Оригинальное исследование/ Original Article

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАПРАВОЧНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КРИО-КОМПРИМИРОВАННЫМ ВОДОРОДОМ ТЯЖЕЛОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ КАРЬЕРА

АВТОРЫ

Кротов А.С., Нестеров А.А., Егорова А.И., Климова В.С., Мазякин М.С., Щербаков И.В., Сизов Е.А., Шелякин И.Д.

ОРГАНИЗАЦИИ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

***Обоснование*:** В условиях растущей потребности в экологически чистых и эффективных источниках энергии, водород показывает себя как энергоноситель с высоким показателем плотности энергии и, фактически, нулевым выбросом CO_2 в атмосферу. Для стабильно развивающейся отрасли транспорта тяжелой мобильности на водородном топливе важной является проблема безопасного и высокоплотного хранения водорода.

***Цель*:** Теоретический анализ возможности применения технологии быстрой заправки крио-компримированным водородом карьерной техники.

Методы: Проведено CFD-моделирование теплопритоков к сменному картриджу с крио-компримированным водородом. Смоделирован цикл компримирования газообразного водорода с последующим охлаждением до 85К в программной среде ASPEN HYSYS.

***Результаты*:** Оценены удельные затраты цикла, сделаны выводы о энергетической эффективности такого способа хранения относительно известных и уже испытанных способов хранения водородного топлива в том числе на борту транспортных средств.

***Заключение*:** В ходе текущего исследования был сделан вывод о возможном перспективном использовании крио-компримированной заправки карьерной техники с использованием технологии сменных картриджей. На основе результатов моделирования можно сделать вывод о возможности реализации данного решения и его безопасной эксплуатации. Также в ходе исследования получены теоретические значения SEC для данной технологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Водородная энергетика, крио-компримированный водород, быстрая заправка, карьерная техника, заправочная инфраструктура карьера, CFD-моделирование

Рукопись получена: 21.02.2025

Рукопись одобрена: 14.04.2025

Опубликована онлайн:

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Кротов А.С., Нестеров А.А., Егорова А.И., Климова В.С., Мазякин М.С., Щербаков И.В., Сизов Е.А., Шелякин И.Д. Моделирование заправочной инфракструктуры крио-компримированным водородом тяжелой техники в условиях карьера // Холодильная техника. 2024. Т. 113, № 3. С. XX–XX. DOI: https://doi.org/10.17816/RF660140

Article in Press

Оригинальное исследование/ Original Article

Article in Press

Оригинальное исследование/ Original Article

TITLE

MODELING OF FUELING INFRASTRUCTURE FOR CRYO-COMPRESSED HYDROGEN FOR HEAVY MACHINERY UNDER QUARRY CONDITIONS

AUTHORS

Krotov A., Nesterov A., Egorova A., Klimova V., Mazyakin M., Shcherbakov I., Sizov E., Shelyakin I.

AFFILIATION

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: In the context of the growing demand for environmentally friendly and efficient energy sources, hydrogen has emerged as a carrier with a high energy density and, essentially, zero CO_2 emissions into the atmosphere. For the steadily developing sector of heavy mobility powered by hydrogen fuel, the issue of safe and high-density hydrogen storage is of significant importance.

AIMS: Theoretical analysis of the feasibility of applying rapid refueling technology with cryo-compressed hydrogen for quarry equipment.

MATERIALS AND METHODS: CFD modeling of heat influx to the changeable cartridge with cryo-compressed hydrogen has been conducted. The cycle of compressing gaseous hydrogen followed by cooling to 85K was simulated in the ASPEN HYSYS software environment

RESULTS: The specific costs of the cycle have been evaluated, and conclusions have been drawn regarding the energy efficiency of this storage method in relation to known and already tested methods of hydrogen fuel storage, including those used on board vehicles.

CONCLUSIONS: In the course of the current study, a conclusion was reached regarding the potential promising use of cryo-compressed refueling for quarry equipment utilizing interchangeable cartridge technology. Based on the simulation results, it can be concluded that this solution can be implemented and operated safely. Additionally, theoretical values of Specific Energy Consumption (SEC) for this technology have been obtained during the research

KEYWORDS

Hydrogen energy, cryo-compressed hydrogen, fast refueling, mining machinery, refueling infrastructure for mines, CFD modeling

Received: 21.02.2025

Accepted: 14.04.2025

Published online:

TO CITE THIS ARTICLE:

Krotov AS, Nesterov AA, Egorova AI, Klimova VS, Mazyakin MS, Shcherbakov IV, Sizov EA, Shelyakin ID. Modeling of fueling infrastructure for cryo-compressed hydrogen for heavy machinery under quarry conditions authors. *Refrigeration Technology*. 2024;113(3): XX–XX. DOI: https://doi.org/10.17816/RF660140

Article in Press

ВВЕДЕНИЕ

Использование водорода как топлива для различных видов транспорта началось еще в середине 20 века [1]. Однако ввиду недостатка технологий и неспособности конкурировать с ископаемыми видами топлива массовое применение водорода как энергоносителя было невозможным. В последние годы интерес к альтернативным видам топлива увеличился из-за растущего дефицита ископаемых углеводородов и все более серьезных проблем с загрязнением окружающей среды. Например, в ноябре 2024 года в КНР был принят Закон об энергетике, по которому водород признан “чистым энергоресурсом” и включён в китайскую систему управления энергопотреблением [2].

Использование водорода в качестве средства декарбонизации дорожного транспорта также продолжает расширяться. Согласно статистике, рост внедрения водородных топливных элементов в большегрузные автомобили и автобусы постоянно растет. При этом Китай также занимает лидирующую позицию: рост числа водородного транспорта шёл там в два раза быстрее, чем в Соединенных Штатах, и более чем в три раза быстрее, чем в Европе. [3], Водород постепенно занимает свою топливную рыночную нишу в секторе тяжелой мобильности. Сюда же относятся и карьерные самосвалы. Так как популярность гибридного и электропривода карьерных самосвалов растет, использование водородных топливных ячеек может дать положительный экономический и логистический эффект при организации работы на карьере.

Высокая энергетическая плотность водорода в сочетании с надежностью транспорта на электроплатформе предсказуемо образуют потенциально экономически эффективный гибридный тандем в качестве силовой установки для сверхтяжелой промышленной техники. В 2022-2024 годах проведены пилотные испытания водородных гибридов практически у всех мировых производителей карьерной техники, включая KOMATSU, Liebherr, БелАЗ, XCMG и др. В это же время в РФ с 2022 года нарастает кризисное состояние в секторе тяжелой специальной мобильности, спровоцированное следующими факторами:

1. Уходом международных вендоров (Caterpillar, Komatsu, Liebherr);
2. Санкционными ограничениями на импорт машиностроительной продукции, включающей силовые установки и ЗИП;
3. Ростом стоимости топлива (за 10 лет ДТ подорожало на 58,6% [4]) и смазочных материалов;
4. Кадровым дефицитом, что в том числе провоцирует рост стоимости обслуживания ТС.

При этом наблюдается стабильный рост отечественного рынка горнодобывающей техники: происходит как запуск новых крупных проектов, так и расширение, и оптимизация существующих парков техники [5].

В этих условиях естественным вектором развития отечественной горнодобывающей отрасли является ориентация на восток, предполагающая развитие взаимодействия с китайскими производителями, а также замещение дизельных силовых агрегатов на электромобильность. Последнее идет в ногу с мировыми трендами: глобальный CAGR (среднегодовой прирост) рынка электромобильности уже превышает 16%, во многом благодаря тяжелой и сверхтяжелой технике [6].

