

УДК 621.56

Интенсификация процесса заправки металлокомпозитных баллонов водородом высокого давления за счет предварительного охлаждения

Бирюков Семен Дмитриевич(*)

bird968@mail.ru

Смородин Анатолий Иванович

smorodin38@rambler.ru

Ситников Павел Романович

sitnikovpr@bmstu.ru

SPIN-код: 4165-8154

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Газообразный водород высокого давления применяется в качестве энергоносителя для транспортных средств, работающих на топливных элементах. В связи с нагревом водорода при заправке необходимо его предварительное охлаждение до $-20\ldots-40$ °С. Это обеспечивает «быструю заправку», что позволяет проводить ее за 5–10 минут. Для реализации идеи необходимо изучить процессы, происходящие в металлокомпозитном баллоне при его заправке водородом, рассчитать и разработать эффективную технологию обеспечивающую минимизацию капитальных затрат и удельного энергопотребления, с сохранением высокой скорости заправки. Целью работы является разработка эффективной технологии заправки, обеспечивающую минимизацию капитальных затрат и удельного энергопотребления, с сохранением высокой скорости заправки на основе численного моделирования.

Ключевые слова: нагрев водорода, быстрая заправка, металлокомпозитный баллон, предварительное охлаждения, оптимизация, энергоэффективность

Intensification of the process of filling metal composite cylinders with high-pressure hydrogen due to pre-cooling

Biryukov Semen Dmitrievich(*)

bird968@mail.ru

Smorodin Anatoly Ivanovich

smorodin38@rambler.ru

Sitnikov Pavel Romanovich

sitnikovpr@bmstu.ru

SPIN-code: 4165-8154

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. High-pressure hydrogen gas is used as an energy carrier for fuel cell vehicles. Due to the heating of hydrogen during refueling, it must be pre-cooled to $-20\ldots-40$ °C. This provides a “fast refueling”, which allows it to be carried out in 5–10 minutes. To implement the idea, it is necessary to study the processes occurring in a metal composite cylinder when refueling with hydrogen, calculate and develop an effective technology that minimizes capital costs and specific energy consumption while maintaining a high refueling rate. The aim of the work is to develop an efficient refueling technology that minimizes capital costs and specific energy consumption while maintaining a high refueling rate based on numerical modeling.

Keywords: *hydrogen heating, fast refueling, metal composite cylinder, pre-cooling, optimization, energy efficiency*

Введение. К транспортным средствам, работающим на водородных топливных элементах, предъявляются требования по времени заправки, например для легковых автомобилей время заправки не должно превышать более 3 минут. Для заправки легкового автомобиля водородом в количестве 5–7 кг массовый расход водорода должен составлять 60 г/с. При заправке происходит нагрев водорода и повышение температуры композитного баллона, которая может превышать 100 °С при массовом расходе водорода около 6 г/с. Согласно требованиям безопасности SAE J2601 и ISO 15869 максимальная температура внутри композитного баллона при его заправке должна быть не более 85 °С. Для недопущения перегрева композитного баллона при обеспечении необходимой производительности заправки необходимо изучить и смоделировать процесс заправки водорода в металлокомпозитный баллон, рассчитать и спроектировать эффективную холодильную машину.

Водородная заправочная станция включает систему хранения водорода, каскадную холодильную машину и раздаточную колонку (рис. 1).

