

**ОЖИЖИТЕЛЬ ВОДОРОДА: ПРИМЕНЕНИЕ ЖИДКОГО ВОДОРОДА  
В ЗАДАЧАХ С МАЛОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ****С.Е. Глебов**

glebovse@interpolyaris.ru

**И.С. Ельцов**

eltsov@interpolyaris.ru

**Т.А. Башарина**

ta@interpolyaris.ru

**А.С. Игнатов**

ignatov@interpolyaris.ru

**Д.П. Шматов**

shmatov@inlerpolyaris.ru

**ООО НПП «ИнтерПолярис», Нововоронеж, Российская Федерация****Аннотация**

Представлена оценка актуальности ожижителей водорода и необходимости процесса ожижения для решения прикладных задач в различных отраслях российской промышленности. Отмечено, что, хотя в настоящее время в России широко эксплуатируются ожижительные станции высокой производительности, практически отсутствуют станции малой производительности, потребность в которых остро испытывают различные отрасли промышленности. Подтверждена необходимость и актуальность разработки и внедрения ожижителя водорода малой производительности, доступного для использования в широком диапазоне исследовательских задач. Описана запатентованная конструкция ожижителя водорода малой производительности компании ООО НПП «ИнтерПолярис», успешно прошедшая испытания на этапе мелкосерийного производства, в которой для получения жидкого водорода реализуется замкнутый холодный цикл, предусматривающий предварительное охлаждение сжатого водорода и его однократное дросселирование.

**Ключевые слова**

Водород, криогеника, ожижитель водорода, дросселирование, азотный цикл охлаждения, теплообменный процесс, теплотехника, конденсационный процесс

Поступила в редакцию 18.12.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Водород — самый легкий и самый распространенный химический элемент во Вселенной, который был открыт в 1766 г. Генри Кавендишем. В последние годы во многих областях промышленности и науки проявляется все больший интерес к использованию водорода. Это обусловлено растущей необходимостью перехода на экологически чистые источники энергии, в число которых входят водородные топлива.

На сегодняшний день в мире ежегодно производится и потребляется около 75 млн т газообразного водорода, из которых ожижается лишь незначительная его часть. Так, в России ежегодное производство сжиженного водорода состав-

ляет 120 тыс. т, из которых 15 % расходуется на нужды ракетно-космической отрасли, 37 % — химической промышленности, 21 % — металлургии, 16 % — электроники и 4 % — стекольной промышленности.

В современном мире использование жидкого водорода необходимо для решения широкого перечня задач [1–4]. Так, жидкий водород используется в составе экологически чистых и энергетически эффективных топлив: горение 1 кг водорода в кислороде обеспечивает выделение порядка 140 МДж экологически чистой энергии, в то время как при сгорании подобной массы бензина — 50 МДж, спирта — 30 МДж.

Помимо высокой энергоэффективности водород обладает и другими преимуществами. При использовании водорода в качестве рабочего газа двигателя внутреннего сгорания (ДВС) КПД двигателя достигает 90 %, что превышает КПД двигателя на углеводородных компонентах топлива более чем в 2,5 раза. Водородный двигатель позволяет существенно снизить выбросы вредных веществ, поскольку при сгорании водорода образуется лишь водяной пар.

Совокупность высоких значений теплоемкости и теплопроводности жидкого водорода открывает возможность использования данного вещества как высокоэффективного охладителя. Жидкий водород применяют для охлаждения теплонапряженных систем, в том числе оборудования для осуществления научных экспериментов в области физики, проводимых в условиях криогенных температур. Также водород применяют в качестве охладителя в системах охлаждения жидкостных ракетных двигателей при использовании водородной пары топлив, поскольку температура продуктов сгорания в процессе работы двигателя обычно превышает 2500 К и огневая стенка, находящаяся в непосредственном контакте с высокотемпературными газами, нуждается в охлаждении [5].

Применение жидкого водорода в интересах обороны страны как основного компонента для производства водородных бомб представляет немалый потенциал, поскольку водородная бомба, также известная как термоядерная бомба — самое мощное химическое оружие, когда-либо созданное и испытанное человечеством. Принцип срабатывания такого оружия заключается в двух последовательных стадиях: стадии подрыва ядерной бомбы, необходимой для создания условий протекания последующей стадии — неконтролируемой термоядерной реакции, при которой в ходе слияния легких атомных ядер дейтерия и трития происходит синтез ядер гелия с выделением колоссального количества энергии. Для проведения исследовательских испытаний при разработке водородных бомб актуален процесс ожижения водорода в малых количествах.