В этих условиях разработка водородного гибрида для отечественной сверхтяжелой техники является актуальной задачей. Стоит учитывать, что общая экономическая эффективность работы такого гибрида прямо связана со стоимостью топлива и временем простоя (в том числе длительностью заправки). Обе эти проблемы могут быть эффективно решены за счет сбалансированной технологической водородной инфраструктурной цепи. Баланс должен выражаться в эффективном использовании энергетической плотности водорода (хранение, транспортировка) совместно с инфраструктурными решениями для сокращения простоя техники при заправке и обслуживании. Поэтому, для разработки водородного гибрида важно выбрать такой способ хранения и транспортировки топлива, который бы обеспечил вышеперечисленные требования.

Article in Press

На сегодняшний день существует множество способов хранения водорода, самыми универсальными из которых являются газообразный водород под давлением, широко применяемый во всех сферах, но теряющий экономическую привлекательность в случае масштабного потребления и больших логистических плечей при транспортировке, и сжиженный водород, фокусным применением которого являются крупные потребители, расположенные далеко от точки производства.

Жидкий водород (LH_2) обладает высокой плотностью (70,85 кг/м3 при 101,325 кПа) и низким давлением при хранении. Однако удельные энергетические затраты (SEC - Specific Energy Consumption) на ожижение водорода относительно велики. Цикл Клода с двумя давлениями на водороде (и с азотным предохлаждением) является основной конфигурацией современных крупных ожижителей водорода (оценочный SEC 10,85 кВтч/кг [7]). Заявленная фактическая SEC ожижителей водорода компании Linde составляет 11,9–13,6 кВтч/кг [3]. Кроме того, капитальные затраты на организацию производства жидкого водорода крайне высоки: требуются водородные детандеры, компактные пластинчато-ребристые теплообменники, реакторы орто-пара конверсии водорода и дорогостоящая изоляция.

Сжатый газообразный водород (GH_2) — это зрелая технология хранения, которая уже повсеместно используется в водородном транспорте. Плотность водорода 11,11-39,05 кг/м3 (300 К) может быть достигнута при 15-70 МПа в баллонах II или III типа. Однако плотность газообразного водорода все еще намного ниже, чем у жидкого. Высокое давление при хранении требует повышенных мер безопасности [7].

Крио-компримированный водород (CcH_2) — перспективный метод хранения водорода, главным достоинством которого является высокая плотность (выше 70,0 кг/м3) при низких энергозатратах на производство [8].

Существует способ получения крио-компримированного водорода из криогенной жидкости [9]. Суть метода заключается в адиабатном сжатии жидкого водорода, находящемся в состоянии насыщения при около атмосферном давлении, с помощью криогенного насоса. После сжатия жидкость переходит в сверхкритическое состояние и с температурой порядка 20-30 К поступает в криогенную емкость. Данный способ хранения обеспечивает высокую плотность хранения топлива, но требует предварительного ожижения водорода. Кроме того, при организации заправочной инфраструктуры требуется обеспечение доставки либо производства жидкого водорода непосредственно на заправочной станции. Такой способ хранения и транспортировки выглядит перспективным для больших объемов потребления сверхтяжелой техникой. Однако экономический эффект за счет предварительного ожижения водорода и больших энергетических затрат на этот процесс может быть низким.

Авторы статьи предлагают рассмотреть крио-компримированный водород для сферы карьерной техники по технологии, в которой компримированный газообразный водород будет охлаждаться до криогенных температур и дожиматься до исходного давления (опционально). Благодаря сочетанию компрессии и криогенного охлаждения, возможно получить широкий диапазон плотностей газа и его температур. Орто-пара конверсию проводить в таком случае не требуется. Состояние водорода не влияет на долгосрочное хранение.

Целью данной статьи является анализ возможности применения крио-компримированного водорода, произведенного из газообразного сырья, как энергоносителя и обоснование его использования в сфере карьерной техники в условиях быстрой заправки.

Article in Press

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ОГРАНИЧЕНИЙ ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Карьерная техника, в частности карьерные самосвалы грузоподъемностью от 130 тонн, работают в специфических условиях (открытые горные работы), а также имеют четкие технико-экономические метрики, подлежащие калькуляции и отслеживанию. Специфика применения техники в РФ накладывает ряд ограничений и представляет требования к организации топливозаправочной инфраструктуры в целом, и водородной инфраструктуры - в частности, на карьере.

Из анализа рынка были определены инфраструктурные условия, которые могут быть поставлены со стороны потенциального Заказчика техники (далее - внешние ограничения), и внутренние ограничения, обусловленные конфигурацией ТС (транспортного средства), наличием на рынке оборудования и т.д.

В таблице 1 собраны внешние граничные условия для инфраструктуры, причины их возникновения и следствия из них, таблица 2 - аналогично для внутренних.

Таблица 1. Внешние Ограничения

Table 1. External Constraints

№	Описание ограничения	Причина возникновения	Следствие из ГУ
1	ТСО Н2 с интересом производителя топлива - не более 30 Р/нм3	Конкуренция с ДТ (дизельное топливо)	Максимальное повышение плотности Н2 при минимальном CAPEX и OPEX
2	Время заправки около 5 мин	Конкуренция с ДТ	Технология сменных хранилищ
3	Время работы на полном баке - 11 часов	Заправка ТС должна производиться между сменами. Длительность 1 смены - 11 часов.	Максимальное повышение плотности Н2 на борту
4	Самосвал не должен покидать контур карьера	КС не покидают контур карьера для заправочных процедур, так как это ведет к большому перерасходу топлива и снижению эффективности работы единицы техники	Технология сменных хранилищ - перенос капитальной инфраструктуры, включающей наполнение хранилища, за пределы карьера
5	Организация мобильной заправки КС	В связи с высокой интенсивностью горных работ в РФ самосвалам может потребоваться мобильная дозаправка в любой части карьера	Технология сменных хранилищ, предполагающая доставку заполненного хранилища в любую точку карьера
6	Возможность полного опустошения топливного бака	Сервис ТС происходит в капитальных закрытых ангарах, поэтому не допускается остаточное давление в баках КС	Технология сменных хранилищ, позволяющая осуществлять сервис ТС отдельно от сервиса хранилища Н2

Article in Press

7	Модульность цепочки создания ценности топлива	Возможность организации транспортной услуги	Модульное решение по наполнению хранилищ и технология сменных хранилищ.

Таблица 2. Внутренние Ограничения
Table 2. Internal Constraints

№	Описание ограничения	Причина возникновения	Следствие из ГУ
1	Давление H_2 - не более 300 бар	Рыночные решения для масштабного компримирования H_2 - не выше 350 бар	Давление H_2 - 270 бар
2	Температура H_2 - не менее 80К	Промышленно достижимая температура	Температура H_2- 85 К
3	Хранилище на борту ТС без экранной/вакуумной изоляции	Минимизация CAPEX/OPEX, не требуется дополнительных сертификационных мероприятий	Применение сменного хранилища с ППУ изоляцией
4	Применение баллонов типа III для хранения H_2 на борту ТС	Для минимизации CAPEX решения	Сменное хранилище-картридж на базе баллонов типа III

Таким образом, исходя из вышеперечисленных причинно-следственных матриц ограничений предлагается организовать на карьере водородную инфраструктуру сменных хранилищ-картриджей на базе баллонов типа III, наполненных крио-компримированным водородом, для организации быстрой заправки карьерных самосвалов.

ОПИСАНИЕ ЗАПРАВОЧНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

При разработке топливозаправочной инфраструктуры были приняты во внимание зрелые технические решения в области H_2 инфраструктуры. Параметры $Cc H_2$, принятые в исследовании приведены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры $Cc H_2$
Table 3. Parameters of $Cc H_2$

T_{CcH2}, К	P_{CcH2}, МПа	ρ_{CcH2}, кг/м^3
85	27	53,806

Параметры выбраны, исходя из ограничений, приведенных в Таблицах 1 и 2.