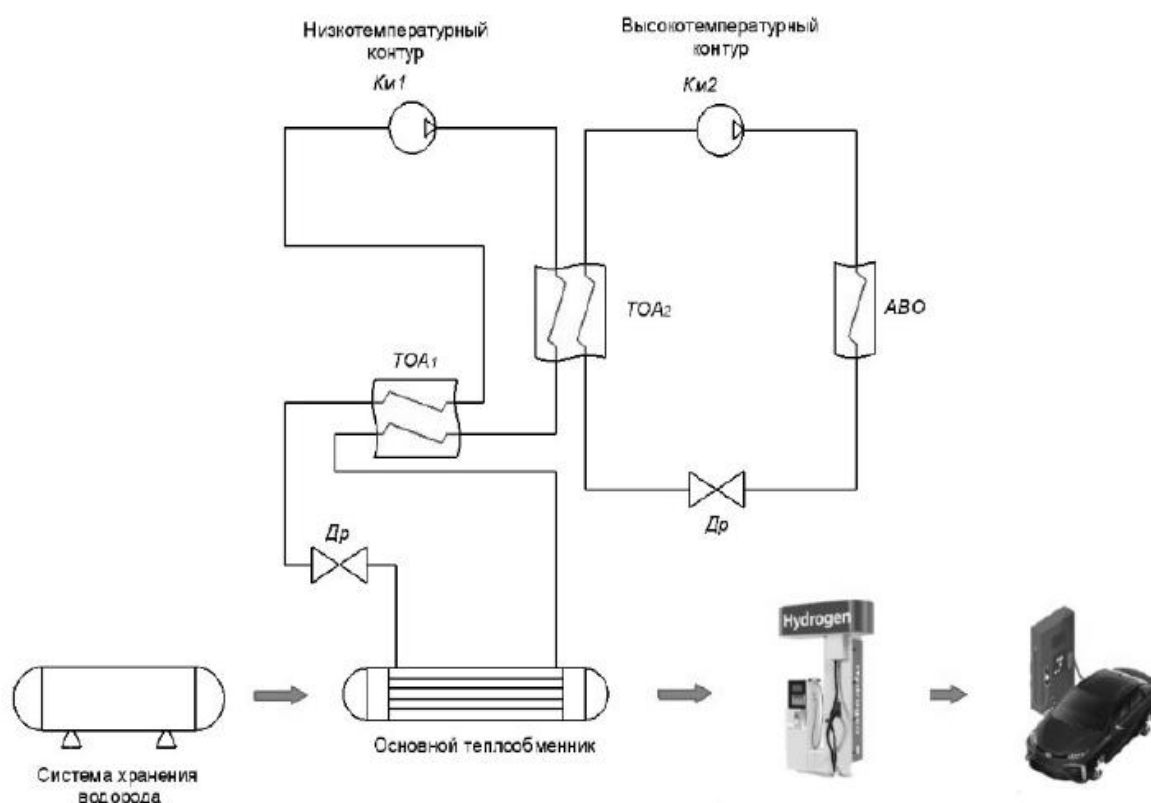


Рис. 1. Принципиальная схема водородной заправочной станции с предварительным охлаждением

Поскольку для композитных материалов в намотке водородных баллонов характерно накопление усталостных напряжений из-за высокой температуры

внутри баллона и отслаивание связующих компонентов композитной намотки [1, 2]. Зависимость срока службы от числа циклов заправки показана на рис. 2. Срок службы определяется испытанием гидравлического цикла под давлением, при котором предполагается 100 %-ное заполнение [SOC 100 % (State of charge)] [3].

