

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF632484>

# Системы предварительного охлаждения в современных ожижителях водорода

М.П. Крикунова, Я.В. Самохвалов, А.С. Кротов, Н.Н. Полянский, П.Р. Ситников, В.О. Новиков

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

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** В настоящей работе представлены рекомендации по выбору схемы установки ожижения водорода малой производительности до 20 кг/ч (0,48 тонн/сутки). Основными рассматриваемыми критериями являются удельные энергозатраты цикла ожижения, капитальные затраты для его организации, а также общие характеристики систем ожижения. В ходе настоящего исследования были рассмотрены теоретический и реальный циклы ожижения водорода, было проведено математическое моделирование цикла с учетом реальных параметров оборудования. Были выявлены преимущества и недостатки некоторых технологических решений, а проанализированы тренды изменения эффективности установок сжижения водорода в целом. По результатам проведенного анализа были выбраны основные элементы цикла для установок ожижения водорода малой мощности.

**Цель работы** — рассмотреть теоретические и реальные циклы ожижения водорода, провести математическое моделирование цикла с учетом реальных параметров оборудования

**Методы.** В программной среде Aspen HYSYS было проведено моделирование цикла ожижения водорода. Дальнейшая оптимизация и подбор оптимальных значений рабочих параметров проведены с помощью модуля Global Optimization Toolbox программного комплекса MATLAB

**Результаты.** Выявлены преимущества и недостатки технологических решений, применяемых в установках ожижения водорода. Определена тенденция повышения эффективности установок сжижения водорода.

**Заключение.** В данной работе представлено сравнение энергозатрат на ожижение различных газов, которое показывает возможность снижения энергозатрат на ожижение водорода. Показано влияние непрерывной орто-пара-конверсии или увеличения ступеней конверсии на энергопотребление. Описаны основные особенности холодильных циклов и обоснован выбор цикла предварительного охлаждения на смешанном хладагенте (СХА). Экономические показатели, характеризующие холодильные машины, работающие на СХА, сравнивали с экономическими показателями систем, использующих предварительное охлаждение продукта жидким азотом. Описаны основные трудности выбора хладагента при моделировании. Представлены основные принципы моделирования и выбора параметров оптимизации цикла ожижения водорода малой мощности. Смоделирован низкотемпературный гелиевый цикл, затем с учетом полученных результатов смоделирован контур предварительного охлаждения на смесевом хладагенте. Выявлен оптимальный диапазон температур (80–100К) предварительного охлаждения на смесевом хладагенте, при котором наблюдается снижение общего удельного энергопотребления в установках ожижения водорода малой мощности.

**Ключевые слова:** жидкий водород; ожижение; установка предварительного охлаждения; смесевой хладагент (СХА); оптимизация; энергоэффективность.

## Как цитировать:

Крикунова М.П., Самохвалов Я.В., Кротов А.С., Полянский Н.Н., Ситников П.Р., Новиков В.О. Системы предварительного охлаждения в современных ожижителях водорода. // Холодильная техника. 2023. Т. 112, № 4. С. 185–193. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF632484>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF632484>

# Precooling systems in modern hydrogen liquefaction

Margarita P. Krikunova, Yaroslav V. Samokhvalov, Alexander S. Krotov,  
Nikolay N. Polansky, Pavel R. Sitnikov, Vsevolod O. Novikov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

This study presents recommendations for selecting a circuit design for low-capacity hydrogen liquefaction plants with production rate up to 20 kg/h or 0.48 tpd (ton per day). Main design criteria considered are specific energy cost, as well as capital costs and overall characteristics of the system. Theoretical and real hydrogen liquefaction cycles are reviewed. Mathematical models of different circuits are built considering real parameters of the typical equipment. The advantages and disadvantages associated with certain solutions are identified, and the hydrogen-liquefaction energy efficiency trends are analysed. According to the results, the main of the circuits for low-capacity hydrogen liquefaction plants are selected as per the obtained results.

**AIMS:** Theoretical and real hydrogen liquefaction cycles are reviewed, and circuit design is mathematically modeled considering the typical equipment's real parameters.

**MATERIALS AND METHODS:** Hydrogen-liquefaction cycles are modeled using Aspen HYSYS. Further optimization and parameter selection are conducted using the MATLAB module "Global Optimization Toolbox."

**RESULTS:** Advantages and disadvantages associated with certain technological solutions are identified, and the hydrogen-liquefaction energy efficiency trends are analyzed.

**CONCLUSIONS:** This study compares energy consumptions for liquefaction of various gases, showing the feasibility of energy consumption reduction for hydrogen liquefaction. The importance of continuous ortho–para conversion or increase in number of conversion stages via energy consumption reduction is presented. The main features of refrigerant cycles are described, and a precooling cycle using a mixed refrigerant is selected. Mixed-refrigerant precooling cycle and liquid nitrogen precooling are compared in terms of economic efficiency. The main issues of refrigerant selection are described, and the basic principles of modeling and parameter selection for a small-capacity hydrogen-liquefaction cycle are presented. A low-temperature helium cycle is modeled with the precooling circuit based on a mixed-refrigerant cycle. We reveal an optimum range of precooling temperatures for decrease in overall specific power consumption using a mixed refrigerant in a small-capacity hydrogen liquefaction plant of 80K–100K.