Таким образом, инфраструктурная цепочка технологии быстрой заправки карьерных самосвалов, представленная на рис. 1, включает в себя компримирование произведенного на месте водорода до 300 бар, холодный блок (охлаждение до температуры 85 К), захолаживание и наполнение сменных хранилищ-картриджей, логистику картриджей на небольшом плече доставки (до 100 км) и инфраструктуру замены картриджей на карьере.

Article in Press

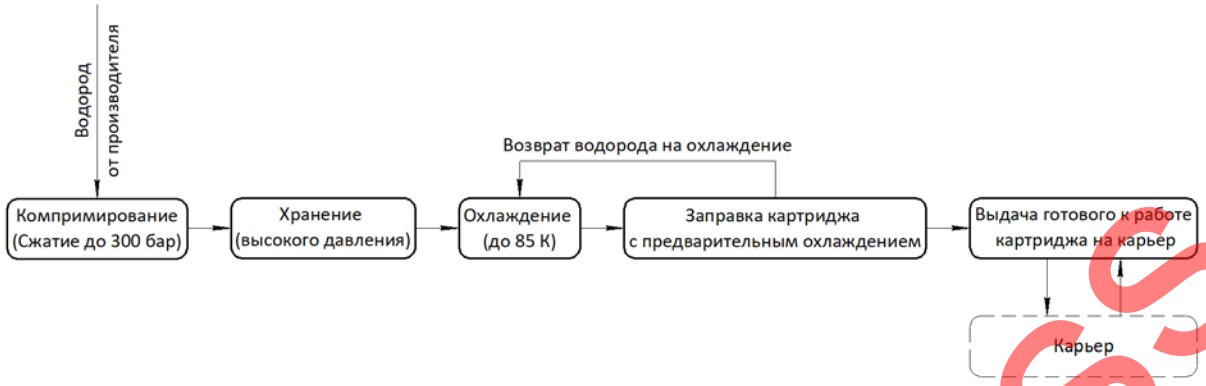

Рис.1. Инфраструктура решения
Fig. 1. Solution Infrastructure

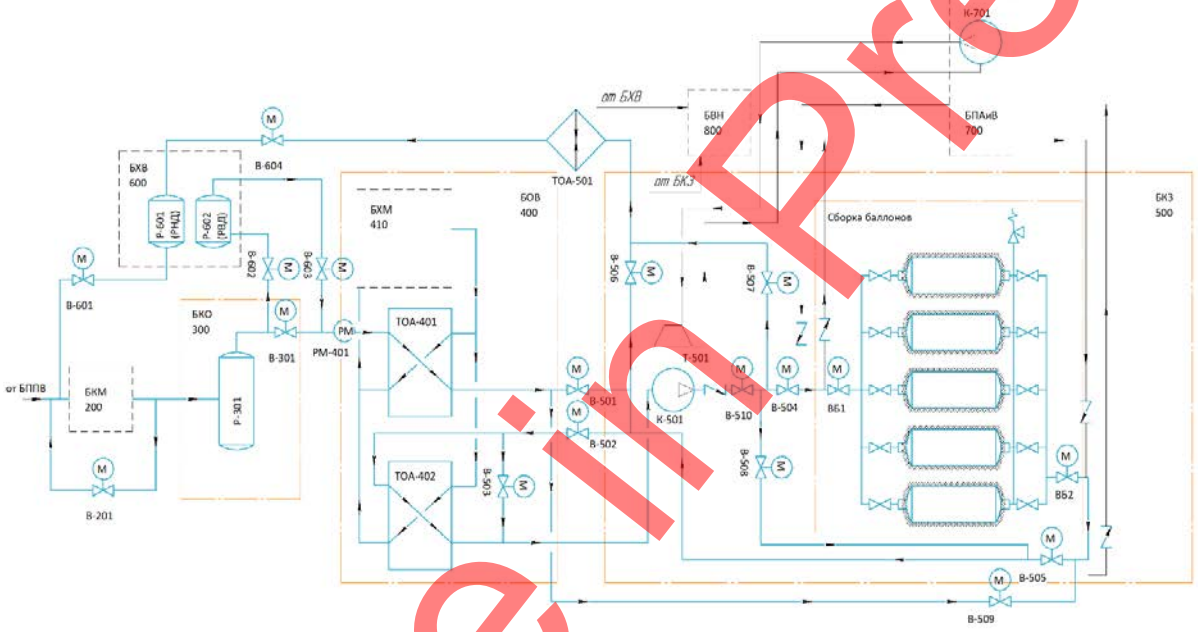

Рис.2. Схема установки криогенной заправки сжатым водородом
Fig. 2. Cryogenic hydrogen refueling system installation diagram

Таблица 4. Условные обозначения на схеме
Table 4. Legend for the diagram

Обозначение на схеме	Пояснение
БКМ(200)	Блок компримирования (сухие КМ/ВКМ)
БКО(300)	Блок комплексной очистки
БОВ(400)	Блок охлаждения водорода
БКЗ(500)	Блок криогенной заправки
БХВ(600)	Блок хранения водорода (ресивер НД, ресивер ВД)
БПАиВ(700)	Блок подготовки азота и воздуха
БВН(800)	Блок вакуумных насосов

Принципиальная схема стационарной заправочной станции крио-компримированным водородом представлена на рисунке 2.Условные обозначения для схемы содержатся в таблице 4.

Водород поступает от блока получения и подготовки водорода (при производстве непосредственно вблизи заправочной станции) в компрессорный блок (БКМ 200). Также

Article in Press

возможна подпитка в линию подачи водорода на всасывание из ресивера низкого давления Р-601 блока хранения водорода (БХВ 600). В ресивере низкого давления может храниться как накопленный в ходе технологического процесса водород, так и сырье доставленное с отдаленного места производства и предварительно очищенно до чистоты не ниже 99,99%. После сжатия с последующим охлаждением в концевом охладителе блока БКМ 200, водород высокого давления поступает в блок комплексной очистки БКО 300 (опционально адсорбционная очистка/осушкаа/маслоочистка). Ресивер Р-301 в составе БКО 300 служит буферным объёмом на время перестыковки хранилищ-картриджей и переключения арматуры блока криогенной заправки БКЗ 500. В случае длительной паузы в работе БКЗ 500, происходит закачка водорода в ресивер высокого давления Р-602. Он же впоследствии служит для подпитки в линию высокого давления.

Из блока очистки водород поступает в блок охлаждения водорода БОВ 400, в состав которого входит блок холодильной машины БХМ 410. Холодильная машина предназначена для охлаждения потока водорода в теплообменных аппаратах ТОА-401, ТОА-402 в режиме хладагент – водород. Для захолаживания водорода выбран азотный детандерный цикл с пропановым предварительным охлаждением. После охлаждения в теплообменном аппарате ТОА-401 производится заполнение контура БКЗ 500 охлажденным водородом высокого давления.

После набора в БКЗ 500 промежуточного давления газодувка К-501 (привод от турбины Т- 501), начинает прокачивать газ через контур БКЗ 500, продувка баллонов и их наполнение регулируется запорной арматурой. Водород циркулирует, охлаждаясь в теплообменнике ТОА-402. По мере охлаждения, давление в БКЗ 500 снижается, периодически осуществляется подпитка БКЗ 500 до промежуточного давления. После установления в БКЗ 500 проектной температуры при проектном давлении, криогенная заправка считается готовой к работе.

Происходит пристыковка картриджа с помощью БРС (быстроразъемное соединение). Безопасность в случае негерметичности обеспечивается сбросом водорода из контура БКЗ 500 и отключением подачи газа. При работе с теплым картриджем, требуется вакуумировать систему вакуумным насосом БВН 800. При работе с холодным картриджем (с остатками H_2) производится продувка участков БРС (азотом из БПАиВ 700).

Для заполнения картриджа холодным водородом газодувка К-501 прокачивает водород через него с возвратом через ТОА-402. По мере падения давления ниже промежуточного, осуществляется подпитка контура БКЗ 500.

