

СРАВНЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ В ЦИКЛАХ РЕКОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ ВОДОРОДА ДЛЯ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ ЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ*

И.А. Архаров, А.М. Архаров, Е.С. Навасардян*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Факультет энергетического машиностроения
стр. 1, д. 5, ул. 2-я Бауманская, Москва, 105005, Россия
тел.: +7 (499) 263-6827;
e-mails: ivanarkharov@yahoo.com, 20772@mail.ru, navasard@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.04-06.057-069

Заключение совета рецензентов: 25.12.17 Заключение совета экспертов: 12.01.18 Принято к публикации: 19.01.18

Серьезными сдерживающими факторами развития экологически чистой энергетики с применением водорода в качестве энергоносителя являются: высокая себестоимость производства водорода, несовершенные технологии транспортировки и хранения как жидкого, так и газообразного водорода, а также отсутствие логистических сетей снабжения и инфраструктуры топливных заправок. Например, транспортные расходы для сжатого газообразного водорода по стоимости сопоставимы, а иногда превышают стоимость его производства. При создании инфраструктуры производства жидкого водорода, транспортных логистических сетей его доставки, распределения и хранения вопросы безопасного бездренажного хранения жидкого водорода с минимальными потерями становятся первостепенными.

В статье рассматривались различные варианты организации конденсационных циклов с использованием холода типовых гелиевых рефрижераторов как при наличии, так и при отсутствии предварительного охлаждения жидким азотом основного потока водорода. Проведен анализ затрат работы в конденсационных и традиционных дроссельных циклах реконденсации паров водорода и выполнено их сравнение по этому показателю. Установлено, что включение второго детандера в схему гелиевого ожижителя не только приводит к росту капитальных затрат и усложняет ее технологически, но и незначительно снижает удельные затраты работы на конденсацию. Применительно к криогенным системам бездренажного хранения жидкого водорода на заправочных станциях и терминалах рассмотрены два начальных уровня температуры паров водорода, поступающих на конденсацию непосредственно из коллектора сбора при 300 К и из газового пространства криогенной емкости при 30 К. Сделан вывод о возможности и целесообразности применения типовых гелиевых рефрижераторов для организации реконденсационных циклов в системах бездренажного хранения путем включения их в общую структуру заправочных станций.

Ключевые слова: водород; хранение; заправочные станции; реконденсация; ожижение; орто-параконверсия; транспорт; инфраструктура.

COMPARISON OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION IN RECONDENSATION CYCLES FOR HYDROGEN VAPORS UTILIZATION IN CRYOGENIC SYSTEMS OF FILLING STATIONS

I.A. Arkharov, A.M. Arkharov, E.S. Navasardyan*

Bauman Moscow State Technical University, Faculty of Power Engineering
5/1 2-ya Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russia
тел.: +7 (499) 263 68 27; e-mails: ivanarkharov@yahoo.com, 20772@mail.ru, navasard@mail.ru

* Архаров И.А., Архаров А.М., Навасардян Е.С. Сравнение удельных затрат энергии в циклах реконденсации паров водорода для криогенных систем заправочных станций // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(04-06):57-69.

Serious constraining factors in the development of fuel hydrogen energy are: high production costs of hydrogen, ineffective technologies for transportation and storage of both liquid and compressed hydrogen, as well as the lack of logistic supply chains and fuel filling infrastructure. For example, transportation costs for compressed hydrogen gas are comparable with, and sometimes exceed the production costs. The safe drain free storage of hydrogen with minimal losses has a particular relevance when infrastructure for liquid hydrogen production, transport logistics chains for its delivery, distribution and storage are created.

The authors have considered the different schemes of the condensation cycles with the standard helium refrigerators, both with and without of precooling by liquid nitrogen of the main hydrogen stream. The paper gives the analysis of operating costs in condensing and traditional JT cycles of hydrogen vapor recondensation and compares them for this indicator. The connection of the second expander in the helium liquefier scheme is shown to lead not only to increase in the capital cost and complicate it technologically but also reduce the operation costs of the condensation process slightly. In case of cryogenic systems with the drain free storage of liquid hydrogen at filling stations and terminals, we have considered two temperature levels of the hydrogen vapor entering condenser directly from the vapor collector at 300 K and from the gas space of the cryogenic tank at 30 K. It is concluded that it is possible and expedient to use the standard helium refrigerators for the recondensation cycles in systems of drain free storage, by including them in the general structure of filling stations.

Keywords: hydrogen; storage; filling stations; recondensation; liquefaction; ortho-para conversion; transport; infrastructure.



Иван Алексеевич Архаров
Ivan Arkharov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, вице-президент комиссии А1 Международного Института холода (МИХ, Франция).

Награды: лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники.

Образование: МГТУ им. Н.Э. Баумана (1986 г.), МГУ им. М.В. Ломоносова (1988 г.).

Область научных интересов: криофизика; физика конденсированного состояния, физика твердого тела; термо- и гидродинамика процессов тепло- и массообмена в криогенных и химических аппаратах; разделение, очистка промышленных, редких и специальных газов; микрокриогенные машины и системы.

Публикации: более 140, в том числе 7 учебников и монографий.

RG Score: 9,65

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Full Professor in the Department of Refrigerating and Cryogenic Equipment, Conditioning and Life Support Systems of Bauman Moscow State Technical University, Vice-President of the commission A1 of the International Institute of Refrigeration (IIR, France).

Awards: Laureate of the RF Government Prize in the field of science and technology.

Education: the Bauman MSTU, 1986; the Lomonosov Moscow State University, 1989.

Research interests: cryophysics; condensed matter physics; solid state physics; thermal and hydro dynamics of heat and mass transfer processes in cryogenic and chemical apparatuses; separation, purification of industrial, rare and special gases; microcryogenic machines and systems.

Publications: more than 140 including 7 textbooks and monographs.



Алексей Михайлович
Архаров
Alexey Arkharov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, активный член различных научных организаций.

Награды: лауреат Государственных премий СССР и РФ, премий Правительства РФ и ряда государственных наград.

Образование: МГТУ им. Н.Э. Баумана (1954 г.).

Область научных интересов: термодинамика низкотемпературных процессов; термодинамические основы генерации холода; энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем.

Публикации: более 450, в том числе 18 учебников и монографий.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Full Professor in the department of Refrigerating and Cryogenic Equipment, Conditioning and Life Support Systems of Bauman Moscow State Technical University, an active member of various scientific organizations,

Awards: Laureate of the State Prizes of the USSR and the Russian Federation, prizes of the Government of the Russian Federation and a number of state awards.

Education: the Bauman MSTU, 1954.

Research interests: thermodynamics of low temperature processes; the thermodynamic fundamentals of the cold generation; entropy-statistical analysis of low temperature systems.

Publications: more than 450 including 18 textbooks and monographs.



Екатерина Сергеевна
Навасардян
Ekaterina Navasardyan

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Награды: медаль Петра Капицы Международного Института Холода как активному молодому ученому.

Образование: МГТУ им. Н.Э. Баумана (1999 г.).

Область научных интересов: физика твердого тела; микрокриогенные системы и машины; разделение и очистка газовых смесей; моделирование и симуляция процессов в тепло- и массообменных устройствах криогенных систем.

Публикации: более 60.
RG Score: 1,65.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor in the Department of Refrigerating and Cryogenic Equipment, Conditioning and Life Support Systems of Bauman Moscow State Technical University.

Awards: the Medal of Peter Kapitsa of the International Institute of Refrigeration for active young scientist.

Education: the BMSTU, 1999.

Research interests: solid state physics; microcryogenic systems and machines; separation and purification of gas mixtures; modeling and simulation of processes in heat and mass transfer devices of cryogenic systems.

Publications: more than 60.