Одна из наиболее перспективных областей применения жидкого водорода — термоядерная энергетика. Здесь рассматриваемый компонент используется как источник энергии.

Вопреки распространенности ядерной энергетике в современном мире, где энергия ядерного распада в большинстве случаев основана на использовании тяжелых изотопов, таких как уран-235, которые в процессе деления ядер распа-

даются на менее тяжелые частицы, обладающие высокой кинетической энергией, по сегодняшний день, начиная с 1950-х годов, проводятся исследования управляемого термоядерного синтеза. В результате данных исследований были созданы два основных вида термоядерных реакторов, имеющих схожий механизм получения энергии — извлечение из процесса термоядерного синтеза: токамак и стелларатор. В качестве топлива для осуществления управляемого термоядерного синтеза используются изотопы водорода — дейтерий и тритий. При слиянии топливных изотопов в ядро гелия одновременно образуется количество энергии, равное 17,6 МэВ, что в расчете на 1 г вещества по сравнению с ядерной реакцией выделяет существенно больше тепловой энергии.

Таким образом, термоядерный синтез, основанный на водороде, имеет огромный потенциал в области энергетики, поскольку при осуществлении такого процесса вырабатывается огромное количество энергии при почти полном отсутствии радиоактивных отходов. Для осуществления термоядерного синтеза требуется малая масса вещества топлива (например, для получения 170 ГДж энергии требуется лишь 1 кг изотопов водорода). Таким образом, возникает необходимость в ожижителях водорода малой производительности.

Развитие водородной энергетики — приоритетное направление как в мировой, так и в отечественной энергетической отрасли. Распоряжением Правительства Российской Федерации утверждена концепция развития водородной энергетики, в которой определяются цели, задачи, стратегические инициативы и ключевые меры по динамическому изменению водородной отрасли на среднесрочном периоде до 2024 г., долгосрочном периоде до 2035 г. Так, до 2024 г. стоит задача существенно увеличить объемы производимого, потребляемого и экспортируемого водорода, в том числе и криогенного. Для решения подобной задачи потребуются консолидационные действия как газоперерабатывающих предприятий, так и организаций комплекса энергетического машиностроения.

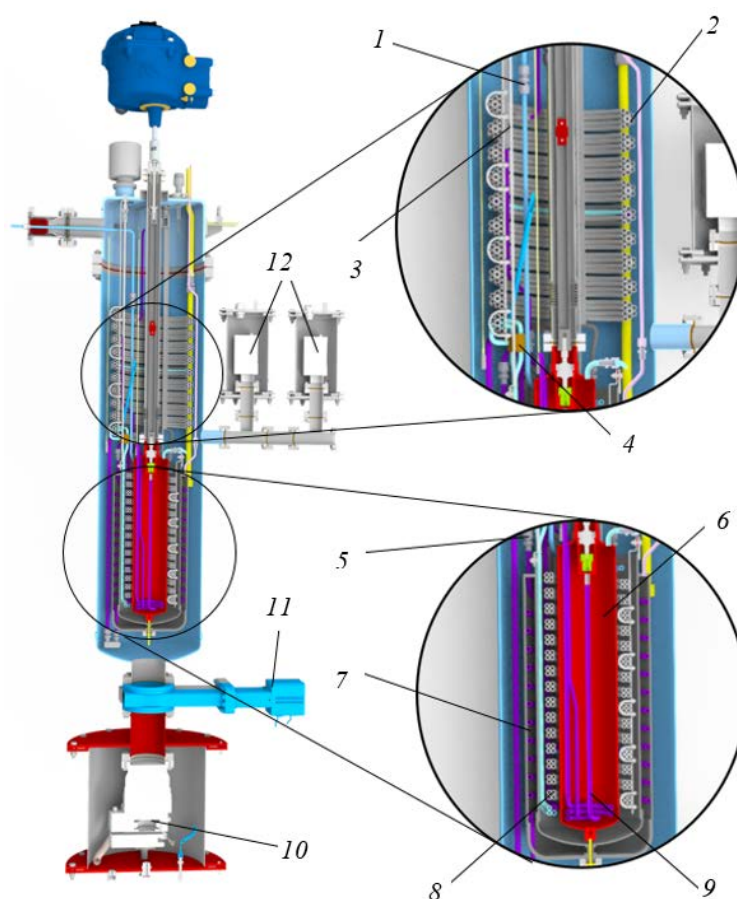
В Российской Федерации число предприятий, занимающихся разработкой, производством и реализацией криогенного оборудования для производства сжиженных газов по-прежнему невелико и их совокупная производственная мощность не способна удовлетворить все возрастающие потребности рынка [6–9].