При достижении внутри картриджа промежуточного давления и температуры – 85 К, контур БКЗ 500 переходит в режим работы «на байпас» (циркуляция отсутствует).

Предусмотрен и режим заправки без использования газодувки К-501.

В таком случае задействован ресивер низкого давления Р-601. Также в него может быть сброшено давление из контура БКЗ 500.

Полный список запорной и регулирующей арматуры приведен в таблице 5.

Таблица 5. Список арматуры в установке
Table 5. List of fittings in the installation

Элемент	Тип	Назначение
БКМ 200		
В-201	Вентиль регулирующий	Плавный пуск КМ, перепуск при простое заправки
БКО 300		
Р-301	Ресивер линейный	Буферная емкость для закачки компрессором

Article in Press

В-301	Вентиль запорный	Перекрытие потока в БОВ 400
БОВ 400		
БХМ 410	Машина холодильная (Азотный контур с пропановым ПО)	Охлаждение потока водорода высокого давления
РМ-401	Расходомер (кориолисовый)	Учет газа на входе в БКЗ 500
ТОА-401	Аппарат теплообменный (ВТОА)	Охлаждения потока водорода из БКМ 200
БКЗ 500		
ТОА-501	Аппарат теплообменный (нагреватель атмосферный/ электронагреватель/ водный нагреватель)	Отогрев водорода перед пуском в РНД
К-501	Газодувка (турбовентилятор криогенный/ РУТЗ)	Циркуляция газа в БКЗ 500
В-501	Вентиль запорно-регулирующий	Наполнение и подпитка БКЗ 500
В-502	Вентиль регулирующий	Регулирование температуры после ТОА-402
В-503	Вентиль регулирующий	Регулирование температуры после ТОА-402
В-504	Вентиль запорно-регулирующий	Отсечение портов картриджа, плавное заполнение баллонного блока
В-505	Вентиль запорно-регулирующий	Отсечение портов картриджа, плавное заполнение баллонного блока
В-506	Вентиль запорный	Сдув излишков водорода из БКЗ 500 в БХВ 600
В-507	Вентиль запорно-регулирующий	Сдув излишков водорода из БКЗ 500 в БХВ 600
В-508	Вентиль регулирующий	Байпас с картриджа
В-509	Вентиль запорно-регулирующий	Отсечение портов картриджа, плавное заполнение картриджа
В-510	Вентиль запорный	Отсечение контура газодувки К-501на финальном этапе заправки или при полной заправке через БКМ 200
Блок баллонный		
ВБ1	Вентиль запорный	Отсечение картриджа
ВБ2	Вентиль запорный	Отсечение картриджа
БХВ 600		
Р-601	Ресивер линейный	Сбор технологических сдувок чистого водорода

Article in Press

Р-602	Ресивер линейный (баллонные сборки)	Буферный объём для работы компрессора
В-601	Вентиль регулирующий	Подача водорода в БКМ 200 из Р-601
В-602	Вентиль регулирующий	Заполнение Р-602
В-603	Вентиль регулирующий	Подпитка линии высокого давления из БКМ 200
В-604	Вентиль регулирующий	Дросселирование водорода из сдувок перед Р-601
БПАиВ 700		Продувка контура, в частности БРС б картриджа, питание приводов арматуры, питание Т-501 при помощи компрессора К-701
БВН 800		Подготовка картриджа, узлов БХВ

Предложенная схема является цикличной, оснащена ресиверами и прочими элементами для обеспечения безопасности в случае остановки, однако картридж не рассчитан на резкое повышение давления, например вследствие теплопритоков. Необходимо подтвердить, что в данном сценарии заправочной инфраструктуры теплопритоки из окружающей среды к холодному картриджу при транспортировке не вызовут избыточного повышения давления, приводящего к разрушению оболочки баллонов типа III.

РАСЧЕТ ТЕПЛОПРИТОКОВ К СМЕННОМУ КАРТРИДЖУ

Крио-компримированный водород, предназначенный для использования в качестве топлива карьерных самосвалов грузоподъемностью 130 т., предлагается хранить и транспортировать в металло-композитных баллонах (тип III) объемом 210 литров, скомпонованных в картриджи по 12 штук (рис. 3). Один картридж вмещает 126 кг CcH_2 при температуре 85 К и давлении 25 МПа.

Технические параметры баллонов и с картриджа на их основе в данном исследовании приняты по данным компании Heifei Sinpower (КНР), параметры баллона 210 л. приведены в таблице 6 [10].

Article in Press

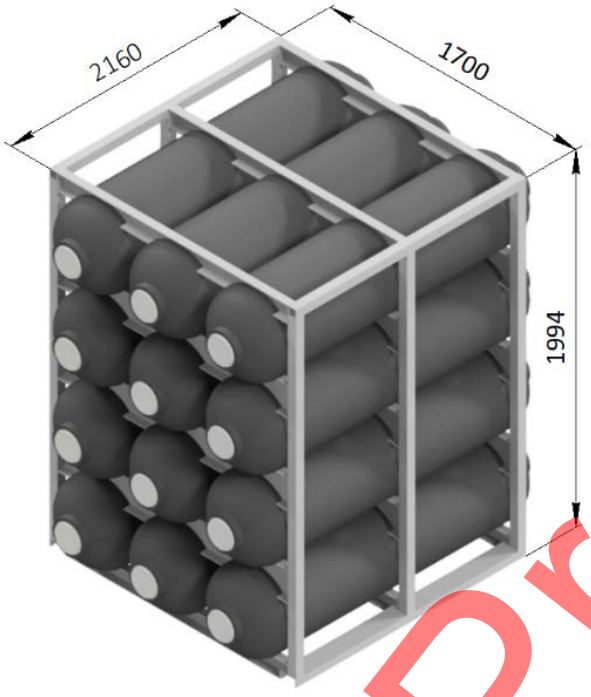

Рис.3. Картридж для хранения и транспортировки CcH_2
Fig. 3. Cartridge for storage and transportation of CcH_2

Таблица 6. Параметры баллона Heifei Sinpower тип III
Table 6. Parameters of the Heifei Sinpower Type III cylinder

Номинальный объем, л	Наружный диаметр, мм	Длина без клапана, мм	Номинальный вес, кг	Рабочее давление, МПа
210	422	2120	115	35

В качестве изоляции для картриджа предлагается использовать кожух, с теплоизолирующими стенками, состоящими из двух слоёв пенополиуретановых плит (ППУ), толщиной 100 мм каждая. Таким образом, толщина стенки изоляционного кожуха составляет 200 мм.
Баллоны картриджа изолируются гибкими листами теплоизоляции по внешней поверхности. Сборка такого моноблока из теплоизолированных баллонов покрыта дополнительным слоем изоляции толщиной 20 мм. Длина картриджа с учетом слоя изоляции составляет 2184 мм.
Проведена оценка нестационарных термодинамических процессов в баллонах картриджа при его транспортировке методом CFD-моделирования (CFD - вычислительная гидродинамика, Computational fluid dynamics) в программном обеспечении ANSYS. Цель - определить возможное время бездренажного хранения крио-компримированного водорода.
Расчет теплопритоков в процессе транспортировки картриджа от наполнительной станции до места потребления проведен для картриджа из 12 металокомпозитных баллонов (рис. 3). Для сокращения времени расчета без потери точности результатов рассмотрена ¼ часть исходной геометрии (рис. 4). Сгенерирована сетка высокого качества в модуле ANSYS Meshing с применением метода «poly-hexcore» (рис. 4). Минимальный размер ячеек составил 0,6 мм, максимальный 30 мм.

