

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Валерий Игнатьевич ГУРОВ¹

Вадим Юрьевич АЛЕКСАНДРОВ²

Дмитрий Александрович СКИБИН³

Дмитрий Николаевич КУЗЬМИЧЕВ⁴

УДК 621.6.054

ВОЗМОЖНОСТИ ШИРОКОГО ОСВОЕНИЯ ВОДОРОДА В ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМАХ

¹ доктор технических наук,
Центральный институт авиационного
моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва)
gurov@ciam.ru

² кандидат технических наук,
Центральный институт авиационного
моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва)
aleksandrov@ciam.ru

³ инженер,
Центральный институт авиационного
моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва)
sda@ciam.ru

⁴ инженер по испытаниям 1 категории,
Центральный институт авиационного
моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва)
kuzmichev@rtc.ciam.ru

Цитирование: Гуров В. И. Возможности широкого освоения водорода в топливных системах / В. И. Гуров, В. Ю. Александров, Д. А. Скибин, Д. Н. Кузьмичев // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 3. С. 8-22.
DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-8-22

Аннотация

Представлен краткий обзор комплексного подхода к освоению водородного топлива в различных топливных системах. Раскрыто понятие оптимальности топливной системы. Показана необходимость формирования общей наземной инфраструктуры по обеспечению водородным топливом наземного и воздушного транспорта с применением композитных баллонов одного типа и уровня давления (до 70 МПа). Аргументирована необходимость охлаждения газообразного водорода, заправляемого в баллон высокого давления. Проведен расчет азотно-водородного теплообменного аппарата по традиционной методике в стационарной постановке. Приведена нестационарная математическая модель теплового состояния теплообменного аппарата. Приведены расчетно-экспериментальные результаты испытаний теплообменного аппарата для охлаждения газообразного водорода жидким азотом. Представлена оценка полученных результатов.

Ключевые слова

Топливная система, водород, азотно-водородный теплообменный аппарат (ТА), расчет, испытания, оценка.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-8-22

Введение

Характерной особенностью нашего времени является широкое освоение водорода в качестве топлива в транспортных системах [2]. В представленной работе приводится, в частности, интересный факт успешного использования в 1941 г. в блокадном Ленинграде газообразного водорода в автомобильном двигателе. Оптимальная транспортная система (ОТС) включает в себя передовую инфраструктуру наземного обеспечения средств передвижения и рациональное использование топлива на борту транспортных средств, включая автомобильный, железнодорожный и речной транспорт, а также авиацию и различные летательные аппараты (ЛА).

Важным показателем ОТС при широком использовании водорода становится тесная интеграция решаемых задач применительно и к наземному, и к воздушно-космическому транспорту. Очевидно, что такая интеграция призвана существенно уменьшить удельные показатели стоимости оборудования ОТС, причем как наземного, так и бортового. Успешному решению задач по освоению водорода в транспортных системах способствует проведение исследований в рамках национальных программ по водородной энергетике передовых стран мира. Имеется многочисленная информация о реализации водородных программ применительно к различным странам, например:

- 1) Австралия (Национальная программа исследования водорода) [13];
- 2) Канада (Канадская программа коммерциализации топливных элементов) [8];
- 3) Европейский Союз (Видение будущего: водород и топливные элементы) [10];

- 4) Япония (Японская национальная водородная программа, Стратегический энергетический план по развитию водородной энергетики) [12];
- 5) США (Программа министерства энергетики по развитию топливных элементов и водорода) [16];
- 6) Германия (Совместные программы федеральных земель и крупных автоконцернов) [9].

Кроме того, перечисленные страны объединились в две международные ассоциации: PATH [14] (партнерство для ускорения перехода на водород) и IPHE [11] (партнерство по развитию водородной экономики). Все вышеуказанные программы предполагают использование водорода для питания топливных элементов, причем тестовыми транспортными средствами являются автомобили, автобусы и грузовики как наиболее простые в конверсии и массовом производстве. Во всех «дорожных картах» есть общее в части фазовых состояний водорода при его применении. Хранение водорода на борту транспортных средств — в баллонах высокого давления (30-70 МПа). Транспортировка на большие расстояния или в жидком состоянии (автоцистернами), или в газообразном — по трубопроводам, а также с помощью трейлеров. В частности, один трейлер германской фирмы The Linde Group [15] может однократно доставить на большие расстояния сто баллонов H_{2r} объемом 400 литров каждый под давлением 50 МПа. При этом разгрузка баллонов осуществляется за 45-60 минут. Следует заметить, что германская фирма The Linde Group готова в течение полугода продать трейлер со ста водородными баллонами объемом $0,4 \text{ м}^3$ каждый с давлением 50 МПа по стоимости около 2 млн € (информация получена в результате переговоров в мае 2015 г. с полномочным представителем указанной фирмы). На 2-ой Международной конференции «Водород-14» (г. Москва) приведена [2] информация о транспортировке H_{2r} газопроводами под давлением не более 2 МПа с протяженностью в Европе более трех тысяч километров при среднем диаметре трубы 0,2 м.