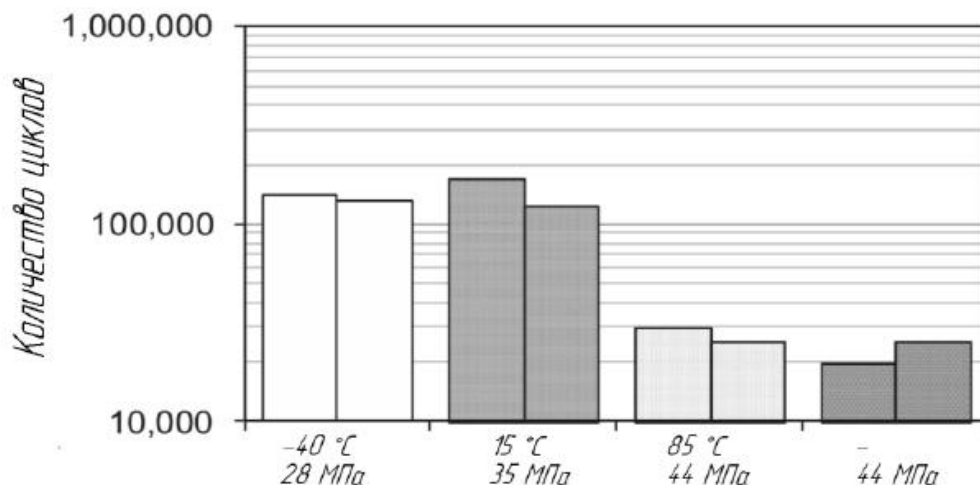


Рис. 2. Срок службы баллона в зависимости от температуры при циклических испытаниях

Существуют три основные причины приводящие к повышению температуры водорода в процессе заправки:

- водород имеет отрицательный эффект Джоуля — Томсона, и при температурах выше температуры инверсии нагревается при расширении;

- переход кинетической энергии водорода, движущегося на большой скорости в локальное повышение температуры лайнера и внутренних слоев во время процесса заправки;

- сжатие газа внутри баллона за счет подачи газа более высокого давления с заправочной станции. Это сжатие продолжается на протяжении всего процесса заправки, и соответствующее повышение температуры называется теплотой сжатия. Сравнение величин этих явлений показывает, что эффект Джоуля — Томсона оказывает незначительное влияние на общее повышение температуры, если учитывать термодинамику всего процесса.

Теоретический анализ повышения температуры. В процессе быстрой заправки, если пренебречь передачей тепла в окружающую среду, на основе уравнения реального газа и закона сохранения массы и энергии, конечная температура заправки описывается теоретической формулой (1):

$$T_2 = \frac{\lambda \mu T_1 (T_1 + \alpha_1 P_1) - \alpha_1 (\lambda P_1 T_1 - T_1 P_1)}{T_1 + \alpha_1 P_1 + \frac{\alpha_1 T_1 P_1 - T_1 P_1}{P_2}}, \quad (1)$$

где T_2 и T_1 — конечная и начальная температуры водорода в баллоне, К; P_2 и P_1 — конечное и начальное давление водорода в баллоне, Па; α_1 — постоянная сжатия реального газа принята $1,9155 \cdot 10^{-6}$, К/Па.

На основании данных NIST (National Institute of Standards and Technology) [4] λ и μ были приняты 1,38 и 0,98 соответственно.

В исследовании [5] приняты следующие допущения:

- в начале заправки температура водорода в стационарном хранилище и заправляемом баллоне равна температуре окружающей среды;
- у внешней стенки баллона возникает естественная конвекция, а коэффициент конвективной теплопередачи задается постоянным;
- массовый расход остается неизменным.

На основе CFD-моделирования и экспериментов заполнения 150 литрового баллона водородом Lei Zhao получена эмпирическая зависимость (2), описывающая зависимость конечной температуры газа внутри баллона [6].

$$T_2 = \left(1.01 - 1.52e^{\left(\frac{-P_2}{8.44}\right)}\right) \cdot (-6.81 \cdot 0.9^G + 0.3T_1 - 2.2P_1 + 68) + T_1, \quad (2)$$

где T_2 и T_1 — конечная и начальная температуры водорода в баллоне, К; P_2 и P_1 — конечное и начальное давление водорода в баллоне, МПа; G — массовый расход, г/с.

На рис. 3 представлены зависимости роста температуры в водородном баллоне при заправке при адиабатном наполнении и в случае эмпирического исследования.