Инженеры ООО НПП «ИнтерПолярис» разработали высокотехнологичную установку — ожижитель водорода малой производительности [10], предназначенный для получения жидкого водорода с применением замкнутого холодного цикла, включающего предварительное охлаждение сжатого водорода и его однократное дросселирование. 3D-модель ожижителя водорода малой производительности в разрезе представлена на рис. 1.

Опытный образец ожижителя водорода показан на рис. 2.

Рассматриваемая установка позволяет получать до 15 л/ч жидкого водорода на выходе. Принцип работы ожижителя водорода заключается в следующем:

сжатый водород охлаждается последовательно в предварительном теплообменнике «теплой» зоны, по одной группе трубок 2 которого проходит сжатый водород высокого давления, по другой группе — обратный расширенный водород, и по оставшимся трубкам 2 — газообразный азот из ванны жидкого азота 7, далее в концентрично расположенных вокруг сборника жидкого водорода в ванне с жидким азотом 7 и основном теплообменнике «холодной» зоны 8, одна трубка которого предназначена для сжатого водорода, а три трубки — для обратного потока расширенного водорода. Затем водород расширяется в дроссельном вентиле, смонтированном на верхней крышке сборника жидкого водорода 6, в котором он накапливается, сжижаясь после дросселирования. Неожигенный расширенный водород через предварительный теплообменник «теплой» зоны и основной теплообменник «холодной» зоны 8 выводится из ожижителя.



**Рис. 1.** Конструктивный облик ожижителя малой производительности:  
1 — криогенный фиттинг; 2 — трубы теплообменников; 3 — рама; 4 — коллектор; 5 — криогенный фиттинг; 6 — сборник жидкого водорода; 7 — азотная ванна; 8 — основной теплообменник; 9 — змеевик; 10 — вакуумный насос; 11 — пневмозадвижка; 12 — вакуумные измерители

Технический эффект, достигаемый предложенным ожижителем водорода, заключается в высокой надежности, долгосрочном ресурсе, облегченном техническом обслуживании и ремонте, обеспечиваемых эффективной компоновкой конструкции ожижителя водорода малой производительности. Непосредственный контакт змеевика с жидким азотом обуславливает повышение эффективности ожижителя водорода малой производительности путем интенсификации теплообмена при предварительном азотном охлаждении.

Научно-производственным предприятием «ИнтерПолярис» успешно проведены теплогидравлические испытания опытного образца ожижителя водорода, представленные на рис. 3, и получен патент на изобретение RU 2777680 на конструкцию ожижителя водорода малой производительности.



Рис. 2. Опытный образец ожижителя водорода



Рис. 3. Проведение приемо-сдаточных испытаний опытного образца ожижителя водорода

Таким образом, разработан ожижитель водорода малой производительности, обладающий широкой номенклатурой применения в различных областях, связанных с использованием жидкого водорода. Технические решения, использованные в разработке, обеспечивают производительность от 5 до 15 л/ч жидкого водорода, что позволяет эффективно применять ожижитель водорода малой производительности в химической, атомной и фармацевтической промышленности, производстве микроэлектроники, металлургии и многих других отраслях глобальной экономики.

Отметим, что создание и внедрение новых комплексов производства сжиженного водорода необходимы для удовлетворения возрастающего спроса на криогенные сжиженные газы, а также для развития водородной техники в целом, включая атомную промышленность, что создает предпосылки для серийного производства ожижителей водорода малой производительности.