Хранение водорода высокого давления

Все вышеприведенные национальные программы [8-10, 12, 13, 16] планируется завершить в период от 2025 до 2050 г. Главным при этом является установление в некоторой степени условного единого стандарта относительно уровня максимального давления в бортовых баллонах (не более 70 МПа), что связано с конверсией полученных результатов в сфере наземного применения водорода на транспорте. Очевидно, что стоимостные удельные показатели разработок при их двойном применении заметно снижаются. Следует подчеркнуть, что использование водорода в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания не рассматривается ни в одной из программ.

Широкое применение водорода для обеспечения работы топливных элементов на борту ЛА выявляет преимущественное использование газообразного водорода (H_{2r}) высокого давления. Хранение H_{2r} осуществляется в баллонах, конструкция и состав применяемых материалов которых значительно изменялись во времени. В настоящее время известны четыре типа баллонов [15].

- Тип 1: корпус баллона выполнен из металла, в основном из стали. Не требует высокотехнологичных решений при изготовлении. Удельная масса баллона составляет 1,4 кг/л. Удельная стоимость производства — 5 \$ на литр объема.
- Тип 2: корпус баллона выполнен из стали или алюминия и обмотан слоем композитной нити. Нагрузка от внутреннего давления равномерно распределяется между металлом и композитной обмоткой. Удельная масса баллона — 0,75 кг/л. Удельная стоимость производства — 10 \$ на литр объема.
- Тип 3: корпус баллона выполнен целиком из композитной обмотки, лайнер (внутренний сосуд, обеспечивающий герметичность) из стали или алюминия. Нагрузка от внутреннего давления полностью удерживается композитом. Удельная масса баллона — 0,3-0,5 кг/л. Удельная стоимость производства — 20 \$ на литр объема.
- Тип 4: корпус баллона выполнен целиком из композитной обмотки, лайнер из пластика (полиэтилен высокой плотности или фторопласты). Нагрузка от давления целиком удерживается композитной обмоткой. Удельная масса баллона — 0,45 кг/л. Удельная стоимость производства — 20 \$ на литр объема.

Баллоны с лайнером из высокоплотного полиэтилена (HDPE) серийно производятся за рубежом и их можно отнести к технологиям, обеспечивающим прорывное улучшение показателей бортовых баллонов для хранения H_{2r} .

Несмотря на большую удельную массу, преимущество баллона типа 4 над типом 3 состоит в том, что лайнер, выполненный из HDPE, не подвержен водородному охрупчиванию и не пропускает водород, в отличие от металлического. Однако следует обратить внимание на то, что HDPE работоспособен только до температуры 80 °С. Поэтому при заполнении бортовых баллонов газообразным водородом (H_{2r}) его необходимо предварительно охлаждать, тем более из-за совершения работы сжатия при заполнении баллонов до давления 70 МПа температура водорода повышается более чем на 100 °С. Этот факт можно проиллюстрировать использованием формулы (1) из [3], устанавливающей связь между температурой T_x нагреваемого H_{2r} и отношением начального давления P_0 к достигнутому давлению P_p при коэффициенте адиабаты k и начальной температуре T_0 :

$$T_x = \frac{T_0 k}{1 + k \frac{P_0}{P_p} - \frac{P_0}{P_p}}. \quad (1)$$

Проверка выражения (1) показывает, что $T_x = T_0$, если $P_0/P_p = 1$, а при $P_0 = 0$ и $P_p = 1$ нагрев воздуха в вакуумированном баллоне при его заполнении полностью из атмосферы составляет 115 К. Источником увеличения внутренней энергии воздуха является работа, затрачиваемая на вакуумирование баллона.

Применяя формулу (1) к водороду как к реальному газу, можно с высокой вероятностью спрогнозировать, что при заполнении баллона до 50 МПа его температура увеличится в пределах 130-140 К. При этом, как следует из (1), основной нагрев происходит в начальной стадии заполнения. Так, при повышении давления в баллоне от 0,1 до 0,5 МПа ($P_0/P_p = 0,2$) температура в нем повышается на 85 К, а при $P_0/P_p = 0,002$ — на 114 К, что может привести к недобору массы водорода в баллоне, например, объемом 36 л почти на 0,4 кг, т. е. практически на 40%. Очевидно, что нагрев удлиняет сроки заправки баллона из-за необходимости промежуточных стадий охлаждения (не менее трех, в чем нетрудно убедиться с помощью формулы (1)) с целью получения по возможности максимальной массы заправляемого водорода при его температуре, близкой к нормальной. Для сокращения времени заправки баллона потребуется разработка специальной технологии уменьшения нагрева водорода при его поступлении в баллон. Учитывая термодинамические характеристики водорода, простейшим вариантом такой технологии является использование криогенных теплообменников, установленных между емкостью хранения H_{2r} и заправляемым бортовым баллоном. При этом желательно максимально уменьшить время заправки с учетом того, что водородные баллоны большинства автомобилей не являются съемными [7]. Единственным выбором криогенного хладагента по требованиям безопасности, термодинамическим характеристикам, показателям стоимости и распространенности является жидкий азот.