Article in Press

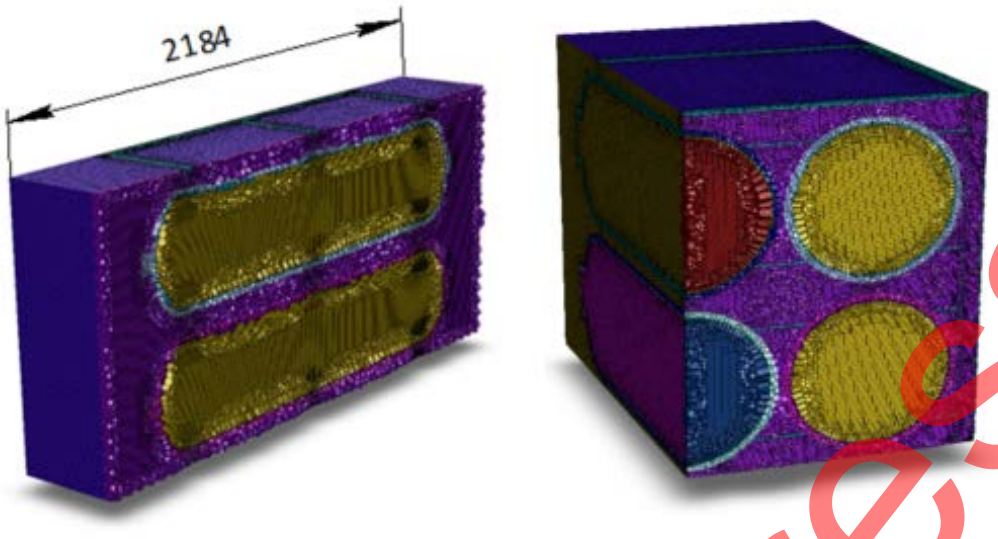

Рис. 4. Расчетная сетка, сечение вдоль / поперек баллонов
Fig. 4. Calculation grid, cross-section along/across the cylinders

Оценка предельного повышения давления и температуры в баллонах картриджа проведена для постоянной температуры крио-компримированного водорода (85 К) комбинированным методом следующим образом.

На первом этапе определено значение предельного коэффициента теплопередачи от внешней среды к внутреннему объему газа при помощи теплового расчёта в ANSYS Fluent. Температура газовой фазы внутри баллонов принудительно задана неизменной и составляет 85 К для соответствующего стационарного расчета.

Расчет в ANSYS Fluent проведен для следующих параметров, указанных в таблицах 7 и 8.

Таблица 7. Начальные и граничные условия в стационарном CFD расчете
Table 7. Initial and boundary conditions in steady-state CFD analysis

Начальные условия		**Граничные условия**	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Температура каркаса, изоляции, баллонов)	296,15 К	Температура окружающей среды	296,15 К
Давление водорода	267,5 бар	Коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности к окружающей среде	8 $Вт \cdot м^{-2} \cdot К^{-1}$
Температура водорода	85 К (постоянная)	Тепловой потока на границах «симметрии»	0 Вт

Таблица 8. Теплофизические свойства областей, содержащих твердую фазу
Table 8. Thermophysical properties of regions containing a solid phase

Среда	Параметр	Среда	Параметр
Сталь		**Пенополиуретан**	
Плотность	8030 $кг \cdot м^3$	Плотность	35 $кг \cdot м^3$
Теплоемкость	502,48 $Дж \cdot кг^{-1} \cdot К^{-1}$	Теплоемкость	1470 $Дж \cdot кг^{-1} \cdot К^{-1}$
Теплопроводность	16,27 $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$	Теплопроводность	0,025 $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$
Алюминиевый лейнер баллона		**Армирующая обмотка баллона**	
Плотность	2725 $кг \cdot м^3$	Плотность	1800 $кг \cdot м^3$
Теплоемкость	$(-117,3 + 7.1 \cdot T - 0,0124 \cdot T^2)$ $Дж \cdot кг^{-1} \cdot К^{-1}$	Теплоемкость	752 $Дж \cdot кг^{-1} \cdot К^{-1}$

Article in Press

Теплопроводность	(392,4 – 0,95·T - 2,93·10^{-4}· ·T^2 + 5,7·10^{-6}·T^2) Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$	Теплопроводность	0,105 Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$

Свойства водорода определены как для сжимаемого реального газа при помощи программы REFPROP, встроенной в функционал ANSYS Fluent.
Течение газа в объеме баллонов принято ламинарным с учетом вязкостного нагрева потока жидкости «Viscous Heating».
В процессе решения получен достаточно низкий уровень невязок порядка 10^{-11} для уравнений неразрывности и сохранения импульса, а также 10^{-17} для уравнения энергии, необходимые для получения достоверного решения.
Таким образом, по результатам моделирования на первом этапе получено распределение температуры (рис. 5), которое в дальнейшем использовано как начальная температура при проведении нестационарного расчета.

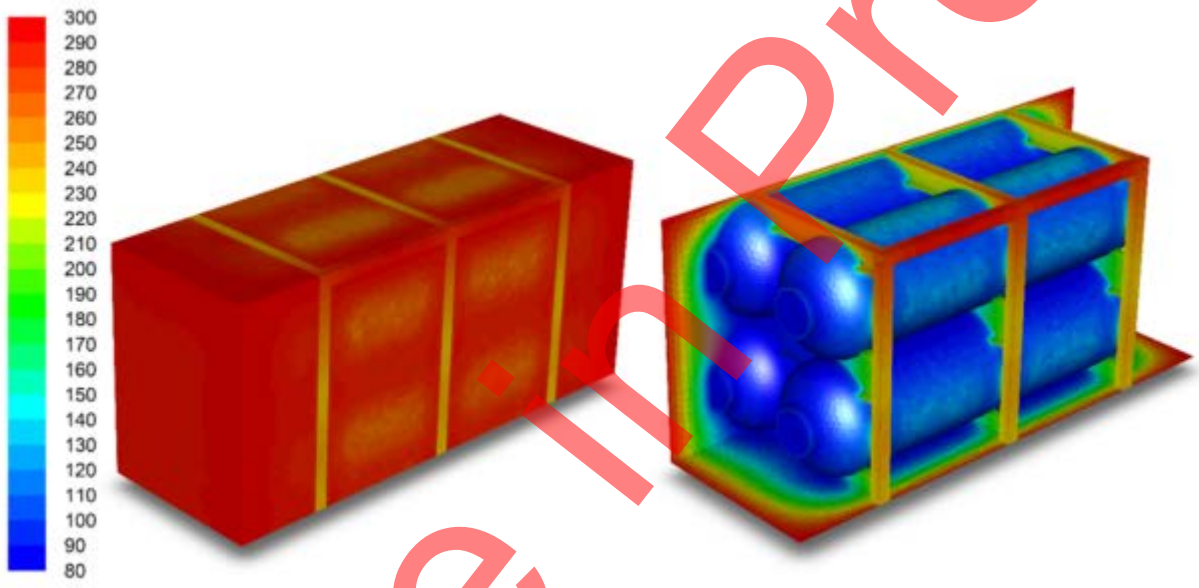

Рис. 5. Тепловой градиент при стационарном расчете коэффициента теплопередачи *α* от внешней среды к внутреннему объему газа
Fig. 5. Thermal gradient in steady-state calculation of the heat transfer coefficient α from the external environment to the internal volume of the gas

Таким образом, по полученным данным определено верхнее значение коэффициента теплопередачи $\alpha_{пр}$ от внешней среды к внутреннему объему газа постоянной температурой 85 К. Оно составило 0,194 Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$.
На втором этапе использована простая численная модель с сосредоточенными параметрами, которая описывает отогрев газовой области за счет известного коэффициента теплоотдачи $\alpha=\alpha_{пр}$, который был определен на этапе CFD моделирования. Система уравнений для решения данной задачи включает в себя уравнения сохранения массы (1) и энергии (2).

$$V_b \cdot \rho(T_{i-1}, p_{i-1}) = V_b \cdot \rho(T_i, p_i) \quad (1)$$

$$h(T_{i-1}, p_{i-1}) \cdot \rho(T_{i-1}, p_{i-1}) = V_b \cdot h(T_i, p_i) \cdot \rho(T_i, p_i) + \alpha \cdot S \cdot (T_{OC} - T_i) \quad (2)$$

где V_b – объем баллона, м^3; ρ – плотность газа, кг·м$^{-3}$; T_{i-1} и p_{i-1} – температура, К и давление газа, Па на предыдущем временном шаге i 1 соответственно; T_i и p_i – температура, К и давление газа, Па на текущем временном шаге i соответственно; h – удельная энтальпия газа, Дж·кг$^{-1}$; α – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности к окружающей среде,

Article in Press

Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$; S – площадь внешней поверхности топливной ячейки, м^2; $T_{ос}$ – температура окружающей среды.