Введение

Водород в качестве моторного топлива для двигателей транспортных систем, альтернативного нефтепроизводным дистиллятам, начали рассматривать с 30-х гг. XX в. В СССР одними из первых работ в этом направлении стали исследования профессора МВТУ им. Н.Э. Баумана В.И. Сороко-Новицкого, в которых изучалась работа двигателя ЗИС-5 на водородно-бензиновых смесях [1]. В настоящее время ДВС многих двигателестроительных компаний, например ЯМЗ, BMW, Mazda, Honda, достаточно хорошо адаптированы для работы на водородно-воздушных и водородно-бензиновоздушных смесях [2]. Кроме непосредственного сжигания водорода в камере сгорания ДВС, существует большое количество технических решений по использованию энергии водорода: топливные ячейки, электрохимические преобразователи и др., – при этом все эти способы предполагают газообразное фазовое состояние водорода. Наиболее распространенными являются физические и химические способы хранения газообразного водорода, и последние более пригодны для бортовых систем. Учитывая тот факт, что водород является самым легким химическим элементом, для хранения значительных объемов, типичных для заправочных станций и терминалов, его необходимо либо сжимать до сверхвысоких давлений более 40 МПа, либо сжижать и хранить при температурах ниже $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Подробный анализ систем хранения [3–5] показал, что фактически альтернативы криогенным хранилищам для заправочных станций не существует.

Мировое производство водорода в 2017 г. составило чуть более 60 млн т в год и по некоторым прогнозам может вырасти в 10–15 раз к 2050 г., главным образом за счет возобновляемых источников энергии [6, 7].

Значительные успехи в водородной энергетике достигнуты в таких направлениях, как производство электрической и тепловой энергии на стационарных установках малой мощности (до 10 кВт) на базе топ-

ливных элементов и батарей на их основе, а также гибридных установках (топливные элементы и газовая турбина) мощностью до 10 МВт; в топливных системах для воздушного, речного, железнодорожного и автомобильного транспорта; в крупнотоннажном ожижении и хранении водорода.

Кроме того, водород широко используется в технологических процессах производства аммиака и синтетических бензинов [2, 4, 8]. Сырьем для крупномасштабного производства водорода по-прежнему остаются углеводороды: уголь, нефть и природный газ, а основным процессом – каталитический риформинг [3, 5, 9]. Предпринимается множество попыток выделения водорода или синтез-газа (75 % H₂) из биогаза и гидридов, но они пока остаются в статусе экспериментальных, так как себестоимость водорода почти в два раза выше, чем получаемого в процессе риформинга.

В транспортной сфере успешно решены вопросы адаптации двигателей транспортных средств к работе на водородных смесях [1], их подготовки и заправки. Однако некоторые проблемы остаются до сих пор нерешенными.

1. Сохраняется высокая себестоимость производства водорода [10–12].

2. Технологии транспортировки и хранения водорода как на борту транспортного средства, так и в стационарных условиях до сих пор несовершенны. Например, транспортировка сжатого газообразного водорода по стоимости сопоставима, а иногда и превышает стоимость его производства [13–16]. А в случае криогенных баков возникают дополнительные требования по безопасности их обслуживания и эксплуатации.

3. Отсутствуют логистические сети снабжения и инфраструктура топливных заправок (газопроводные сети в Европе и в США обслуживают только химические производства).

4. Требуется разработка систем утилизации/реконденсации паров водорода на всех этапах логистической цепочки – от производства до выдачи потребителю.



В данной статье рассмотрены вопросы энергетической эффективности реконденсационных циклов на базе водородных и гелиевых ожижителей [17–18] с учетом особенностей размещения на водородных АЗС.

Особенностью систем реконденсации водорода на АЗС является необходимость конденсации как паров, возвращаемых из баков транспортных средств при температуре окружающей среды (О.С.), так и паров непосредственно в криогенном хранилище. Следует отметить, что жидкий водород как топливо состоит практически на 100 % из парамодификации [19–21], поэтому при реконденсации отвод теплоты конверсии не требуется. Для потребителей в топливную распределительную сеть жидкий водород поступает в виде пара-модификации и сохраняет рав-

новесный орто-парасостав не только при хранении, но и после газификации.

Перечисленные особенности обуславливают различные тепловые режимы работы ожижителя водорода и являются серьезными сдерживающими факторами развития водородной энергетики [22–24].

При создании инфраструктуры производства жидкого водорода, транспортных логистических сетей и сетей заправочных станций неизбежно возникают вопросы безопасного бездренажного хранения водорода с минимальными потерями [25]. В связи с этим анализ различных методов сжижения водорода как с позиции энергоэффективности и безопасности, так и простоты практической реализации весьма актуален.

Список обозначений	
<u>Буквы греческого алфавита</u>	
ρ	Плотность, кг/м ³
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
G	Расход, кг/с
h	Энтальпия потока, кДж/кг
L	Заграты энергии / работы, кДж/кг
l	Удельная работа, Дж/кг
P	Давление сжатия, МПа
p	Парамодификация водорода
Q	Тепловой поток из окружающей среды, Дж/ч
q	Тепловой поток, Вт
r	Теплота конденсации, Дж/кг
x	Доля получаемой жидкости от единицы подаваемого в систему ожижения газа
<u>Индексы нижние</u>	
LH_2	Жидкий водород
com	Компрессия (compression)
exp	Расширение (expansion)
l	Жидкость (liquid)
ext	Внешний (external)
<u>Аббревиатуры</u>	
АЗС	Автозаправочная станция
ДВС	Двигатель внутреннего сгорания
КГУ	Криогенная гелиевая установка
О.С.	Окружающая среда
ЯМЗ	Ярославский моторный завод

Теоретическая часть.

Анализ методов ожижения водорода

Ожижение водорода было впервые реализовано в 1898 г. Дж. Дьюаром, методом дросселирования в цикле с предварительным охлаждением водорода жидким воздухом. Циклы с дросселированием (однократным и двукратным) с предварительным охлаждением для ожижения водорода [26, 27] широко используются и в настоящее время как в крупнотоннажных ожижителях производительностью тысячи литров в час, так и в сравнительно небольших ожижителях производительностью порядка 100 л в час [28–30]. Поскольку дросселирование не является холодопроизводящим процессом в циклах [31, 32], даже при уменьшающейся температуре и образовании жидкой фазы (энтальпия при дросселировании

остается постоянной: $h = \text{constant}$), характерными условиями для ожижения водорода данным методом являются: необходимость сжатия водорода до давления порядка 10–12 МПа, отвода теплоты сжатия и использования внешнего предварительного охлаждения на уровне 70–80 К для увеличения дроссель-эффекта в зоне температур ниже температуры инверсии водорода. Предварительное внешнее охлаждение может осуществляться разными способами: с помощью жидких воздуха или азота, или дополнительного внешнего низкотемпературного цикла с рабочими телами – воздухом или азотом. Для крупнотоннажных ожижителей водорода характерными являются комбинированные циклы с дроссельными и детандерными ступенями. При сравнении различных циклов для ожижения водорода обычно используют так называемый коэффициент ожижения (x – доля получаемой



жидкости от единицы подаваемого в систему ожижения газа). Применение низкотемпературных и особенно парожидкостных детандеров позволяет повысить коэффициент ожижения и, соответственно, снизить себестоимость производства жидкого водорода.