Для охлаждения заправляемого H_{2r} рассчитан, изготовлен и испытан в ЦИАМ азотно-водородный теплообменник АВТ-10 с расходом $H_{2r} = 0,01$ кг/с, что при расходе жидкого азота, равном 0,8 кг/с, позволяло достигать охлаждения водорода на 50-70 К. Схема теплообменного аппарата представлена на рис. 1. Теплообменник выполнен по схеме «труба в трубе»: длина рабочей части составляет 1 м, внутренний диаметр водородного патрубка составляет 0,006 м с толщиной стенки в 0,002 м. Сочетание внутренней стенки азотной и внешней стенки водородной трубок образуют азотный кольцевой канал. Для управляемости процесса охлаждения и исключения возможности появления динамической неустойчивости процесса теплообменник аппарат спроектирован при условии отсутствия газификации азота в охлаждающем канале.

В процессе работы выполнялось два расчета теплообменного аппарата (ТА). Первый расчет проведен по традиционной методике [1] расчета стационарной работы криогенных ТА типа «труба в трубе» для определения их размеров и облика. Второй — в нестационарной постановке работы ТА для определения параметров работы при имитации процесса заполнения водородного баллона. Поскольку решение сопряженных задач теплообмена связано с серьезными математическими трудностями [4], то наиболее рациональным подходом к решению сопряженных задач является создание математических моделей с использованием линеаризации и постоянства ряда параметров процесса теплообмена [6]. В [5] получено в аналитической форме приближенное решение задачи в нелинейной постановке, когда теплофизические свойства материалов тепловыделяющего элемента зависят от температуры.

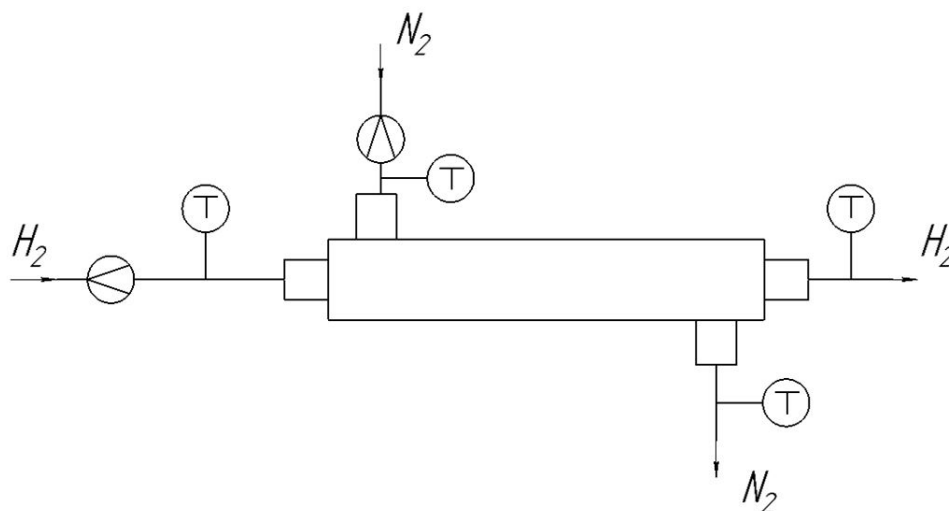


Рис. 1. Принципиальная схема теплообменного аппарата АВТ-10, Т — датчики температуры

Fig. 1. AVT-10 heat exchanger diagram, T — temperature probes

Математическая модель АВТ-10

Рассматривается нестационарный процесс теплообмена в азотно-водородном теплообменнике. Схема ТА представлена на рис. 1. В центральном проточном тракте ТА АВТ-10, стенки которого в некоторый начальный момент времени имеют температуру $T_w = T_{h0}$ (т. е. температура стенки ТА в начальный момент времени равна температуре водорода), начинает протекать водород с температурой на входе T_{h0} . Газ, проходя по ТА, омывает стенки и отдает им часть своего тепла. При этом газ, соответственно, охлаждается.

Течение в ТА существенно дозвуковое. Рассматривается приближение тонкой стенки, т. е. градиента температуры поперек стенки нет.

Обозначим температуру газа (водорода) в сечении x в момент времени t через $T_h(x, t)$, температуру стенок внутренней трубки ТА — $T_w(x, t)$. Толщину стенки внутренней трубки ТА обозначим δ . Температуру хладагента (жидкого азота) обозначим через $T_a(x, t)$. Внешние стенки ТА принимаются теплоизолированными, т. е. теплообмен происходит только между водородом и азотом через стенку трубки.

Граничные условия для температуры газа (водорода) и хладагента (жидкого азота) и начальное условие для температуры стенки ТА есть:

$$\begin{aligned} T_h(0, t) &= T_{h0}, \\ T_w(x, 0) &= T_{h0}, \\ T_a(0, t) &= T_{a0}. \end{aligned} \tag{2}$$

Нестационарный процесс распределения температуры газа (водорода) в проточном тракте ТА описывается следующим уравнением [9]:

$$G_h c_{ph} \left(\frac{\partial T_h}{\partial t} dt + \frac{\partial T_h}{\partial x} dx \right) = -\alpha_1 S_1 (T_h - T_w) dx, \quad (3)$$

где G_h — массовый расход газа; c_{ph} — изобарная теплоемкость газа (водорода); α_1 — коэффициент теплоотдачи от газа к стенкам трубки АВТ; $S_1 = \pi D_1$ — омываемая поверхность внутренней трубки ТА на единицу длины проточного тракта; D_1 — внутренний диаметр трубки ТА.