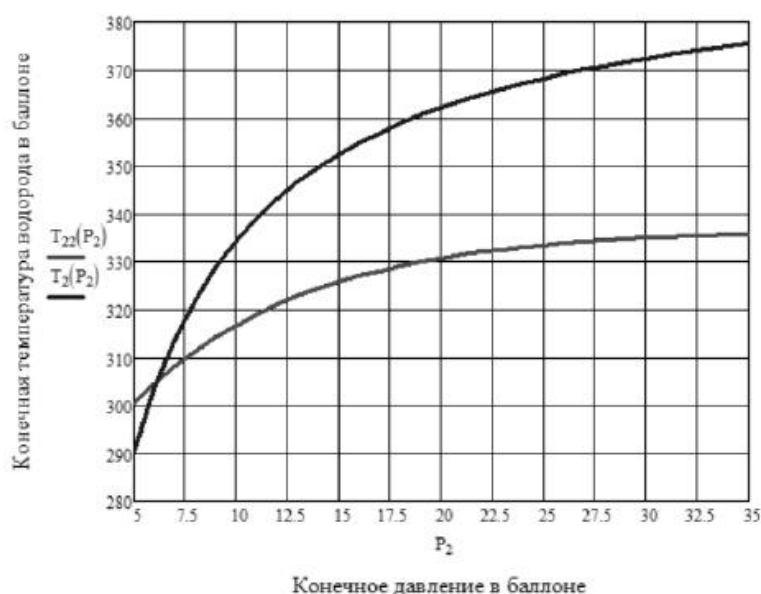


Рис. 3. Сравнение адиабатного процесса с реальным:
синий — теоретический, красный — эмпирический

Материалы и методы. Эмпирические зависимости, изложенные в мировой литературе, справедливы для баллонов определенной геометрии и объема, необходимо на основе полученных результатов смоделировать процесс заправки БВД водородом в программном комплексе для получения наглядных результатов по росту температуры внутри баллона и распределению температуры во внутренних слоях стенки в зависимости от:

- массового расхода;
- интенсивности конвективного теплообмена между внешней стенкой сосуда и окружающей средой;
- начальной температуры газа перед подачей в баллон.

В процессе CFD-моделирования построена осесимметричная 2D-модель металлокомпозитного баллона объемом 150 литров, представленная на рис. 4. Геометрия имеет четыре тела, соответствующие материалам — водород, алюминиевый лэйнер, карбоновое волокно, стекловолокно.

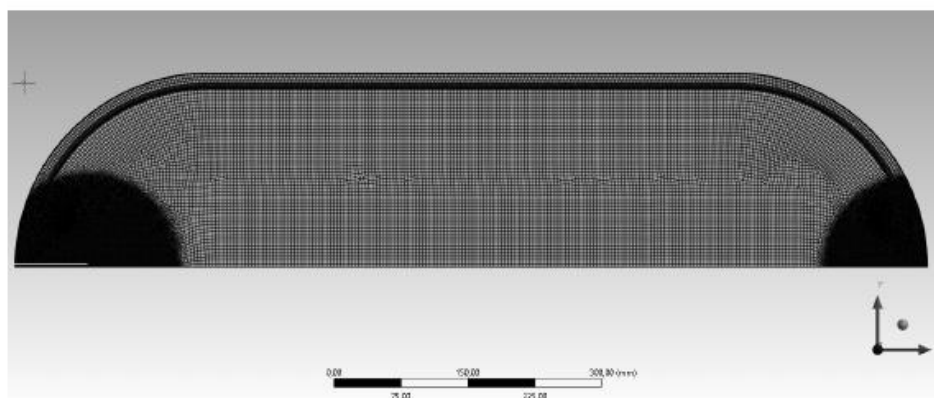


Рис. 4. Вид и расчетная сетка модели

В ходе решения были приняты следующие граничные и начальные условия:

- температура внутри сосуда равна температуре окружающей среды (293 К);
- начальное давление внутри сосуда 20 бар;
- массовый расход водорода 10–40 г/с;
- коэффициент конвективного теплообмена между внешней стенкой сосуда и ОС = 10 Вт/(м²·К);
- температура водорода на входе равна температуре ОС (293 К);
- сила тяжести не учитывается;
- заправка продолжается до достижения в баллоне давления в 35 МПа.

В настройках решателя выбрана модель турбулентности $k-\omega$.