Ожижение водорода методом конденсации возможно посредством гелиевых рефрижераторов, способных обеспечить охлаждение Н₂ до температуры 5÷20 К. Сжатия водорода до высоких давлений при этом не требуется: водород подается в гелиевую систему охлаждения и конденсации нагнетателем для преодоления гидравлических сопротивлений в водородных каналах. Для этого достаточно очень небольшого избыточного давления, что значительно снижает эксплуатационные и технологические риски при ожижении водорода. С принципиальных позиций не требуется и предварительного внешнего охлаждения водорода, так как, например, выделяющаяся теплота орто-параконверсии на любом температурном уровне водородного потока и внешние теплопритоки могут компенсироваться холодопроизводительностью гелиевого цикла. При этом требуется увеличение количества гелия, циркулирующего в цикле, и возрастает затраченная работа. Следует отметить, что внешнее предварительное охлаждение в гелиевом цикле может рационально применяться, но принципиально не требуется. Для уменьшения энергозатрат, кроме классического цикла Клода – Сименса в гелиевом цикле, может быть задействовано несколько детандерных ступеней, в частности, установка второго детандера на уровне 60÷80 К и дополнительных второго и третьего орто-параконверторов на уровнях 70÷80 К и 120÷130 К. Примечательно, что метод конденсации использовался в некоторых лабораториях разных стран еще в 50 гг. XX века, но широкого промышленного применения пока не получил.

Сравнивать методы ожижения водорода (дросселирование и конденсация) по коэффициенту (x) невозможно, поскольку его теоретическое значение для криосистем с конденсацией водорода равно единице (x = 1).

Самым надежным и объективным критерием сравнительной оценки эффективности этих двух методов является сумма удельных значений затрат энергии для получения одного литра жидкого параводорода [МДж/л п-Н₂] или [кВт·ч/л п-Н₂].

Экспериментальная часть

Анализ ожижения водорода методом конденсации

Вначале рассмотрим реконденсацию паров параводорода в одноступенчатой гелиево-водородной

криосистеме с одним детандером в гелиевом цикле (классический цикл Клода – Сименса), принципиальная схема которого представлена на рис. 1. Проведенные расчеты показывают, что при степени сжатия в гелиевом цикле, равном 20 (от 0,1 до 2,0 МПа), адиабатном КПД детандера, равном 0,75, и изотермическом КПД гелиевого компрессора, равном ~ 0,6, удельные затраты энергии на конденсацию по этой схеме с учетом энергии расширения в детандере составляют приблизительно 3,4 МДж/л п-Н₂. Работа расширения в расчетах составила ~75,9 Дж/г.

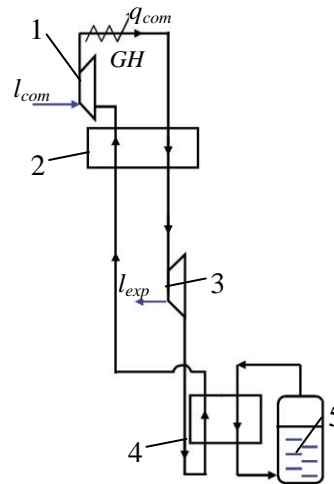


Рис. 1 – Цикл реконденсации паров параводорода в криогенном хранилище с помощью гелиевого рефрижератора при ~ 30 К: 1 – компрессор; 2, 4 – теплообменники; 3 – детандер; 5 – резервуар
Fig. 1 – Recondensation cycle based on helium refrigerator for parahydrogen vapors liquefaction in a cryogenic storage tank at ~ 30 K: 1 – compressor; 2, 4 – heat exchanger; 3 – expander; 5 – storage tank

Необходимо отметить, что этот цикл может быть использован и для снятия внешних теплопритоков к самому хранилищу жидкого параводорода при соответствующих конструктивных изменениях в низкотемпературной части схемы. Например, гелий после детандера должен направляться не в конденсатор, а во внутренние гелиевые экраны или в своего рода «гелиевую рубашку» вокруг хранилища жидкого параводорода. Кроме того, этот простой цикл вполне пригоден и для поддержания состояния твердой фазы в хранилищах шугообразного параводорода. При одинаковых теплопритоках расход энергии во всех случаях будет находиться на том же уровне, что и для реконденсации. Внешний теплоприток при производительности реконденсатора 1 л п-Н₂/ч можно оценить следующим образом:

$$Q_{ext} = \rho_{l, H_2} \cdot r \cdot 1 \left[\frac{\text{л}}{\text{ч}} \right] = 70,8 \left[\frac{\text{г}}{\text{л}} \right] \cdot 447 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{г}} \right] \cdot 1 \left[\frac{\text{л}}{\text{ч}} \right] = 31647,6 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{ч}} \right]$$

или $q_{ext} = \frac{31647,6}{3600} \approx 8,8 \text{ Вт}$.



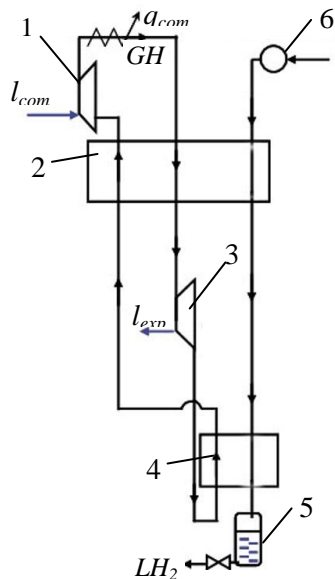


Рис. 2 – Цикл реконденсации паров параводорода, поступающих от систем сбора паров на АЗС с помощью гелиевого рефрижератора при ~ 300 К: 1 – компрессор; 2, 4 – теплообменник; 3 – детандер; 5 – резервуар для хранения; 6 – водородная газодувка
Fig. 2 – Recondensation cycle based on helium refrigerator for liquefaction of para-hydrogen vapors coming at ~ 300 K from gas collection system of filling stations: 1 – compressor; 2, 4 – heat exchanger; 3 – expander; 5 – storage tank; 6 – hydrogen gas blower

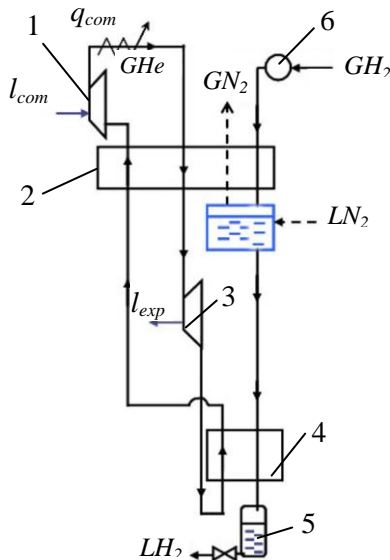


Рис. 3 – Цикл реконденсации с предварительным азотным охлаждением паров параводорода, поступающих от систем сбора паров на АЗС с помощью гелиевого рефрижератора при ~ 300 К: 1 – компрессор; 2 – теплообменник; 3 – детандер; 4 – конденсатор; 5 – резервуар для хранения; 6 – водородная газодувка
Fig. 3 – Recondensation cycle with LN_2 pre-cooling and based on helium refrigerator for liquefaction of parahydrogen vapors coming from gas collection system of filling stations at ~ 300 K: 1 – compressor; 2 – heat exchanger; 3 – expander; 4 – condenser; 5 – storage tank; 6 – hydrogen gas blower

Гелиевый цикл с одним детандером пригоден и для реконденсации паров параводорода с начальным

охлаждением водорода от 300 К до 20 К и последующей конденсацией при низком давлении, то есть без его сжатия (рис. 2.).

Однако расчеты показывают, что при этом требуется увеличение не только количества гелия в цикле, но и, что особенно существенно, увеличение степени сжатия гелия в цикле до 20 (от 0,1 до 2,0 МПа). В итоге удельный расход энергии на ожижение существенно увеличивается (в 6,8 раза), а этот метод становится экономически невыгодным, правда, сохраняет свою привлекательность простотой, особенно при использовании стандартных, коммерчески доступных ожижителей гелия. Для повышения эффективности гелиево-водородной криосистемы для ожижения водорода методом конденсации вводится предварительное охлаждение. Возможна организация предварительного охлаждения с помощью жидкого азота (рис. 3). Как показывают расчеты, в этом случае удельные затраты энергии, с учетом затрат энергии на ожижение азота, составляют $\approx 13,3$ МДж/лжН₂.