Аналогично нестационарный процесс распределения температуры хладагента (жидкого азота) в проточном тракте ТА описывается следующим уравнением:

$$G_a c_{pa} \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} dt + \frac{\partial T_a}{\partial x} dx \right) = \alpha_2 S_2 (T_w - T_a) dx, \quad (4)$$

где G_a — массовый расход жидкого азота; c_{pa} — изобарная теплоемкость жидкого азота; α_2 — коэффициент теплоотдачи от стенки ТА к азоту; $S_2 = \pi D_2$ — омываемая поверхность внешней стенки трубки ТА на единицу длины проточного тракта; D_2 — внешний диаметр трубки ТА.

Уравнения для температуры стенки трубки ТА:

$$\rho_w C_w S_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx = \lambda_w S_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx + \alpha_1 S_1 (T_h - T_w) dx - \alpha_2 S_2 (T_w - T_a) dx, \quad (5)$$

где $S_w = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2)$ — площадь поперечного сечения стенки внутренней трубки ТА; ρ_w — плотность материала трубки ТА; C_w — теплоемкость материала трубки ТА; λ_w — теплопроводность материала стенки ТА.

Учитывая, что для движущейся частицы среды

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (6)$$

и проводя обезразмеривание уравнений путем введения безразмерных переменных

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{x}{L}, \\ \bar{t} &= \frac{t}{\tau}, \\ \bar{T}_h &= \frac{T_h - T_{a0}}{T_{h0} - T_{a0}}, \\ \bar{T}_w &= \frac{T_w - T_{a0}}{T_{h0} - T_{a0}}, \\ \bar{T}_a &= \frac{T_a - T_{a0}}{T_{h0} - T_{a0}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где L — характерная длина, например, длина ТА, м; τ — характерное время, например, время процесса, с; после обезразмеривания система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}_h}{\partial \bar{t}} + Ho_h \frac{\partial \bar{T}_h}{\partial \bar{x}} &= -A_h (\bar{T}_h - \bar{T}_w), \\ \frac{\partial \bar{T}_w}{\partial \bar{t}} - Fo \frac{\partial^2 \bar{T}_w}{\partial \bar{x}^2} &= B_h (\bar{T}_h - \bar{T}_w) - B_a (\bar{T}_w - \bar{T}_a), \\ \frac{\partial \bar{T}_a}{\partial \bar{t}} + Ho_a \frac{\partial \bar{T}_a}{\partial \bar{x}} &= A_a (\bar{T}_w - \bar{T}_a), \end{aligned} \quad (8)$$

где коэффициенты в уравнениях:

$$\begin{aligned} Ho_h &= \frac{U_h \cdot \tau}{L}, & Ho_a &= \frac{U_a \cdot \tau}{L}, \\ A_h &= \frac{\alpha_1 S_1 U_h \cdot \tau}{G_h c_{ph}}, & A_a &= \frac{\alpha_2 S_2 U_a \cdot \tau}{G_a c_{pa}}, \\ B_h &= \frac{\alpha_1 S_1 \tau}{\rho_w c_w S_w}, & B_a &= \frac{\alpha_2 S_2 \tau}{\rho_w c_w S_w}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для системы уравнений в частных производных (8) необходимо поставить следующие граничные и начальные (краевые) условия:

$$\begin{aligned} \bar{T}_h(0, \bar{t}) &= 1, \\ \bar{T}_h(\bar{x}, 0) &= 1, \\ \bar{T}_a(0, \bar{t}) &= 0, \\ \bar{T}_w(\bar{x}, 0) &= 1, \\ \frac{\partial \bar{T}_w(0, \bar{t})}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial \bar{T}_w(L, \bar{t})}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Система (8) с краевыми условиями (10) решалась численно для параметров ТА, использованных в экспериментальных исследованиях.

На рис. 2 представлено распределение температуры газа (водорода), стенок трубки ТА и хладагента (жидкого азота) по времени. Диапазон температур — от начальной температуры азота (70 К) до начальной температуры водорода (273 К).

Полученные в результате расчета зависимости позволяют определить время (≈ 3 с) выхода ТА на квазистационарный режим работы, а также температуру водорода на выходе из ТА (190 К). Расчет согласуется с экспериментальными данными с поправкой на инерционность средств измерения температуры и уменьшение расхода водорода во время проведения эксперимента.

Проведение эксперимента

Экспериментальная проверка работы ТА АВТ-10 проводилась на испытательном стенде НИЦ ЦИАМ. На время испытаний для уменьшения теплопритока от окружающей среды к жидкому азоту ТА изолировался с помощью асбестового шнура. Подача водорода осуществлялась от баллонной рампы из 30 баллонов по 40 литров каждый с начальным давлением 14,5 МПа. Жидкий азот подавался из наддуваемых азотом криогенных емкостей. Водород продувался через ТА без использования редуктора давления, что приводило к постепенному снижению расхода по мере снижения давления в баллонах. Такая постановка эксперимента позволяла имитировать процесс заправки баллона высокого давления, т. к. по мере достижения целевого давления уменьшается разница давлений между заправочным баллоном и заправляемым. В данных условиях разница между заправкой баллона и спуском газа в атмосферу отсутствует, т. к. постепенное уменьшение разницы давлений присутствует в обоих случаях.