По результатам моделирования на втором этапе получены зависимости средней температуры газа и давления от времени отепления (рис. 6).

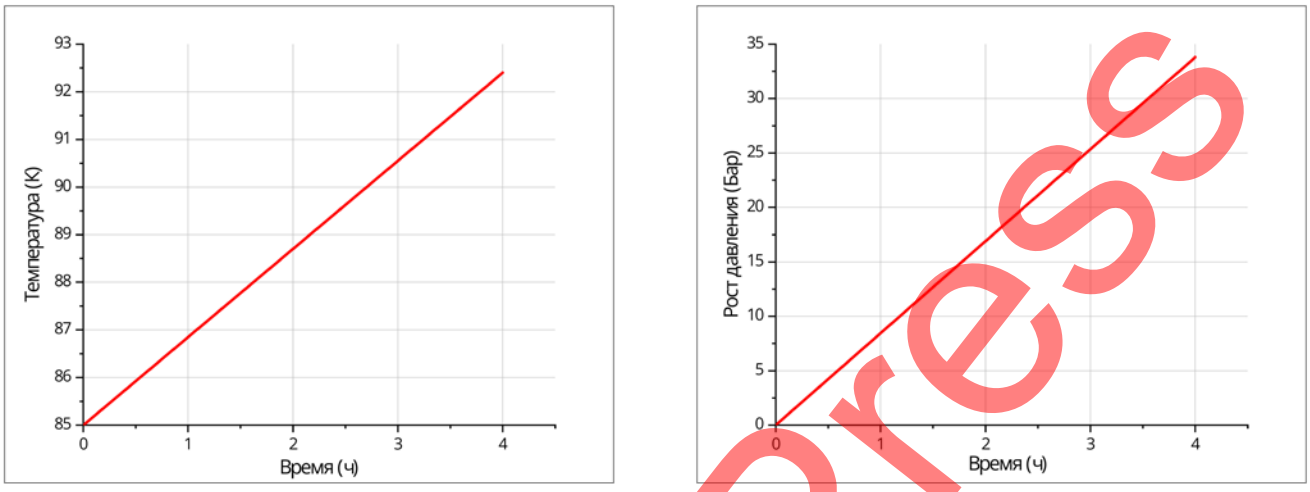

Рис.6. Зависимости средней температуры газа и давления от времени отепления
Fig. 6. Dependencies of average gas temperature and pressure on heating time

Таким образом, при отогреве картриджа с начальной температурой 85 К и давлением 267,5 бар в течении 4-х часов температура поднимется до 92,4 К, а давление на 33,8 бар (до абсолютного давления 301,3 бар).

Далее производен анализ характера изменения коэффициента теплопередачи α в рамках нестационарного CFD расчета с целью определить ошибки при расчете по предельному коэффициенту теплопередачи $\alpha_{пр}$.

Данный нестационарный CFD расчет также опирается на параметры моделирования, приведенные в таблицах 7 и 8, однако в качестве начальных условий приняты результаты, полученные в рамках стационарного CFD расчета: температуры каркаса, изоляции и баллонов. В процессе решения получен достаточно низкий уровень невязок порядка 10^{-4} для уравнений неразрывности и сохранения импульса, а также 10^{-6} для уравнения энергии, необходимый для получения достоверного решения.

Значение коэффициента теплопередачи α рассчитано для первых 5-ти секунд процесса, в пределах которых формируется основной температурный градиент, ухудшающий теплопередачу вглубь объема газа. Таким образом, значение устойчивого коэффициента α составило порядка 0,138 Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$ (рис. 7).

Article in Press

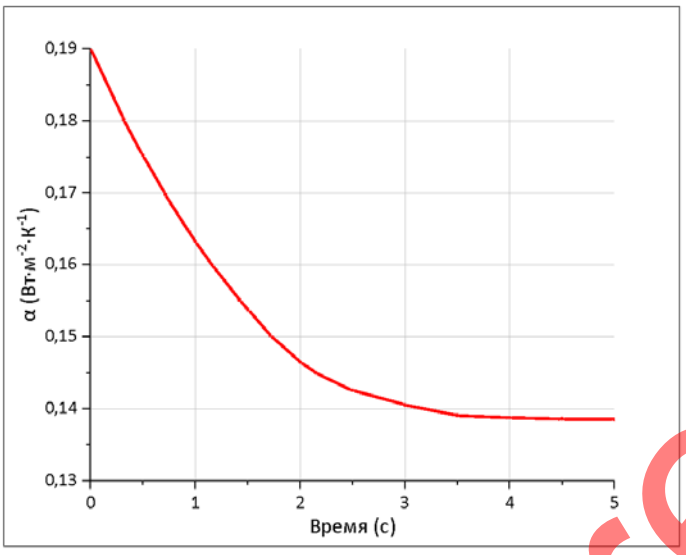

Рис.7. Значение коэффициента теплопередачи α, рассчитанное в процессе нестационарного CFD расчета в течении первых 5 секунд процесса
Fig. 7. Value of the heat transfer coefficient α, calculated during the transient CFD analysis over the first 5 seconds of the process

Таким образом, по полученному коэффициенту теплопередачи α проведено моделирование отогрева газовой области с применением модели с сосредоточенными параметрами по уравнениям (1) и (2). В результате получены зависимости средней температуры газа и давления (рисунок 8) от времени отепления.

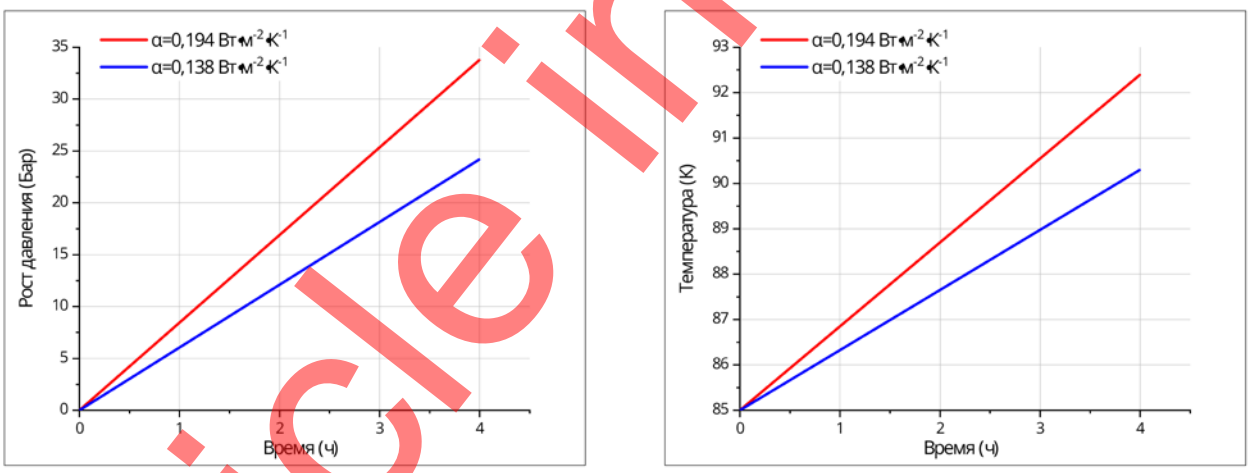

Рис.8. Зависимости средней температуры газа и давления от времени отепления для коэффициента теплопередачи $\alpha=\alpha_{пр}$=0,194 Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$ и α=0,138 Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$
Fig. 8. Dependencies of the average gas temperature and pressure on heating time for the heat transfer coefficient $\alpha = \alpha_{ex}$ = 0.194 W·m^{-2}·K^{-1} and α = 0.138 W·m^{-2}·K^{-1}

Таким образом, при отогреве водорода внутри картриджа с начальной температурой 85 К и давлением 267,5 бар в течении 4 часов с коэффициентом теплопередачи α=0,138 Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$, его температура поднимется до 90,3 К, а давление на 24,2 бар (до абсолютного давления 291,7 бар).