### Литература

- [1] Шустров А.А., Петров А.И. Перспективы развития конструкций насосов для перекачивания жидкого водорода. *Гидравлика*, 2022, № 13, с. 1–11.
- [2] Лавренченко Г.К. Анализ состояния и перспектив развития кислородного и криогенного машиностроения. *Холодильная техника*, 2015, № 12, с. 42–45.
- [3] Селезнев А.А., Кошелев Д.О., Мостипанов Д.А., Титаренко Л.А., Винокурова И.М. Процесс получения сжиженного водорода и его преимущества. *Авиакосмические технологии. XXII Междунар. науч.-техн. конф. и школа молодых ученых, аспирантов и студентов: сб. тез.* Воронеж, Воронежский государственный технический университет, 2021, с. 38–40.
- [4] Домашенко А.М., Горбатский Ю.В. Жидкий водород в проблеме «водородная энергетика». *Энергия: экономика, техника, экология*, 2006, № 7, с. 13–19.
- [5] Башкатова Т.А., Краев М.В. Получение водорода для ракетных двигателей. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2010, т. 1, № 6, с. 42–43.
- [6] Буянов Р.А., Зельдович А.Г., Пилипенко Ю.К. Ожижитель для получения параводорода и катализаторы для орто-пара-конверсии водорода. *Приборы и техника эксперимента*, 1961, т. 6, с. 188–190.
- [7] Мюллер Б., Майвальд М. *Турбинная установка для крупномасштабного производства водорода*. Патент № RU 2331789 C2, 2003.
- [8] Карделла У., Декер Л., Клайн Г. *Крупномасштабное сжижение водорода посредством водородного холодильного цикла высокого давления, объединенного с новым предварительным охлаждением, однократно смешанным хладгентом*. Патент № RU 2718378 C1, 2020.
- [9] Морковкин И.М., Кузьменко И.Ф., Кашонкова Е.А., Духанин Ю.И., Гуров Е.И. *Способ ожижения водорода с гелиевым холодильным циклом и устройство для его осуществления*. Патент № RU 2309342 C1, 2007.
- [10] Шматов Д.П., Перевезенцев И.Г., Игнатов А.С., Кружаев К.В., Хромых М.И., Башарина Т.А., Сергеев А.В., Калядин О.В., Афанасьев А.А. *Ожижитель водорода малой производительности*. Патент № RU 2777680 C1, 2022.

**Глебов Сергей Евгеньевич** — лаборант-исследователь, ООО НПП «ИнтерПолярис», Нововоронеж, Российская Федерация.

**Ельцов Иван Сергеевич** — лаборант-исследователь ООО НПП «ИнтерПолярис», Нововоронеж, Российская Федерация.

**Башарина Татьяна Александровна** — ведущий научный сотрудник ООО НПП «ИнтерПолярис», Нововоронеж, Российская Федерация.

**Игнатов Алексей Сергеевич** — главный конструктор ООО НПП «ИнтерПолярис», Нововоронеж, Российская Федерация.

**Шматов Дмитрий Павлович** — кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научно-техническому развитию ООО НПП «ИнтерПолярис», Нововоронеж, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Глебов С.Е., Ельцов И.С., Башарина Т.А., Игнатов А.С., Шматов Д.П. Ожижитель водорода: применение жидкого водорода в задачах с малой производительностью. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 12 (89).

<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-956>

## HYDROGEN LIQUEFIER: USING LIQUID HYDROGEN IN THE LOW PERFORMANCE APPLICATIONS

S.E. Glebov

glebovse@interpolyaris.ru

I.S. Eltsov

eltsov@interpolyaris.ru

T.A. Basharina

ta@interpolyaris.ru

A.S. Ignatov

ignatov@interpolyaris.ru

D.P. Shmatov

shmatov@inlerpolyaris.ru

LLC SPE “InterPolaris”, Novovoronezh, Russian Federation

---

### Abstract

*The paper presents evaluation of the hydrogen liquefiers' relevance and the necessity for a liquefaction process in solving the applied problems in various sectors of the Russian industry. It notes that, although high-performance liquefaction facilities are currently widely operating in Russia, the low-performance facilities are practically missing. It should be noted that various industries are urgently requiring them. Necessity and relevance of design, development and implementation of the low-performance hydrogen liquefier acceptable for introduction in a wide range of research tasks is confirmed. Patented design of the low-performance hydrogen liquefier by the LLC SPE “InterPolaris” is described. It successfully passed testing at the small-scale production stage, where a closed cold cycle was introduced to produce liquid hydrogen provided the compressed hydrogen pre-cooling and its single throttling.*