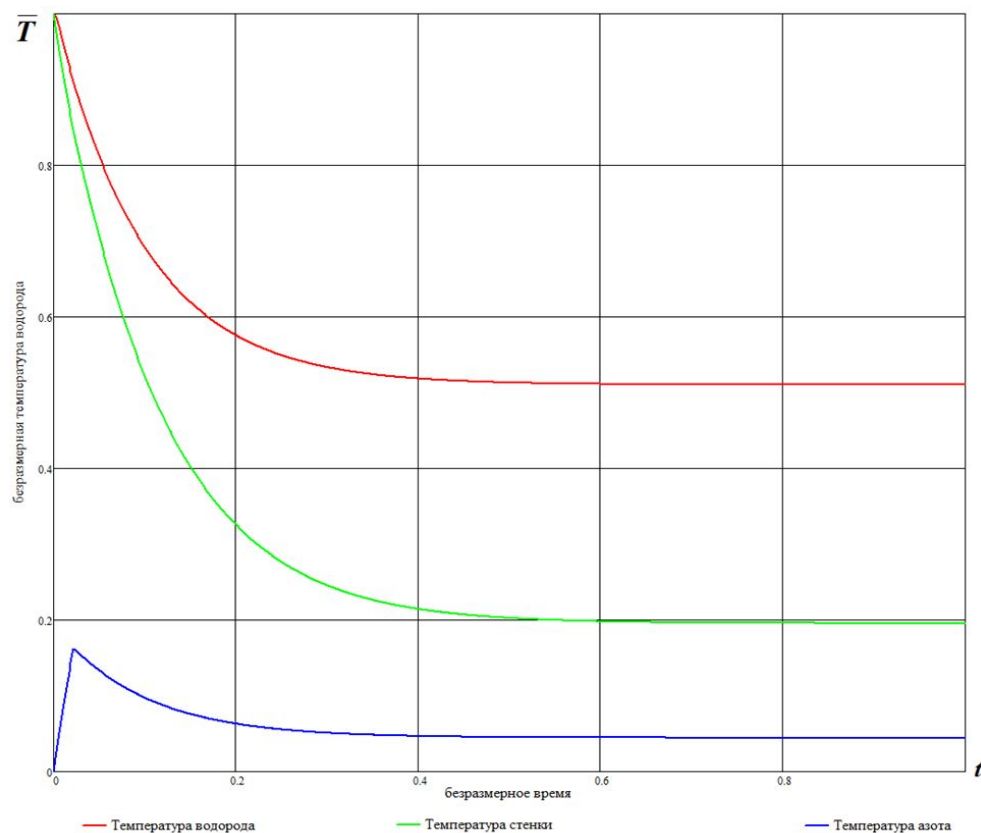


Рис. 2. Безразмерное распределение температуры \bar{T} газа (водорода), стенок трубки ТА АВТ-10 и хладагента (жидкого азота) по безразмерному времени t

Fig. 2. Dimensionless distribution of gas (hydrogen), wall and refrigerant (liquid nitrogen) temperature \bar{T} over dimensionless time t

- Суммарное время проведения испытаний ТА АВТ-10 составило около 900 секунд:
- захлаживание магистралей ТА и промежуточные пуски — приблизительно 250 секунд;
 - первый основной пуск — 320 секунд;
 - второй основной пуск — 270 секунд.

Начальное давление в батарее водородных баллонов составляло 14,6 МПа, давление в конце пуска — 7,8 МПа. Давление наддува жидкого азота составляло 0,9 МПа.

График изменения расхода водорода и азота по мере проведения эксперимента представлен на рис. 3.

Расход водорода изменялся от 11 до 8 г/с при неизменном расходе жидкого азота в 800 г/с после полного захлаживания магистралей.