Для определения свойств газа используется уравнение состояния Ридли-ха — Квонга (3):

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{\sqrt{TV_m}(V_m - b)}. \quad (3)$$

Результаты. В ходе моделирования и были получены зависимости роста температуры газа внутри баллона при заправке (рис. 5). Красные линии — результаты, полученные в ходе моделирования в сравнении с результатами моделирования и экспериментального исследования заправки 150 литрового баллона [5].

Обсуждение полученных результатов. Расхождение результатов при скорости заправки 10 г/с может свидетельствовать о некорректной модели турбулентности для столь малой скорости потока.

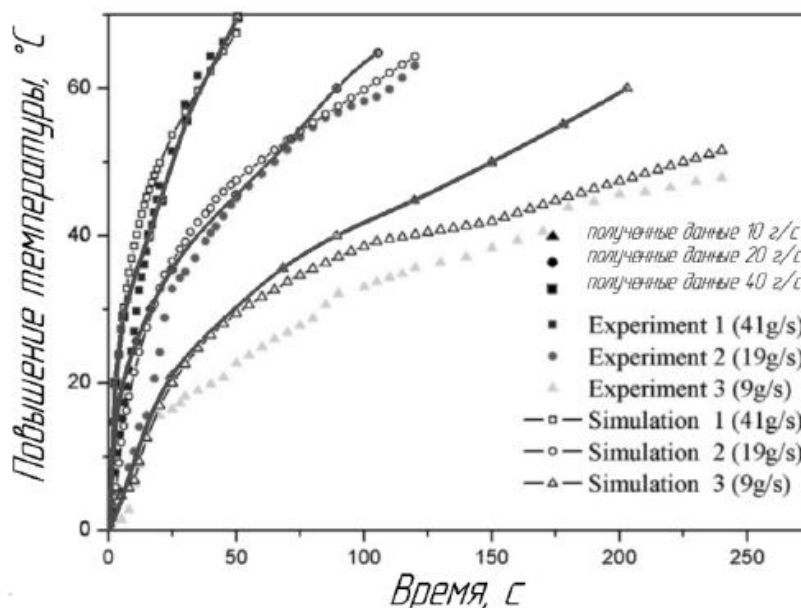


Рис. 5. Зависимости роста температуры газа внутри баллона при заправке

Заключение. В статье предлагается двумерная осесимметричная модель для прогнозирования роста температуры внутри баллона для хранения газообразного водорода под давлением 35 МПа при скорости заправки 10, 20 и 40 г/с. Можно сделать следующие выводы:

- максимальное повышение температуры композитного материала в баллонах для хранения газообразного водорода наблюдаться в торцевой части цилиндра;
- результаты верифицированы с литературными данными и экспериментами;
- при массовом расходе 40 г/с водород нагревается выше 85 °C, что доказывает необходимость использования предварительного охлаждения.

Список источников

- [1] Глобальные технические правила № 13, касающиеся транспортных средств, работающих на водороде и топливных элементах. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29r-1998agr-rules/ece-trans-180-a13r.pdf> (дата обращения 13.07.2025).
- [2] Garrett K.W., Rosenberg H.M. The thermal conductivity of epoxy-resin/ powder composite materials. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 1974, vol. 7, art. no. 1247e58.
- [3] Tomioka J., Kiguchi K., Tamura Y., Mitsuishi H. Influence of pressure and temperature on the fatigue strength of Type-3 compressed-hydrogen tanks FC/EV Research Division. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, vol. 37 (22), pp. 17639–17644. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.045>
- [4] *NIST Chemistry WebBook*. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/> (accessed 13.07.2025).
- [5] Zhao L., Liu Y.L., Yang J., Zhao Y.Z., Zheng J.Y., Bie H.Y. Numerical simulation of temperature rise within hydrogen vehicle cylinder. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, art. no. 8092e100.
- [6] Liu Y.L., Zhao Y.Z., Zhao L., Li X., Chen H.G., Zhang L.F. Experimental studies on temperature rise within a hydrogen cylinder during refueling. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, art. no. 2627e32. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.04.042>