При отсутствии возможности организации предварительного охлаждения за счет внешнего криоагента (жидкого азота), типовым решением является установка дополнительного детандера (рис. 4). Однако в данном случае это не приводит к повышению эффективности цикла, так как требует не только конструктивного усложнения схемы, но и увеличения давления сжатия гелия в рефрижераторном цикле до 4,0 МПа. При численном анализе схемы ожижения (см. рис. 4) получено значение удельных затрат энергии $\approx 54,1$ МДж/лжН₂.

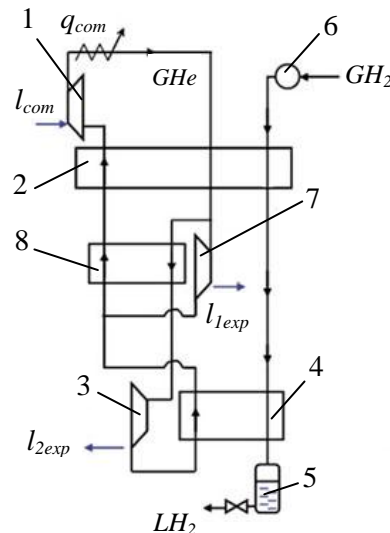


Рис. 4 – Цикл реконденсации паров параводорода, поступающих от систем сбора паров на АЗС с помощью гелиевого рефрижератора с двумя детандерами при ~ 300 К: 1 – компрессор; 2, 8 – теплообменник; 3, 7 – детандер; 4 – конденсатор; 5 – резервуар для хранения; 6 – водородная газодувка
Fig. 4 – Recondensation cycle based on helium refrigerator with two expanders for liquefaction of parahydrogen vapors coming from gas collection system of filling stations at ~ 300 K: 1 – compressor; 2, 8 – heat exchanger; 3, 7 – expander; 4 – condenser; 5 – storage tank; 6 – hydrogen gas blower



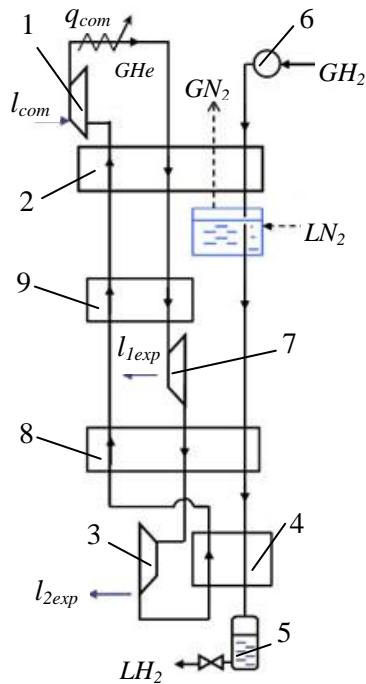


Рис. 5 – Цикл реконденсации паров параводорода, поступающих от систем сбора паров на АЗС с помощью гелиевого рефрижератора с двумя детандерами и предварительным азотным охлаждением при 300 К: 1 – компрессор; 2, 8, 9 – теплообменник; 3, 7 – детандер; 4 – конденсатор; 5 – резервуар для хранения; 6 – водородная газодувка
Fig. 5 – Recondensation cycle with LN₂ precooling and based on helium refrigerator with two expanders for liquefaction of parahydrogen vapors coming from gas collection system of filling stations at ~ 300 K: 1 – compressor; 2, 8, 9 – heat exchanger; 3, 7 – expander; 4 – condenser; 5 – storage tank; 6 – hydrogen gas blower

Самым радикальным способом сокращения затрат энергии на ожижение водорода является совмещение в одной криосистеме предварительного азотного охлаждения и включения в гелиевый цикл двух детандеров (рис. 5). При оптимальных параметрах криосистемы удельные затраты энергии ≈ 9,97 МДж/лжH₂.

Если для реконденсации паров параводорода в хранилищах использовать конденсационный цикл с гелиевым рефрижератором с двумя детандерами (см. рис. 4 и 5), то капитальные затраты для обеих схем вырастут весьма существенно по причине большей сложности и стоимости гелиевой системы, а значения удельных затрат энергии на реконденсацию по схеме на рис. 5 снижаются незначительно по сравнению со схемой на рис. 3, а по схеме на рис. 4 даже возрастают.

Анализ ожижения водорода методом дросселирования

Циклы с дросселированием для ожижения нормального водорода хорошо изучены и описаны в литературе (см., например, [31, 32]).

Диапазон значений удельных затрат энергии на ожижение водорода методом дросселирования находится в интервале 11,5 ÷ 30 МДж/лжH₂. В технологическом отношении эти схемы сложнее, так как требуют сжатия водорода до 8 МПа и более при одновременном использовании предварительного азотного охлаждения. Схемы и параметры самых распространенных циклов с дросселированием (рис. 6а и 6б) представлены в сводной табл. 1.

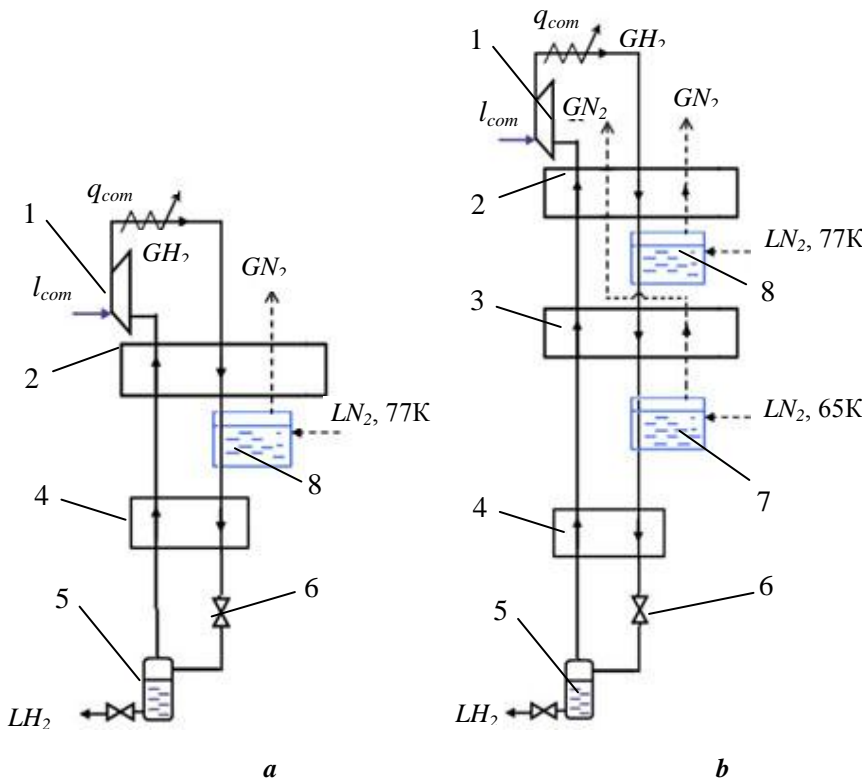


Рис. 6 – Циклы с дросселированием для реконденсации паров параводорода, поступающих от систем сбора паров на АЗС с предварительным азотным охлаждением при ~ 300 К: 1 – компрессор; 2–4 – теплообменник; 5 – резервуар для хранения; 6 – дроссельный вентиль; 7, 8 – ванна с жидким азотом (а – предварительное охлаждение на уровне 77 К; б – последовательное предварительное охлаждение на уровнях 77 К и 65 К)
Fig. 6 – JT cycles with multistage LN₂ precooling for recondensation of parahydrogen vapors coming from gas collection systems of filling stations at ~ 300 K: 1 – compressor; 2–4 – heat exchanger; 5 – storage tank; 6 – JT valve; 7, 8 – liquid nitrogen bath (а – precooling at 77 K; б – double stage precooling at 77 K and 65 K)