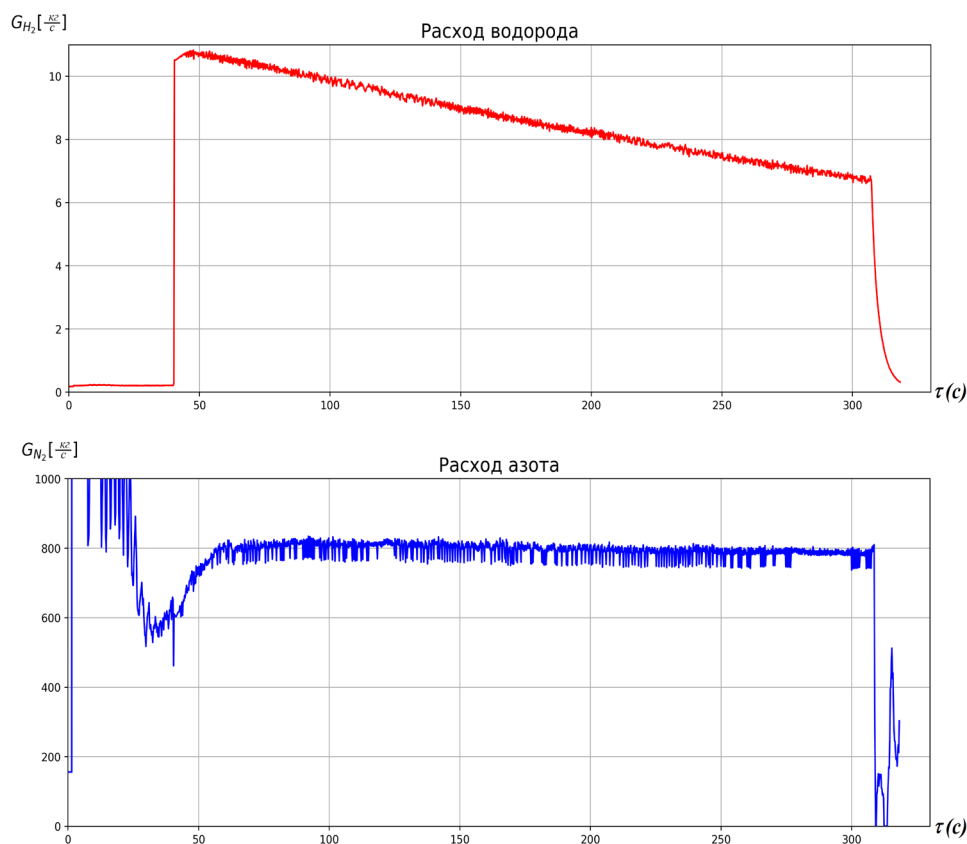


Рис. 3. График изменения расхода водорода G_{H_2} и азота G_{N_2} по времени τ при испытаниях ТА АВТ-10

Fig. 3. Hydrogen and nitrogen consumption chart (G_{H_2} and G_{N_2} respectively) over the experiment time τ

Во время испытаний производилось измерение четырех температур на входах и выходах каналов водорода и азота при помощи термосопротивлений и термопар. Результаты измерений температур представлены на рис. 4.

График состоит из трех участков: захлаживание магистралей (0-40 с), подача водорода и выход на линейный режим снижения температуры (40-90 с), линейный режим снижения температуры (90-310 с). После обработки данных эксперимента и сопоставления с данными расчетов отмечена инерционность средств измерения, которая не позволяет точно определить температуру полного захлаживания водорода. Минимальная температура водорода, достигнутая во время проведения испытаний, составляет 200 К при неизменной входной температуре (273 К). Входная и выходная температуры жидкого азота неизменны (92 и 98 К соответственно) и находятся ниже температуры кипения при давлении наддува. Стационарный характер температур азота при линейном