Следовательно, значение поправочного коэффициента на ошибку при расчете повышения давления по предельному коэффициенту теплопередачи $\alpha_{пр}$, составит порядка 1,4.

В связи с тем, что ожидаемый расход водорода по итогам испытания водородных гибридов при работе 130 тонного самосвала составляет от 15 до 25 кг/ч, приращение давления вследствие теплопритоков из окружающей среды в режиме потребления водорода меньше, чем уменьшение давления за счет уменьшения массы водорода (потребления самосвалом). Это

Article in Press

означает, что максимальное давление в баллонах ожидается непосредственно перед началом потребления водорода. По результатам численной модели получено, что в течение 4 часов давление водорода внутри баллонов картриджа будет не выше 30,5 МПа, при номинальном давлении хранения водорода в баллонах типа III производителя Heifei Sinpower 35 МПа. На основании этого можно сделать вывод о безопасности использования водородных картриджей и возможности их транспортировки от места заправки до карьера без критического повышения давления. Теоретически реализация предложенной технологии заправки крио-компримированным водородом карьерных самосвалов возможна.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДУЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПРОИЗВОДСТВА И НАПОЛНЕНИЯ CcH_2

Для оценки удельных энергетических затрат предложенной схемы криогенной заправки было проведено моделирование цикла в программной среде Aspen HYSYS. При моделировании не учитываются теплопритоки к теплообменным аппаратам и трубопроводам, энергопотребление вспомогательных установок (межступенчатое охлаждение и т.п.). Оценены затраты на компримирование всех рабочих сред в цикле. Рабочие среды: продукционный водород на заправку, хладагенты – азот, пропан. Азотный и пропановый контуры были рассчитаны с помощью уравнения состояния реального газа Пенг-Робинсона. Для вычисления параметров водородного контура использовалось уравнение MBWR. Параметры заправочного комплекса CcH_2 приведены в таблице 9.

Таблица 9. Параметры заправочного комплекса CcH_2
Table 9. The parameters of the CcH_2 filling complex

Параметр	Значение
Давление компримирования водорода	30 МПа
Охлаждение	Азот жидкость + газ (многопоточный ТОА)
Холодопроизводительность азотной ХМ	1150 кВт
Холодопроизводительность пропанового ПО	700 кВт
Температура водорода после концевого охладителя	Не более 303 К
Температура водорода после блока охлаждения	Не более 82 К

Для обеспечения работы карьера, на котором работают до 40 транспортных средств, был предложен следующий сценарий заправки, представленный в таблице 10. Показан расход циркуляции среды (водорода), необходимый для захолаживания стенок баллонов картриджа при продувке от температуры окружающей среды до температуры 88 К.

Таблица 10. Сценарий заправки
Table 10. Refueling scenario

Количество обслуживаемых машин	До 40
Параллельная заправка картриджей	5
Расход водорода на продувку	260 кг/ч
Время заправки (наполнение + захолаживание)	2 часа

В результате моделирования получены энергетические затраты холодильного блока и удельные энергетические затраты для конечного продукта по предложенной схеме компримирования и охлаждения водорода. Результаты представлены в таблице 11.

Таблица 11. Оценка энергетических затрат на производство CcH_2
Table 11. Assessment of energy costs for CcH2 production

Расход H_2 на продувку и заправку картриджей	1300 кг/ч
Затраты на компримирование водорода	3618 кВт

Article in Press

(до 300 Бар)	
Затраты на компримирование азота (до 22 Бар)	3358 кВт
Затраты на компримирование пропана	253,3 кВт
Удельные затраты в цикле CcH_2	5,56 кВт·ч/кг
Удельные затраты на получение LH_2	10,85 кВт·ч / кг [3]
Удельные затраты на получение GH_2 (70 МПа)	2,28 кВт·ч / кг [11]

Удельные затраты на получение крио-компримированного водорода на 49% ниже относительно удельных затрат на ожижение водорода, что позволяет сделать вывод о том, что технология подготовки крио-компримированного водорода из газообразного сырья с последующим охлаждением может иметь потенциальный экономический эффект для потребителей большого количества водорода, например, карьерных самосвалов. Гибкость и вариативность параметров крио-компримированного водорода (давление и температура), которые можно достичь, позволяют утверждать, что необходима оптимизация по вышеперечисленным условиям и совместная работа как с производителями баллонов, так и производителями транспортных средств на водородных силовых установках.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи.
Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. All authors made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication.
Competing interests. The author declares no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.
Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На фоне роста спроса на водород в качестве топлива в мире в том числе в сфере сверхтяжелой техники, а также нарастающего кризисного состояния в секторе тяжелой специальной мобильности в РФ (в частности, карьерных самосвалов), разработана и предложена технология хранения и транспортировки водорода в крио-компримированном состоянии.
2. Технология учитывает потребности заказчиков на минимальное время заправки, сопоставимое с техникой горнодобывающей промышленности на дизельном топливе, а также ориентирована на достижение максимального экономического эффекта.
3. В связи с этим предложено использовать крио-компримированный водород, полученный путем сжатия теплого газообразного водорода с последующим охлаждением до температур около 80 К (не требующих экранно-вакуумной изоляции для безопасной работы), что позволяет уйти от затрат на ожижение водорода по сравнению с традиционной технологией крио-компримирования [9] и использовать доступные на рынке компоненты для организации хранения такого водорода.