Таблица 1

Энергетические характеристики циклов реконденсации паров водорода

Table 1

Specific energy consumption of hydrogen vapor recondensation cycles

Схема цикла (№ рисунка)	P_{com} МПа	L_{com} кДж/кг	L_{exp} кДж/кг	G_{N_2} , кг/кг ж. H ₂	L_{Σ} , кДж/кг	l	
						МДж/кг ж. H ₂	МДж/лж. H ₂
1	2,0	4803,6	75,98	–	4727,6	47,9	3,4
2	2,0	4806,6	76,18	–	4730,5	325,0	23,0
3	2,0	4807,4	76,18	4,3	5271,8	187,8	13,3
4	4,0	7007,6	288,0	–	6921,2	764,1	54,1
5	2,0	4805,9	99,0	7,9	6300,2	140,9	10,0
6a	8,0	14546,9	–	27,1	32865,5	219,1	15,5
6b	8,0	14550,5	–	21,4	35689,1	162,2	11,5
7	2,5	8788,4	471,2	50,3	41663,9	285,4	20,2
8	3,0	9720,0	–	148,1	12861,7	163,4	11,6
	3,5	3141,7	213,9				

Работа на получение жидкого азота принята 4,5 МДж/кг
 Плотность жидкого водорода – $70,8 \cdot 10^{-3}$ кг/л (при $T = 20\text{K}$ и $P = 0,1$ МПа)

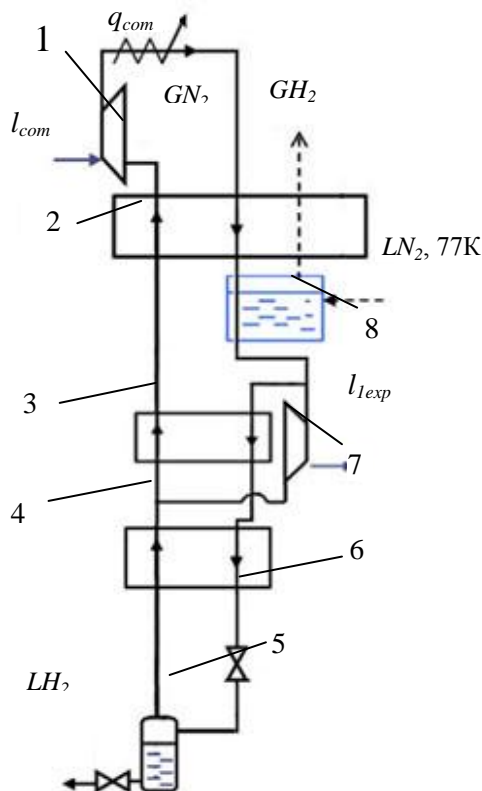


Рис. 7 – Цикл реконденсации с детандером и дросселем для сжижения паров параводорода, поступающих от систем сбора паров на АЗС при ~ 300 К:
 1 – компрессор;
 2, 3, 4 – теплообменник; 5 – резервуар для хранения;
 6 – дроссельный вентиль; 7 – детандер;
 8 – ванна с жидким азотом

Fig. 7 – Recondensation cycle with expander and JT-valve for liquefaction of parahydrogen vapors coming from gas collection systems of filling stations at ~ 300 K:
 1 – compressor; 2, 3, 4 – heat exchanger;
 5 – storage tank; 6 – JT valve;
 7 – expander; 8 – liquid nitrogen bath

Анализ ожижения водорода комбинированным методом

Для решения задачи реконденсации паров параводорода возможно применение комбинированных схем, реализованных в промышленных ожижителях водорода.

Схема рис. 7 включает три последовательных

ступени охлаждения и предполагает применение водородного детандера. Удельные затраты энергии составляют 20,2 МДж/л ж H₂ (основные характеристики цикла см. в табл. 1).

Схема рис. 8 [33] включает два контура – гелиевый и водородный, но в отличие от схем рис. 1–5 предполагает сжатие паров водорода до давления ~ 3МПа.

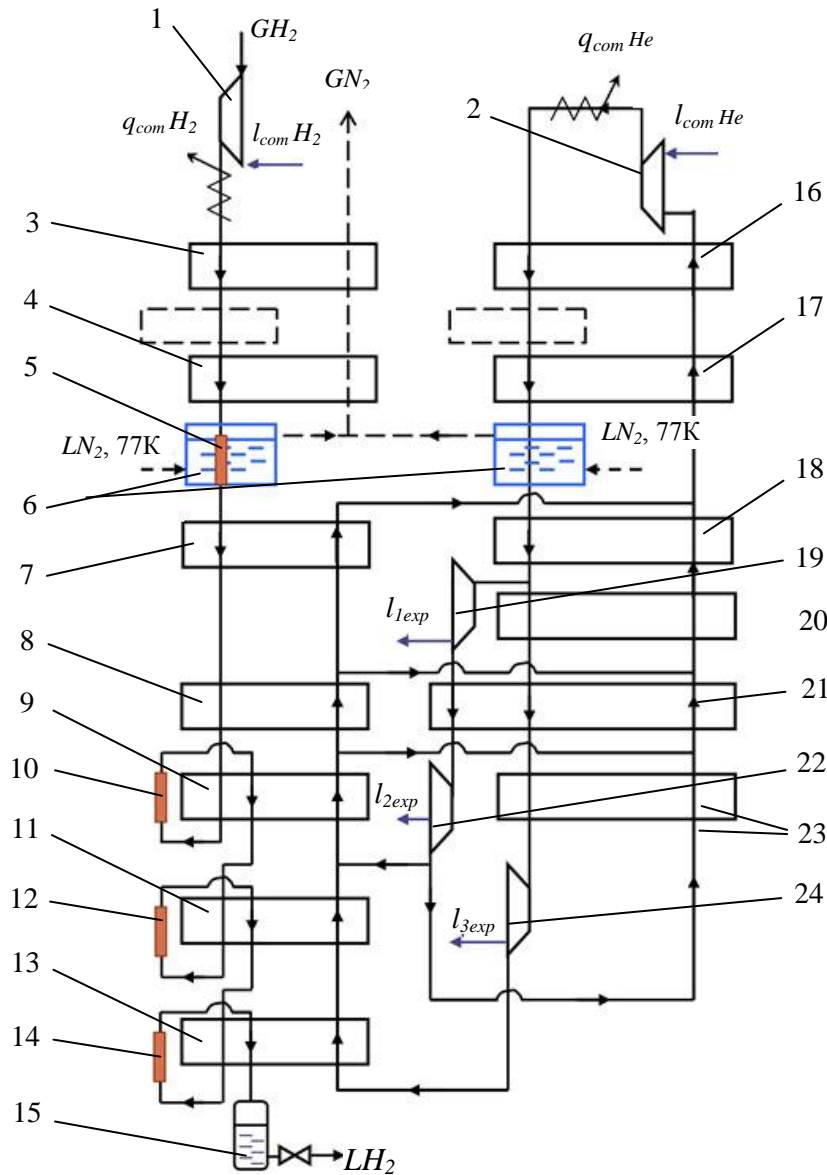


Рис. 8 – Цикл ожижения нормального водорода [33] при помощи гелиевого рефрижератора с детандерами и предварительным азотным охлаждением: 1 – водородный компрессор; 2 – гелиевый компрессор; 3, 4, 7–9, 11, 13, 16–18, 20, 21, 23 – теплообменник; 5 – конвертер (ступень 1); 6 – ванна с жидким азотом; 10 – конвертер (ступень 2); 12 – конвертер (ступень 3); 14 – конвертер (ступень 4); 15 – резервуар; 19, 22, 24 – детандеры

Fig. 8 – Liquefaction cycle of normal hydrogen [33] using a helium refrigerator with multi expanders and LN_2 precooling: 1 – hydrogen compressor; 2 – helium compressor; 3, 4, 7–9, 11, 13, 16–18, 20, 21, 23 – heat exchanger; 5 – converter (stage 1); 6 – liquid nitrogen bath; 10 – converter (stage 2); 12 – converter (stage 3); 14 – converter (stage 4); 15 – storage tank; 19, 22, 24 – expanders

Достоинством данной схемы является возможность отвода теплоты конверсии и теплопритоков на четырёх температурных уровнях (77 К, 45 К, 35 К, 20 К), но повышенная сложность и использование трех детандеров в гелиевом контуре делает ее малоприменимой для систем реконденсации на АЗС.

