом от 08.10.2010 / В. И. Пригожин, А. Р. Савич, В. А. Ильичев и др.

Mikhail V. GORDIN¹
Valery I. GUROV²
Anton N. VARYUKHIN³
Alexander V. GELIEV⁴
Elena V. SHCHERBAKOVA⁵

UDC 661.96: 533.581

HYDROGEN — ZERO CARBON FOOTPRINT

¹ Cand. Sci. (Tech.), General Director,
Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Moscow)
mvgordin@ciam.ru

² Dr. Sci. (Tech.), Head of the Sector,
Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Moscow)
vigurov@ciam.ru

³ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Department,
Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Moscow)
anvaryukhin@ciam.ru

⁴ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Sector,
Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Moscow)
avgeliev@ciam.ru

⁵ Cand. Sci. (Tech.), Head of the Sector,
Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Moscow)
evscherbakova@ciam.ru

Abstract

This article presents Russia's main achievements of over the past 65 years in the development of an advanced scientific and technical groundwork for the introduction of hydrogen as a fuel in various energy systems. On the basis of the obtained world-class results, the authors argue for the necessity of creating a Center for Hydrogen Innovative Development (CVIR) with

Citation: Gordin M. V., Gurov V. I., Varyukhin A. N., Geliev A. V., Shcherbakova E. V. 2021. "Hydrogen — zero carbon footprint". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 7, no. 1 (25), pp. 10-25.
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-10-25

the decisive participation of enterprises with real experience in obtaining liquid hydrogen (H_2) with the possibility of its long-term storage.

A concept has been formulated for the development of breakthrough technological solutions for the widespread use of hydrogen as an efficient and environmentally friendly (without the formation of carbon oxides) fuel in various power systems within the framework of the CVIR. In particular, the strategic direction of the CVIR project was developed in order to create a developed infrastructure for the reliable provision of vehicles with the required amount of fuel in a limited period of time. This can be achieved by applying the method of cryogenic filling of transport cylinders, taking into account the real properties of hydrogen in the ultra-high pressure region (70 MPa and above).

The results have revealed possibilities for further building up the advanced scientific and technical groundwork for the broad promotion of hydrogen in the energy complex of Russia, which is presented in the CVIR project. In addition, the authors have compared the developed technologies with foreign analogues.

Keywords

Hydrogen fuel, long-term storage of liquid hydrogen, hydrogen supply to consumers, Center for Hydrogen Innovative Development, cryogenic filling of tanks, world achievements of Russia, breakthrough technologies.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-10-25

REFERENCES

1. Andreev V. A., Borisov V. D., Klimov V. T., Malyshev V. V., Orlov V. N. 2001. Attention — Gases: Cryogenic Fuel for Aviation. Moscow: Moskovskiy rabochiy. 224 pp. [In Russian]
2. Gurov V. I., Shcherbakov V. I. 2017. “50 years of the first in the USSR tests of an aircraft engine on hydrogen”. *Dvigatel*, no. 5, p. 27. [In Russian]
3. Gurov V. I., Demyanenko Yu. V., Rachuk V. S. 2017. “Ground use of the hydrogen turbopump unit of the RD-0146 engine”. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, no. 3, pp. 23-27. [In Russian]
4. Gurov V. I., Semenov V. L. 2009. “Application of hydrogen on earth, in the air and in space”. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, no. 1, pp. 2-8. [In Russian]
5. Gurov V. I., Selivanov O. D., Domashenko A. M., Rachuk V. S. 2015. “Strategic focus of the project of the Center for Hydrogen Innovative Development”. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, no. 4, pp. 2-7. [In Russian]
6. Kippers M., Laat J. De, Hermkens R. 2012. “Small step into the hydrogen future”. *Gas of Russia*, no. 1, pp. 28-34. [In Russian]
7. Malysheva S. P., Prigozhin V. I., Rachuk V. S. 2009. “Hydrogen-oxygen steam generators”. *Sovremennoe mashinostroenie*, no. 2-3, pp. 54-58. [In Russian]
8. “New filling for gas networks”. 2011. *Gaz Rossii*, no. 4, pp. 38-43. [In Russian]
9. Satonin-Bakurev I. M. USSR author certificate No. 31448 with priority of 25 December 1931 “Steam boiler”. [In Russian]

10. Gurov V. I., Chernov A. Yu., Chernov Yu. S. RF patent No. 2018048 for an invention with priority of 28 December 1991 “Steam generator”. [In Russian]
11. Glukhikh I. N., Shcherbakov A. N., Starostin A. N., Chelyaev V. F. RF patent No. 2183000 for an invention with a priority of 5 November 2000 “Method for storing liquid hydrogen in a container and a device for its implementation”. [In Russian]
12. Prigozhin V. I., Savich A. R., Ilyichev V. A. et al. RF patent No. 2445503 for an invention with a priority of 8 October 2010 “Stand for testing power plants with cryogenic components”. [In Russian]