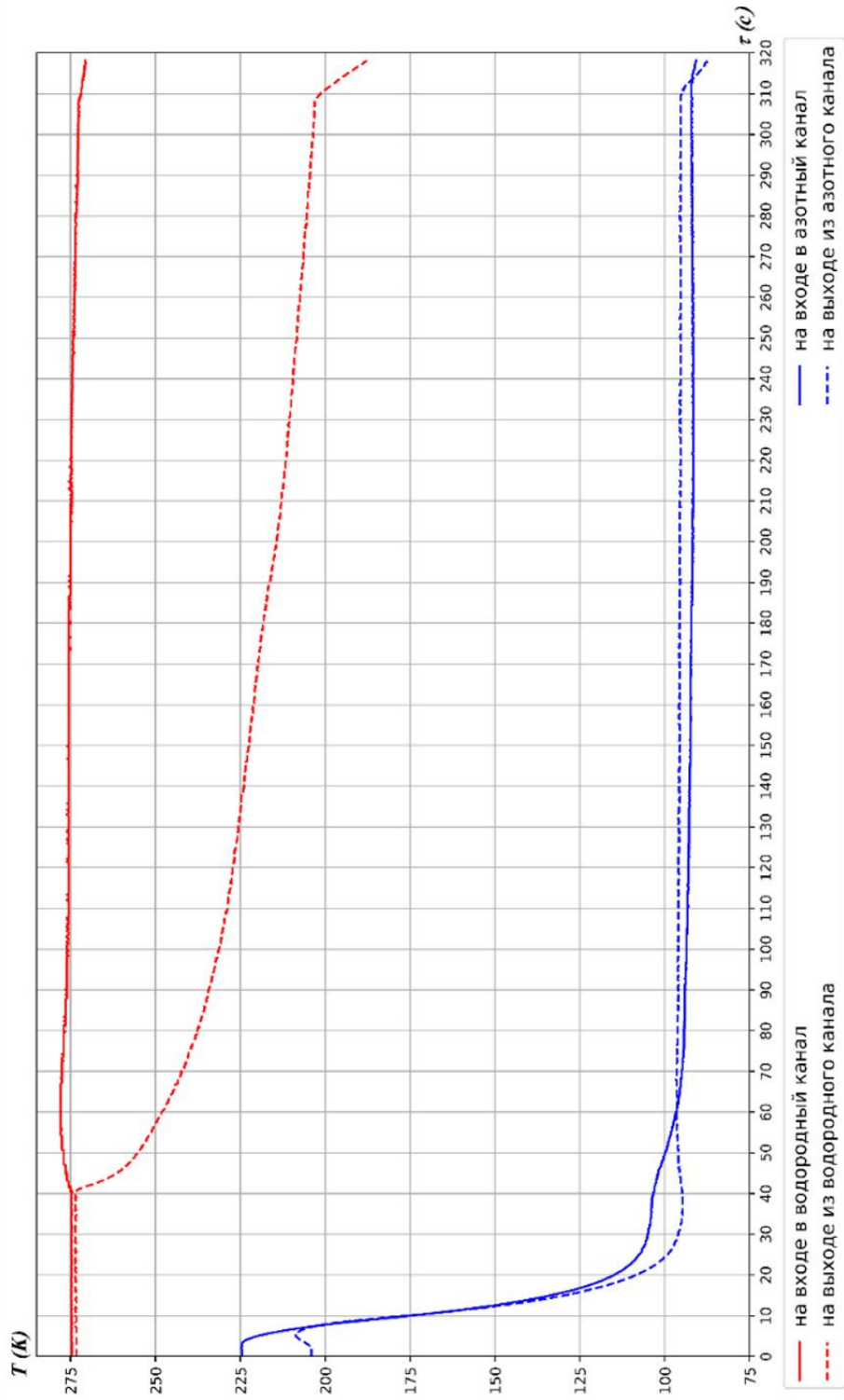


Рис. 4. Изменение температур T азота и водорода по времени τ при испытании ТА АВТ-10

Fig. 4. The change in the temperature T of nitrogen and hydrogen during the time τ

падении температуры водорода на выходе из ТА характеризует отсутствие кипения и газификации жидкого азота в канале ТА АВТ-10, что согласуется с наблюдениями за ТА во время испытаний.

Расчетная степень охлаждения ТА АВТ-10 составляет 0,502, полученная во время испытаний — 0,403.

Заключение

Большое внимание в мире уделяется использованию водорода как топлива, что требует создания совершенных топливных систем для средств передвижения на земле, в воздухе и в космосе.

Актуальной задачей является заправка водородных баллонов для различных средств передвижения, что обусловлено необходимостью снижения температуры заправляемого водорода. Использование жидкого азота для охлаждения газообразного водорода высокого давления и нормальной температуры позволило рассчитать в стационарной постановке, спроектировать и испытать теплообменный аппарат АВТ-10 с расходом охлаждаемого водорода 0,01 кг/с в нестационарных условиях, имитирующих реальные условия заправки водорода в баллоны.

Выполненное численное решение модели сопряженной задачи нестационарного теплообмена в трактах АВТ-10 позволило сделать вывод о времени выхода АВТ-10 на квазистационарный режим.

Полученные результаты создают основу для перспективных экспериментально-теоретических исследований задач оптимальной заправки водородных баллонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баррон Р. Ф. Криогенные системы / Р. Ф. Баррон. М.: Энергоатомиздат, 1989. 408 с.
2. Гуров В. И. Не только самый легкий газ / В. И. Гуров // Двигатель. 2014. № 2. С. 18-19.
3. Гуров В. И. Проблемы заправки водородных баллонов / В. И. Гуров, О. Д. Селиванов, С. В. Харьковский // Энергия: экономика, техника, экология. 2016. № 2. С. 24-29.
4. Лыков А. В. Теплообмен. Справочник / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1978. 480 с.
5. Малов Ю. И. Математическое моделирование процесса нестационарной теплопроводности в цилиндрическом тепловыделяющем элементе / Ю. И. Малов, Т. А. Нужненко // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2003. № 2. С. 20-27.
6. Прохоренков А. М. Моделирование процессов теплообмена, протекающих в пластинчатых теплообменных аппаратах / А. М. Прохоренков // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2014. Том 17. № 1. С. 92-101.
7. Фотография процесса заправки автомобиля Toyota Mirai. URL: <https://img.drive.ru/i/0/5660465895a656be090000b7.jpg>
8. Canadian Fuel Cell Commercialization Roadmap. URL: [http://www.chfca.ca/media/FC%20Comercialization%20Roadmap%20EN%202008\(1\).pdf](http://www.chfca.ca/media/FC%20Comercialization%20Roadmap%20EN%202008(1).pdf) (дата обращения: 17.05.2018).

9. German Hydrogen and Fuel Cell Association (DWV). URL: <https://www.dwv-info.de> (дата обращения: 17.05.2018).
10. Hydrogen and Fuel Cells: A Vision of Our Future. URL: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hydrogen-report_en.pdf (дата обращения: 17.05.2018).
11. International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy. URL: <https://www.iphe.net> (дата обращения: 17.05.2018).
12. Japan's National Hydrogen Program. URL: <http://www.ena.or.jp/WE-NET> (дата обращения: 17.05.2018).
13. National Hydrogen Study. URL: http://www.industry.gov.au/Energy/Documents/national_hydro_study.pdf (дата обращения: 17.05.2018).
14. Partnership for Advancing Transition to Hydrogen. URL: <http://www.hpath.org> (дата обращения 17.05.2018).
15. Pressure Vessel Tank Types. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/pressure-vessel-tank-types> (дата обращения: 17.05.2018).
16. The Hydrogen and Fuel Cells Program. URL: <https://www.hydrogen.energy.gov> (дата обращения: 17.05.2018).