Результаты и их обсуждение

Несмотря на то что все рассмотренные циклы ожижения водорода принципиально пригодны для решения задачи реконденсации паров в хранилищах жидкого водорода на заправочных станциях АЗС и терминалах, удельные затраты энергии в них существенно отличаются (см. табл. 1). Характеристики промышленных ожижителей водорода представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики некоторых промышленных ожижителей водорода средней и большой производительности

Table 2

Parameters of some high and midi capacity industrial hydrogen liquefiers

Производитель	Модель	Выход жидкого H ₂ , л/ч	G _{N₂} , кгжN ₂ /кгж.H ₂	l		Примечание
				МДж/кгж.H ₂	МДж/лж.H ₂	
НПО «Гелиймаш», Россия	–	70,6	28,0	277,2	19,6	Ожижители на базе КГУ 150, КГУ 250 [34]
Air Liquide, Франция	Hylial 600	600	7,6	80,9	5,72	[35]
	Hylial 800	800	8,0	79,9	5,63	
	Hylial 1500	1500	8,2	79,6	5,64	
Praxair. Inc., США	–	300	7,5	84,2	5,96	[36]

Анализ таблиц показывает, что промышленные ожижители водорода большой производительности, работающие по циклам аналогичным рис. 3, имеют наилучшие энергетические показатели (рис. 9), главным образом за счет снижения удельных затрат энергии на предварительное охлаждение.

Следует отметить, что для систем реконденсации паров водорода даже крупных хранилищ на АЗС производительность ожижителя лежит в диапазоне 5 ÷ 50 л ж H₂/ч и предполагает периодическую работу, что увеличивает затраты энергии на реконденсацию.

MJ/(l LH₂), МДж/лжH₂

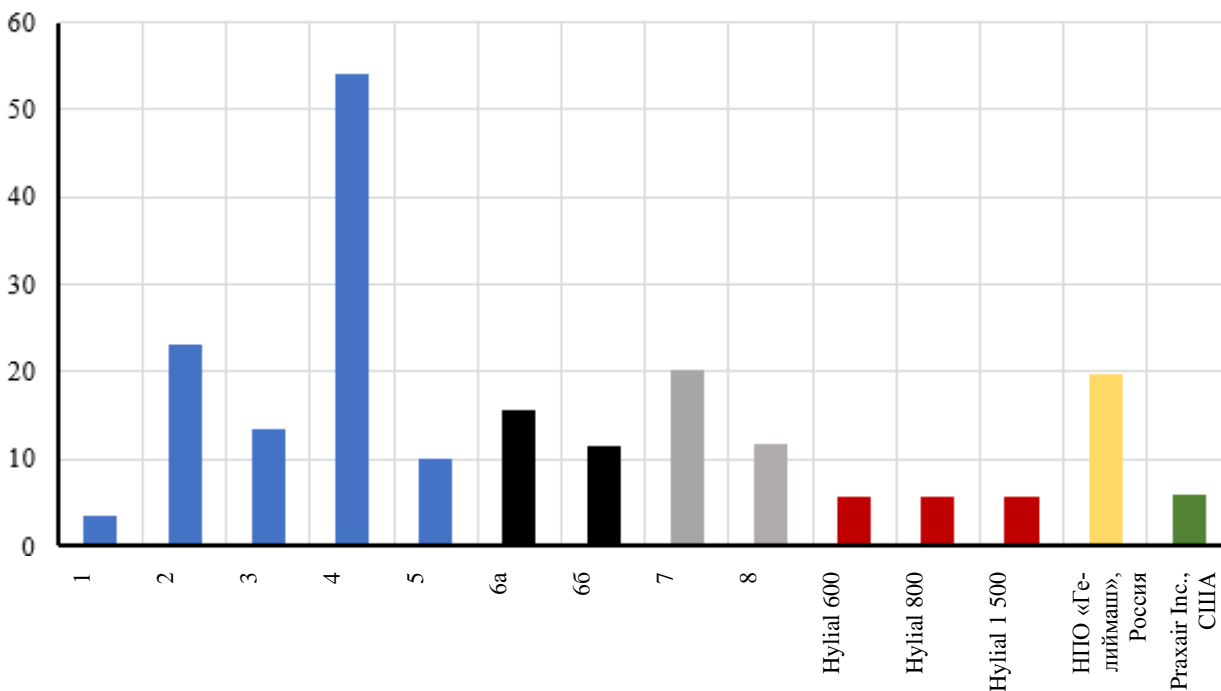


Рис. 9 – Сравнение удельных затрат энергии на ожижение водорода в различных циклах (см. табл. 1 и 2): 1 – цикл рис. 1; 2 – цикл рис. 2; 3 – цикл рис. 3; 4 – цикл рис. 4; 5 – цикл рис. 5; 6a – цикл рис. 6a; 6b – цикл рис. 6b; 7 – цикл рис. 7; 8 – цикл рис. 8

Fig. 9 – Comparison of the specific energy consumption for hydrogen liquefaction in different cycles (Table 1, Table 2): 1 – cycle of Fig. 1; 2 – cycle of Fig. 2; 3 – cycle of Fig. 3; 4 – cycle of Fig. 4; 5 – cycle of Fig. 5; 6a – cycle of Fig. 6a; 6b – cycle of Fig. 6b; 7 – cycle of Fig. 7; 8 – cycle of Fig. 8

В случае автономных АЗС, для того чтобы не зависеть от поставок жидкого азота и затрат на него, целе-

сообразно организовывать реконденсацию паров водорода по схемам циклов, изображённых на рис. 1, 2 и 3.

В случае крупных хранилищ (терминалов) рационально создавать комбинированные криосистемы со схемой цикла аналогичной тем, что изображены на рис. 3 и 7, или использовать стандартные водородные ожижители (см. табл. 2).

Заключение

Особенностью криогенных хранилищ жидкого водорода в составе заправочных комплексов, станций и терминалов является отсутствие возможности дренажа паров водорода в атмосферу и необходимость их утилизации, особенно если заправочные станции расположены в черте населенных пунктов. Дренаж допускается в транспортных ж/д и автоемкостях, однако под постоянным контролем сопровождающего персонала, следящего за уровнем давления в резервуаре. К проблемам сетевого снабжения жидким водородом относится существенная удаленность заправочных станций от завода по производству и ожижению водорода, поэтому организация централизованного сбора и утилизации паров не представляется возможной. В автономных системах (системы хранения, газификации, передачи газообразного и жидкого водорода), размещаемых как в составе наземной распределенной инфраструктуры заправочных станций, так и в составе бортовых систем, проблема сбора и утилизации паров также не решена, что серьезно сдерживает развитие именно топливной водородной энергетики. Авторам данной статьи представляется рациональным включение систем утилизации паров водорода непосредственно в структуру заправочных станций.