### Keywords

*Hydrogen, cryogenics, hydrogen liquefier, throttling, nitrogen refrigeration cycle, heat exchange process, heat engineering, condensation process*

Received 18.12.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

---

### References

- [1] Shustrov A.A., Petrov A.I. Prospects for the development of pump designs for pumping liquid hydrogen. *Gidravlika*, 2022, no. 13, pp. 1–11. (In Russ.).
- [2] Lavrenchenko G.K. Analysis of the state and prospects for the development of oxygen and cryogenic engineering. *Kholodil'naya tekhnika*, 2015, no. 12, pp. 42–45. (In Russ.).
- [3] Seleznev A.A., Koshelev D.O., Mostipanov D.A., Titarenko L.A., Vinokurova I.M. The process of producing liquefied hydrogen and its advantages. *Aviakosmicheskie tekhnologii. XXII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. i shkola molodykh uchenykh, aspirantov i studentov: sb. tez.* [Aerospace technologies. XXII International Scientific and Technical Conference and School of Young Scientists, Postgraduate Students and Students: Collection of Abstracts]. Voronezh, Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet Publ., 2021, pp. 38–40. (In Russ.).
- [4] Domashenko A.M., Gorbatskiy Yu.V. Liquid hydrogen in the problem of “hydrogen energy”. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2006, no. 7, pp. 13–19. (In Russ.).



- [5] Bashkatova T.A., Kraev M.V. Producing hydrogen for rocket engines. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki*, 2010, vol. 1, no. 6, pp. 42–43. (In Russ.).
- [6] Buyanov R.A., Zel'dovich A.G., Pilipenko Yu.K. Liquefier for para-hydrogen production and catalysts for ortho-para-hydrogen conversion. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1961, vol. 6, pp. 188–190. (In Russ.).
- [7] Myuller B., Mayval'd M. *Turbinnaya ustanovka dlya krupnomasshtabnogo proizvodstva vodoroda* [Turbine plant for large-scale hydrogen production]. Patent no. RU 2331789 C2, 2003. (In Russ.).
- [8] Kardella U., Deker L., Klayn G. *Krupnomasshtabnoe szhizhenie vodoroda posredstvom vodorodnogo kholodil'nogo tsikla vysokogo davleniya, ob"edinennogo s novym predvaritel'nym okhlazhdeniem, odnokratno smeshannym khladgentom* [Large-scale hydrogen liquefaction via a high-pressure hydrogen refrigeration cycle combined with a new pre-cooling, once-mixed refrigerant]. Patent no. RU 2718378 C1, 2020. (In Russ.).
- [9] Morkovkin I.M., Kuz'menko I.F., Kashonkova E.A., Dukhanin Yu.I., Gurov E.I. *Sposob ozhizheniya vodoroda s gelievym kholodil'nym tsiklom i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for liquefying hydrogen with a helium refrigeration cycle and a device for its implementation]. Patent no. RU 2309342 C1, 2007. (In Russ.).
- [10] Shmatov D.P., Perevezentsev I.G., Ignatov A.S., Kruzhaev K.V., Khromykh M.I., Basharina T.A., Sergeev A.V., Kalyadin O.V., Afanas'ev A.A. *Ozhizhitel' vodoroda maloy proizvoditel'nosti* [Low capacity hydrogen liquefier]. Patent no. RU 2777680 C1, 2022. (In Russ.).

**Glebov S.E.** — Laboratory Researcher, LLC SPE “InterPolaris”, Novovoronezh, Russian Federation.

**Eltsov I.S.** — Laboratory Researcher, LLC SPE “InterPolaris”, Novovoronezh, Russian Federation.

**Basharina T.A.** — Leading Researcher, LLC SPE “InterPolaris”, Novovoronezh, Russian Federation.

**Ignatov A.S.** — Chief Designer, LLC SPE “InterPolaris”, Novovoronezh, Russian Federation.

**Shmatov D.P.** — Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Deputy Director for Scientific and Technical Development, LLC SPE “InterPolaris”, Novovoronezh, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Glebov S.E., Eltsov I.S., Basharina T.A., Ignatov A.S., Shmatov D.P. Hydrogen liquefier: using liquid hydrogen in the low performance applications. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 12 (89). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-956>