Article in Press

4. Разработанная заправочная инфраструктура предполагает подготовку и заправку картриджей-хранилищ вблизи места производства водорода с последующей доставкой на карьер. На карьере осуществляется горячая замена отработанных картриджей напрямую с транспортного средства.
5. Была предложена конфигурация сменного картриджа, состоящая из 12-ти баллонов типа III, объемом по 210л. Проведен расчет теплопритоков к системе с применением CFD-моделирования. Определено повышение температуры и давления водорода внутри баллонов, коэффициент теплопередачи. За 4 часа бездренажного хранения ожидается повышение давления на 33,8 бар и температуры на 7,4 К. Потребление водорода топливным элементом карьерного самосвала составляет от 15 до 25 кг/ч, что исключает избыточное повышение давления вследствие теплопритоков в процессе эксплуатации самосвала. Таким образом, результаты расчета подтверждают возможность реализации сценария доставки сменных картриджей на карьер и непосредственно к борту самосвала для замены.
6. Предложена схема стационарной криогенной заправки, описан принцип её работы. Проведено моделирование цикла компримирования и охлаждения водорода такой заправки, обслуживающей карьер до 40 машин. Учтены энергетически затраты на компрессию продукционного водорода и его охлаждение холодильной машиной на азоте с предварительным охлаждением пропаном). Удельные затраты на подготовку и заправку крио-компримированного водорода в картридж могут быть на 49% меньше, чем на ожижение водорода.
7. Для полноценной разработки и внедрения технологии требуется решить ряд оптимизационных задач: давление и температура хранения водорода в картриджах, время заправки картриджей на стационарных заправках, необходимость теплоизоляции с учетом тепловой нагрузки на холодильную машину при продувке и охлаждении баллонов картриджа, а также удаленности заправки от мест разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хамаев С. И., Чанчиков А. А., Чиж С. А. Использование водорода как автомобильного топлива // Экология или экономика. 2025. С. 54-56.
2. В Китае вступил в силу первый всеобъемлющий закон об энергетике // CGTN: электронный информационный ресурс. 2025. [https://russian.cgtn.com/news/2025-01-01/18744431338346659 86/index.html] (дата обращения: 17.02.2025)
3. Global Hydrogen Review 2024 // International Energy Agency: электронный информационный ресурс. 2024. [https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024] (дата обращения: 17.02.2025)
4. Аналитика цен на дизельное топливо // ДИЗЕЛЬНЫЙ РЫНОК: электронный информационный ресурс. 2023. [http://xn--d1acfdrboy8h.xn--p1ai/rynok_diztopliva/analitika_cen_diztopliva.php] (дата обращения: 18.02.2025).
5. Миллиардные инвестиции: где в России строят крупные горно-обогатительные комбинаты // ГОРНОЕ ДЕЛО: электронный информационный ресурс. 2023. [https://xn--80adahnf5bdekrm.xn--p1ai/post/milliardnye-investitsii-gde-v-rossii-stroyat-krupnye-gorno-obogatitelnye-kombinaty/] (дата обращения: 18.02.2025).
6. Прогноз роста глобального рынка электромобилей // POWER TECHNOLOGY: электронный информационный ресурс. 2023. [https://www.power-technology.com/news/globaldata-global-ev-growth-forecast-report/] (дата обращения: 18.02.2025).
7. Wang HC, Zhao YX, Dong XQ. et al. Thermodynamic analysis of low-temperature and high-pressure (cryo-compressed) hydrogen storage processes cooled by mixed-refrigerants // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Т. 47. №. 67. P. 28932-28944.
8. Aceves, S. M., Espinosa-Loza, F., Ledesma-Orozco, E., et al. High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels // International Journal of Hydrogen Energy. 2010. 35(3). P. 1219–1226.

Article in Press

9. METHOD FOR FILLING A PRESSURE VESSEL PROVIDED FOR A CRYOGENIC STORAGEMEDIUM, IN PARTICULAR HYDROGEN. Patent US 2009/0308083 A1 / Brunner Tobias. заявл. 12/546,998 от 25.08.2009; опубл. 17.12.2009.
10. 210 л емкость для хранения водорода для транспортных средств // HFSINO POWER: электронный информационный ресурс. 2023. [https://ru.hfsinopower.com/210l-hydrogen-storage-tank-for-vehicles] (дата обращения: 19.03.2024)
11. Handbook of hydrogen storage: new materials for future energy storage / Hirose K. [et al.] Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGgaA, 2010. 343 p.

REFERENCES

1. Khamayev SI, Chanchikov AA, Chizh SA. Use of hydrogen as automotive fuel // Ecology or economy. 2025. P. 54-56 (in Russ.)
2. The first comprehensive energy law comes into effect in China. CGTN: Electronic information resource. 2025. [https://russian.cgtn.com/news/2025-01-01/18744431338346659 86/index.html] (accessed: 17 February 2025). (in Russ.)
3. Global Hydrogen Review 2024. International Energy Agency: Electronic information resource. 2024. [https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024] (accessed: 17 February 2025).
4. Diesel fuel price analytics. DIZELNY RYNOK: Electronic information resource. 2023. [http://xn--d1acfdrboy8h.xn--p1ai/rynok_diztopliva/analitika_cen_diztopliva.php] (accessed: 18 February 2025). (in Russ.)
5. Billion-dollar investments: where large mining and beneficiation plants are being built in Russia. GORNAYE DELO: Electronic information resource. 2023. [https://xn--80adahnf5bdekrm.xn--p1ai/post/milliardnye-investitsii-gde-v-rossii-stroyat-krupnye-gorno-obogatitelnye-kombinaty/] (accessed: 18 February 2025). (in Russ.)
6. Forecast of global electric vehicle market growth. POWER TECHNOLOGY: Electronic information resource. 2023. [https://www.power-technology.com/news/globaldata-global-ev-growth-forecast-report/] (accessed: 18 February 2025). (in Russ.)
7. Wang HC, Zhao YX, Dong XQ. et al. Thermodynamic analysis of low-temperature and high-pressure (cryo-compressed) hydrogen storage processes cooled by mixed-refrigerants // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. T. 47. №. 67. P. 28932-28944.
8. Aceves, S. M., Espinosa-Loza, F., Ledesma-Orozco, E., et al. High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels // International Journal of Hydrogen Energy. 2010. 35(3). P. 1219–1226.
9. Method for filling a pressure vessel provided for a cryogenic storage medium, in particular hydrogen. Patent US 2009/0308083 A1 / Brunner T. filed 12/546,998 on 25 August 2009; published 17 December 2009.
10. 210L Hydrogen Storage Tank for Vehicles // HFSINO POWER: electronic information resource. 2023. URL: https://ru.hfsinopower.com/210l-hydrogen-storage-tank-for-vehicles (accessed: March 19, 2024) (in Russ.)
11. Handbook of hydrogen storage: new materials for future energy storage / Hirose K. [et al.] Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGgaA, 2010. 343 p.

ОБ АВТОРАХ / AUTHOR'S INFO

Автор, ответственный за переписку:	
***Нестеров Артём Александрович,** студент; адрес: 105005, Москва, Лефортовская наб., д.1; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5721-8258; e-mail: cryonest@cryoeng.ru	***Artyom A. Nesterov,** student; address: 1 Lefortovskaya Naberezhnaya, 105005 Moscow; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5721-8258; e-mail: cryonest@cryoeng.ru
Соавторы:	
Кротов Александр Сергеевич, к.т.н., доцент; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9671-8890; eLibrary SPIN: 4165-8154; e-mail: krotov@bmstu.ru	**Alexander S. Krotov**, Cand. Sci. (Tech.), Assistant Professor; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9671-8890; eLibrary SPIN: 4165-8154; e-mail: krotov@bmstu.ru

Article in Press

Оригинальное исследование/ Original Article

Егорова Анна Игоревна, к.т.н.; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1391-5002; eLibrary SPIN: 9860-8922; e-mail: egorova.ai@bmstu.ru	**Anna I. Egorova,** Cand. Sci. (Tech.); ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1391-5002; eLibrary SPIN: 9860-8922; e-mail:
Климова Виктория Сергеевна; аспирант; eLibrary SPIN: 2823-6269 ; e-mail: kvs16ea249@student.bmstu.ru	**Viktoria S. Klimova**; postgraduate student: eLibrary SPIN: 2823-6269; e-mail: kvs16ea249@student.bmstu.ru
Мазякин Максим Сергеевич, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7426-2176; eLibrary SPIN: 1864-9892; e-mail: maxim.maziakin@gmail.com	**Maxim S. Mazyakin;** ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7426-2176; eLibrary SPIN: 1864-9892; e-mail: maxim.maziakin@gmail.com
Щербаков Иван Викторович, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6366-5285; eLibrary SPIN: нет e-mail: vanya-sherbakov@mail.ru	**Ivan V. Sherbakov,** ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6366-5285; eLibrary SPIN: нет e-mail: vanya-sherbakov@mail.ru
Сизов Егор Андреевич, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3613-1906; e-mail: sizov.egor@outlook.com	**Egor A. Sizov,** ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3613-1906; e-mail: sizov.egor@outlook.com
Шелякин Игорь Дмитриевич, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5205-0796; eLibrary SPIN: 4624-5336; e-mail: shelyakinlife@mail.ru	**Igor D. Shelyakin,** ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5205-0796; eLibrary SPIN: 4624-5336; e-mail: shelyakinlife@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку / *Corresponding author

Article in Press