К настоящему времени гелиевая техника достигла промышленного уровня развития, и появились коммерчески доступные гелиевые рефрижераторы различной производительности, работающие полностью в автоматическом режиме, при этом их стоимость непрерывно снижается. Проведенные авторами исследования показывают, что меньшие значения удельных затрат энергии имеет конденсационный способ утилизации паров водорода, реализуемый в схемных решениях на базе стандартных циклов гелиевых рефрижераторов (48 МДж/кг, 188 МДж/кг, 141 МДж/кг ж H₂ соответственно).

Реконденсация паров как способ утилизации находит новые решения и побуждает к более внимательному анализу вариантов технической реализации для ожижения паров водорода и сравнению их по экономическим и технологическим показателям.

Список литературы

- [1] Сороко-Новицкий, В.И. Двигатели легкого топлива [Текст] / В.И. Сороко-Новицкий, В.А. Петров // М.: ОНТИ-НКТП, 1938. – 256 с.
- [2] Александров, А.А. Альтернативные виды топлива для двигателей внутреннего сгорания [Текст] / А.А. Александров [и др.]. – М.: ООО НИЦ «Инже-

нер», 2012. – 790 с.

[3] Гамбург, Д.Ю. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение [Текст] / Д.Ю. Гамбург. – М.: Химия, 1989. – 672 с.

[4] Домашенко, А.М. Жидкий водород в проблеме «Водородная энергетика» [Текст] / А.М. Домашенко, Ю.В. Горбатский // Энергия: экономика, техника, экология. – 2006. – Т. 7. – С. 13–19.

[5] Domashenko, A. Production, storage and transportation of liquid hydrogen. Experience of infrastructure development and operation [Text] / A. Domashenko [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2002. – Vol. 27. – No 7–8. – P. 753–755.

[6] Peschka, W. Liquid Hydrogen. Fuel of future [Text] / W. Peschka. – Wien: Springer-Verlag, 1992. – 303 p.

[7] Fleck, U. Liquid hydrogen – a clean energy? [Электронный ресурс] / U. Fleck, A. Kundig. – Режим доступа: <http://www.linde-engineering.pt/en/> – (Дата обращения: 02.12.2107)

[8] Gavriluk, A. Hydrogen energy for beginners [Text] / A. Gavriluk. – Pan Stanford, 2013. – 344 p.

[9] Kinard, G.E. The commercial use of liquid hydrogen over the last 40 years [Text] / G.E. Kinard // Proceedings of the 17th International Cryogenic Engineering Conference. – Bournemouth, UK, Institute of Physics, 1998.

[10] Iwamoto, K. Theoretical Calculation of the Large Hydrogen Liquefaction Process [Text] / K. Iwamoto // Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference. – 1997. – P. 155–158.

[11] Strobridge, T.R. Cryogenic refrigerators-an updated survey / T.R. Strobridge. – U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1974. – 11 p.

[12] Yang, C. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode [Text] / C. Yang, J. Ogden // International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – Vol. 32. – P. 268–286.

[13] Wang, Sh. CO₂ reforming of methane on Ni catalysts: Effects of the support phase and preparation technique / Wang Sh., G.Q.M. Lu [Text] // Applied Catalysis B: Environmental. – 1998. – Vol. 16. – Iss. 3. – P. 269–277.

[14] Ogden, J.M., Yang C, Nicolas M.A. Technical and Economic Assessment of Regional Hydrogen Transition Strategies [Электронный ресурс] / J.M. Ogden, C. Yang, M.A. Nicolas. – Режим доступа: <https://escholarship.org/uc/item/46f8215p#metrics> – (Дата обращения: 02.11.2017).

[15] Krasae-in, S. Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009 [Text] / S. Krasae-in, J. Stang, P. Neksa // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – Vol. 35. – P. 4524–4533.

[16] Bischoff, S. First operating results of a dynamic gas bearing turbine in an industrial hydrogen liquefier [Text] / S. Bischoff, L. Decker // Advances in Cryogenic Engineering. – 2017. – Vol. 55. – P. 887–894.

[17] Ohira, K. A Summary of liquid hydrogen and cryogenic technologies in Japan's [Text] / K. Ohira //



WE-NET Project. Proc. of the Cryogenic Engineering Conference. – 2004. – Vol. 49. – P. 27–34.

[18] Leachman, J. Fundamental EOS for Parahydrogen, Normal Hydrogen and Orthohydrogen [Text] / J. Leachman [et al.] // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 2009. – Vol. 38. – No 3. – P. 721–748.

[19] Streett, W. Liquid Phase Separation and Liquid–Vapor Equilibrium in the System Neon–Hydrogen [Text] / W. Streett, C. Jones // J. Chem. Phys. – 1965. – Vol. 42. – No 11. – P. 3989–3994.

[20] Heck, C. Liquid-vapor phase equilibria of the neon-normal hydrogen system [Text] / C. Heck, P. Barrick // Cryogenic Engineering. – 1965. – Vol. 11. – P. 349–355.

[21] Quack, H. Conceptual design of a high efficiency large capacity hydrogen liquefier [Text] / H. Quack // Proc. of the Cryogenic Engineering Conference Madison. – 2001. – Vol. 47A. – P. 255–263.

[22] Integrated Design for Efficient Advanced Liquefaction of Hydrogen [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fch.europa.eu/project/integrated-design-efficient-advanced-liquefaction-hydrogen> – (Дата обращения: 01.10.2017).

[23] Couper, J. Process Engineering Economics [Text] / J. Couper, M. Dekker. – New York: CRC Press, 2003. – P. 384.

[24] Cardella, U. Economically viable large-scale hydrogen liquefaction [Электронный ресурс] / U. Cardella, L. Decker, H. Klein. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/171/1/012013/pdf> – (Дата обращения: 15.09.2017).

[25] Russell, B.S. Cryogenic engineering. Princeton: Met Chemical Research [Text] / B.S. Russell. – 1988. – 368 p.

[26] Архаров, И.А. Теория и расчёт циклов криогенных систем [Текст] / И.А. Архаров, А.А. Александров, Е.С. Навасардян. – М.: МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2009. – 159 с.

[27] Архаров, И.А. Примеры и задачи по циклам криогенных систем [Текст] / И.А. Архаров, А.А. Александров, Е.С. Навасардян. – М.: МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2009. – 47 с.

[28] Александров, А.А. Машины и аппараты криогенных систем [Текст] / А.А. Александров, И.А. Архаров, Е.С. Навасардян. – М.: МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2014. – 48 с.

[29] Александров, А.А. Машины и аппараты криогенных систем [Текст] / А.А. Александров, И.А. Архаров, Е.С. Навасардян. – М.: МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2009. – 124 с.

[30] Frederking, T.H.K. Cryogenics: low temperature engineering and applied science [Text] / T.H.K. Frederking. – Santa Monica, Calif.: Yutopian Enterprises, 2005. – 202 p.

[31] Arkharov, A.M. Cryogenic systems: 2 vols. [Text] / A.M. Arkharov [et al.]. – Bauman Moscow State Technical University Press, 2000, 2001. – 518 p.

[32] Timmerhaus, K.D. Cryogenic engineering

[Text] / K.D. Timmerhaus, R.P. Reed. – Wien: Springer-Verlag. 2007. p. 379. (in Eng.)

[33] Патент F25J1/02; F25J5/00 РФ (№2309342). Морковкин И.М., Кузьменко И.Ф., Кашонкова Е.А., Духанин Ю.И., Гуруев Е.И. Способ ожижения водорода с гелиевым холодильным циклом и устройство для его осуществления. 27.10.2007.