Valeriy I. GUROV¹

Vadim Yu. ALEKSANDROV²

Dmitriy A. SKIBIN³

Dmitriy N. KUZMICHEV⁴

UDC 621.6.054

POSSIBILITIES FOR THE WIDESPREAD DEVELOPMENT OF HYDROGEN IN FUEL SYSTEMS

¹ Dr. Sci. (Tech.), Central Institute of Aviation Motors (Moscow)
gurov@ciam.ru

² Cand. Sci. (Tech.), Central Institute of Aviation Motors (Moscow)
aleksandrov@ciam.ru

³ Engineer, Central Institute of Aviation Motors (Moscow)
sda@ciam.ru

⁴ Engineer, Central Institute of Aviation Motors (Moscow)
kuzmichev@rtc.ciam.ru

Abstract

This article presents a brief review of the integrated approach to the development of hydrogen fuel in various fuel systems. The authors disclose the notion of optimality of the fuel system and explain the necessity of forming a common ground infrastructure for hydrogen fuel supply of ground and air transport with the use of composite cylinders of the same type and pressure level (up to 70 MPa). Necessity to cool hydrogen gas, which is being pumped into a high-pressure balloon, is shown. Calculation of the nitrogen-hydrogen heat exchanger according to the traditional method in a stationary setting is carried out. A non-stationary mathematical model of the heat state of a heat exchanger is given. Calculation and experimental results of tests of a heat exchanger for cooling hydrogen gas with liquid nitrogen are presented. The estimation of the received results is presented.

Citation: Gurov V. I., Aleksandrov V. Yu., Skibin D. A., Kuzmichev D. N. 2018. "Possibilities for the Widespread Development of Hydrogen in Fuel Systems". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 4, no 3, pp. 8-22.
DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-8-22

Keywords

Fuel system, hydrogen, hydrogen-nitrogen heat exchanger, computation, experiment, assessment.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-8-22

REFERENCES

1. Barron R. F. 1989. Kriogennyye sistemy [Cryogenic Systems]. Energoatomizdat.
2. Gurov V. I. 2014. "Ne tol'ko samyy legkiy gaz" [Not Just the Lightest Gas]. Dvigatel', no 2, pp. 18-19.
3. Gurov V. I., Selivanov O. D., Kharkovskiy S. V. 2016. "Problemy zapravki vodorodnykh ballonov" [The Problems of Refueling Hydrogen Balloons]. Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya, no 2, pp. 24-29.
4. Lykov A. V. 1978. Teplomassoobmen. Spravochnik [Heat and Mass Transfer]. Energiya.
5. Malov Yu. I., Nuzhnenko T. A. 2003. "Matematicheskoe modelirovanie protsessa nestatsionarnoy teploprovodnosti v tsilindricheskom teplovydelyayushchem elemente" [Mathematical Modelling of the Process of Unsteady Heat Conduction in a Cylindrical Heat Emitting Element]. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Natural Sciences, no 2.
6. Prokhorenkov A. M. 2014. "Modelirovanie protsessov teploobmena, protekayushchikh v plastinchatyykh teploobmennyykh apparatakh" [Modelling Processes of Heat Exchange in Plate Heat Exchange Apparatus]. Vestnik of Murmansk State Technical University, no 1.
7. Fotografiya protsessa zapravki avtomobilya Toyota Mirai [Photo of Toyota Mirai Refueling Process]. <https://img.drive.ru/i/0/5660465895a656be090000b7.jpg>
8. Canadian Fuel Cell Commercialization Roadmap. Accessed on 17 May 2018. [http://www.chfca.ca/media/FC%20Comercialization%20Roadmap%20EN%202008\(1\).pdf](http://www.chfca.ca/media/FC%20Comercialization%20Roadmap%20EN%202008(1).pdf)
9. German Hydrogen and Fuel Cell Association (DWV). Accessed on 17 May 2018. <https://www.dwv-info.de>
10. Hydrogen and Fuel Cells: A Vision of Our Future. Accessed on 17 May 2018. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hydrogen-report_en.pdf
11. International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy. Accessed on 17 May 2018. <https://www.iphe.net>
12. Japan's National Hydrogen Program. Accessed on 17 May 2018. <http://www.ena.or.jp/WE-NET>
13. National Hydrogen. Accessed on 17 May 2018. http://www.industry.gov.au/Energy/Documents/national_hydro_study.pdf
14. Partnership for Advancing Transition to Hydrogen. Accessed on 17 May 2018. <http://www.hpath.org/>
15. Pressure Vessel Tank Types. Accessed on 17 May 2018. <https://www.compositesworld.com/articles/pressure-vessel-tank-types>
16. The Hydrogen and Fuel Cells Program. Accessed on 17 May 2018. <https://www.hydrogen.energy.gov>