[34] Ожижитель водорода. Криогенные гелиевые установки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geliymash.ru/products/124/540/> – (Дата обращения: 22.11.2017).

[35] Range of automatic hydrogen liquefiers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://advancedtech.airliquide.com/sites/abt_at/files/2017/10/20/hyial_brochure_en_09.17_sd.pdf – (Дата обращения: 22.11.2017).

[36] West, J.E. The economics of small to medium liquid hydrogen facilities [Text] / J.E. West // CryoGas International. – 2003. – May. – P. 28–33.

References

[1] Soroko-Novitskiy V.I., Petrov V.A. Light Fuel Engines (Dvigateli legkogo topliva). Moscow: ONTI-NKTP. 1938 (in Russ.).

[2] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Bagrov V.V. [et al.]. Alternative fuels for internal combustion engines (Alternativnyie topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya). Moscow: OOO NITs “Inzhener” Publ., 2012 (in Russ.).

[3] Gamborg D.U. Hydrogen. Properties, reception, storage, transportation, application (Vodorod. Svoystva, poluchenie, hranenie, transportirovanie, primeneniye). Moscow: Himiya Publ., 1989 (in Russ.).

[4] Domashenko A.M., Gorbatskiy Yu.V. Liquid hydrogen in the problem “Hydrogen energy” (Zhidkiy vodorod v probleme “Vodorodnaya energetika”). *Energiya: ekonomika, tehnika, ekologiya*. 2006;7:13–19 (in Russ.).

[5] Domashenko A., Golovchenko A., Gorbatskiy Yu. et al. Production, storage and transportation of liquid hydrogen. Experience of infrastructure development and operation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2002;27(7–8):753–755 (in Eng.).

[6] Peschka W. Liquid Hydrogen. Fuel of future. Wien: Springer-Verlag, 1992 (in Eng.).

[7] Fleck U., Kundig A. Liquid hydrogen - a clean energy? Available on: <http://www.linde-engineering.pt/en/> (02.12.2107) (in Eng.).

[8] Gavrilyuk A. Hydrogen energy for beginners. Pan Stanford, 2013 (in Eng.).

[9] Kinard G.E. The commercial use of Liquid Hydrogen Over The Last 40 Years. *Proceedings of the 17th International Cryogenic Engineering Conference*, Bournemouth, UK, Institute of Physics, 1998 (in Eng.).

[10] Iwamoto K. Theoretical Calculation of the Large Hydrogen Liquefaction Process. *Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Confer-*



ence/International Cryogenic Materials Conference, 1997, pp. 155–158 (in Eng.).

[11] Strobridge T.R. Cryogenic refrigerators-an updated survey. U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1974; 11 p. (in Eng.).

[12] Yang C, Ogden J. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007;32:268–286 (in Eng.).

[13] Wang Sh., Lu G.Q.M. CO₂ reforming of methane on Ni catalysts: Effects of the support phase and preparation technique. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1998;16(3):269–277 (in Eng.).

[14] Ogden J.M., Yang C, Nicolas M.A. Technical and Economic Assessment of Regional Hydrogen Transition Strategies. Available on: <https://escholarship.org/uc/item/46f8215p#metrics> (accessed 02.11.2017) (in Eng.).

[15] Krasae-in S, Stang J., Neksa P. Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010;35:4524–4533 (in Eng.).

[16] Bischoff S., Decker L. First operating results of a dynamic gas bearing turbine in an industrial hydrogen liquefier. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2017;55:887–894 (in Eng.).

[17] Ohira K. A Summary of liquid hydrogen and cryogenic technologies in Japan's. WE-NET Project. *Proc. of the Cryogenic Engineering Conference*, 2004,49:27–34 (in Eng.).

[18] Leachman J., Jacobsen R., Penoncello S., Lemmon E. Fundamental EOS for Parahydrogen, Normal Hydrogen and Orthohydrogen. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2009;38(3):721–748 (in Eng.).

[19] Streett W., Jones C. Liquid Phase Separation and Liquid–Vapor Equilibrium in the System Neon–Hydrogen. *J. Chem. Phys.*, 1965;42(11):3989–3994 (in Eng.).

[20] Heck C., Barrick P. Liquid-vapor phase equilibria of the neon-normal hydrogen system. *Cryogenic Engineering*, 1965;11:349–355 (in Eng.).

[21] Quack H. Conceptual design of a high efficiency large capacity hydrogen liquefier. *Proc. of the Cryogenic Engineering Conference* Madison, 2001;47A:255–263 (in Eng.).

[22] Integrated Design for Efficient Advanced Liquefaction of Hydrogen. Available on: <http://www.fch.europa.eu/project/integrated-design-efficient-advanced-liquefaction-hydrogen> (accessed 01.10.2017) (in Eng.).

[23] Couper J., Dekker M. Process Engineering Economics. New York: CRC Press, 2003 (in Eng.).

[24] Cardella U., Decker L., Klein H. Economically viable large-scale hydrogen liquefaction. Available on: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/171/1/012013/pdf> (accessed 15.09.2017) (in Eng.).

[25] Russell B.S. Cryogenic engineering. Princeton: Met Chemical Research, 1988 (in Eng.).

[26] Arkharov I.A., Aleksandrov A.A., Navasardyan E.S. Theory and calculation of cryogenic system cycles (Teoriya i raschet tsiklov kriogennykh sistem). Moscow: MGTU Im. N.E. Baumana, 2009 (in Russ.).

[27] Arkharov I.A., Aleksandrov A.A., Navasardyan E.S. Examples and tasks on cryogenic system cycles (Primery i zadachi po tsiklam kriogennykh sistem). Moscow: MGTU Im. N.E. Baumana, 2009 (in Russ.).

[28] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Navasardyan E.S. Machines and apparatuses of cryogenic systems (Mashiny i apparaty kriogennykh sistem). Moscow: MGTU Im. N.E. Baumana, 2014 (in Russ.).

[29] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Navasardyan E.S. Machines and apparatuses of cryogenic systems (Mashiny i apparaty kriogennykh sistem). Moscow: MGTU Im. N.E. Baumana, 2009 (in Russ.).

[30] Frederking T.H.K. Cryogenics: low temperature engineering and applied science. Santa Monica, Calif.: Yutopian Enterprises, 2005 (in Eng.).

[31] Arkharov A.M., Marfenina I.V., Mikulin Ye.I. Cryogenic systems in vol. 1, vol. 2. Bauman Moscow State Technical University Press, 2000, 2001 (in Eng.).

[32] Timmerhaus K.D., Reed R.P. Cryogenic engineering. Wien: Springer-Verlag, 2007 (in Eng.).

[33] Morkovkin I.M., Kuzmenko I.F., Kashonkova E.A., Dukhanin Yu.I., Gurov E.I. A method for liquefying hydrogen with a helium refrigerant cycle and a device for carrying it out. Patent F25J1/02; F25J5/00 RF no. 2309342 (Sposob ozhizheniya vodoroda s gelievym kholodil'nym tsiklom i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya). 27.10.2007 (in Russ.).

[34] Hydrogen liquefier. Cryogenic helium plants (Ozhizhitel vodoroda. Kriogennye gelievye ustanovki). Available on: <http://www.geliymash.ru/products/124/540/> (accessed 22.11.2017) (in Russ.).

[35] Range of automatic hydrogen liquefiers. Available on: https://advancedtech.airliquide.com/sites/abt_at/files/2017/10/20/hylial_brochure_en_09.17_sd.pdf (accessed 22.11.2017) (in Eng.).

[36] West J.E. The economics of small to medium liquid hydrogen facilities. *CryoGas International*, 2003;May:28–33 (in Eng.).

Транслитерация по BSI