**Keywords:** Liquid hydrogen; liquefaction; precooling circuit; mixed refrigerant; optimization; energy efficiency.

## To cite this article:

Krikunova MP, Samokhvalov YV, Krotov AS, Polansky NN, Sitnikov PR, Novikov VO. Precooling systems in modern hydrogen liquefaction. *Refrigeration Technology*. 2023;112(4):185–193. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF632484>

Received: 22.05.2024

Accepted: 15.08.2024

Published online: 09.09.2024

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется развитию «зеленой» энергетики, что в свою очередь приводит к повышению интереса к водороду как к энергоресурсу [1]. Водород является одним из наиболее перспективных видов топлива, к тому же водород экологичен поскольку не загрязняет окружающую среду. В настоящее время водород зачастую перевозят в жидком состоянии в криогенных цистернах. Этот метод транспортировки является наиболее приемлемым в ряде случаев, например, при доставке водорода автомобильным транспортом на расстояние до 4000 км. Кроме того, жидкий водород используется в качестве ракетного топлива, поскольку выступает как эффективный энергоноситель.

В связи с этим разработка технологических решений, позволяющих создавать эффективные установки ожижения водорода (УОВ), в настоящее время наиболее актуальна. Эффективность установки ожижения определяется соотношением между капитальными и эксплуатационными затратами на производство килограмма жидкого водорода.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В табл. 1 приведены значения минимальной удельной работы ожижения криогенных веществ, полученные

в цикле Лоренца. Показано, что энергозатраты на ожижение водорода значительны и превышают энергозатраты на ожижение других газов. Стоит отметить, что энергозатраты реальных установок ожижения в несколько раз выше теоретических энергозатрат идеальных циклов ожижения и зависят от степени термодинамического совершенства. Повышение энергетической эффективности процесса ожижения водорода является важной задачей, поскольку энергоэффективность в ряде случаев напрямую влияет на экономическую целесообразность ожижения.

При понижении температуры водорода изменяется равновесная концентрация пара-формы, что приводит к процессу орто-пара-конверсии, который сопровождается выделением теплоты. Например, при орто-пара переходе за 4 суток водород может испариться на 40% [2].

Во избежание потерь водорода при орто-пара переходе необходимо во время ожижения проводить принудительную конверсию на катализаторах. Процесс конверсии может существенно повлиять на энергоэффективность цикла ожижения. В табл. 2 представлена зависимость минимальной работы ожижения цикла Лоренца от метода организации процесса конверсии. В идеальном случае, минимальная работа ожижения водорода с проведением непрерывной конверсии увеличивается на 18% по сравнению с ожижением без проведения конверсии. В реальных установках непрерывная конверсия заменяется несколькими ступенями

**Таблица 1.** Минимальная работа ожижения криогенных веществ в реальных установках

**Table 1.** Minimal liquefaction work of cryogenic fluids in real plants

Вещество	Температура кипения при Н.У., К	Отводимое тепло, кДж/кг	Минимальная работа ожижения	
			кВт·ч/кг	МДж/кг
Метан (CH <sub>4</sub> )	111,7	914	0,30	1,09
Кислород (O <sub>2</sub> )	90,2	406	0,18	0,64
Азот (N <sub>2</sub> )	77,4	433	0,21	0,77
Водород (H <sub>2</sub> )	20,4	3958	3,36	12,08
Гелий (He)	4,2	1563	1,90	6,85

Условия – 300 К.

**Таблица 2.** Зависимость минимальной работы ожижения от метода организации процесса конверсии

**Table 2.** Minimal liquefaction work depending on the ortho-para conversion scheme

Процесс конверсии	Стадии орто-параконверсии	Минимальная работа ожижения	
		кВт·ч/кг	МДж/кг
Равновесный	Непрерывный	3,96	14,27
5-ти стадийный	80 К; 65 К; 50 К; 35 К; 20,4 К	4,15	14,93
4-х стадийный	80 К; 65 К; 50 К; 20,4 К	4,35	16,65
3-х стадийный	80 К; 65 К; 20,4 К	4,63	16,68
2-х стадийный	80 К; 20,4 К	4,87	17,53
1 стадийный	20,4 К	5,37	19,33

На входе нормальный водород. Равновесные концентрации орто-пара достигаются на каждом уровне температуры.

или проводится только на нижнем уровне температур, который зависит от производительности оживителя. Из табл. 2 видно, что при реализации многостадийного процесса (5 стадий) орто-пара-конверсии минимальная работа оживления снижается на 30% по сравнению со схемой, в которой конверсия реализуется только на нижнем температурном уровне (1 ступень).

## Циклы оживления водорода

Наиболее эффективные установки сжижения водорода состоят из нескольких контуров — низкотемпературного (НТ) и контура предварительного охлаждения (ПО). Предварительное охлаждение необходимо для отвода тепла на промежуточном температурном уровне для компенсации теплопритоков и недорекупераций в теплообменных аппаратах. Чем ниже температура предварительного охлаждения, тем ниже нагрузка на низкотемпературный контур.

Технологические решения, применяемые в низкотемпературной части зависят от мощности установки и ограничены в использовании рабочих веществ из-за необходимости охлаждения до температур не выше 32 К. В качестве рабочих веществ используют неон, гелий, водород или их смеси. Как правило, в низкотемпературном контуре прямой поток хладагента сжимается в компрессорах с отводом теплоты сжатия в концевых охладителях, далее охлаждается в теплообменниках, расширяется на различных температурных уровнях в детандерах и после расширения направляется в теплообменники в качестве обратного потока для охлаждения прямых потоков хладагента и потока продукта [3].

Предварительное охлаждение осуществляется с помощью замкнутого или открытого контура с внешним охлаждением жидким азотом. Поставка жидкого азота экономически невыгодна для отдаленных районов со слабо развитой инфраструктурой. Кроме того, зависимость от поставок жидкого азота снижает надежность системы в целом из-за возможных сбоев в самих поставках.

Поэтому целесообразность использования открытых циклов предварительного охлаждения оценивается индивидуально, в зависимости от планируемого размещения установки. Замкнутые циклы могут быть реализованы по различным схемам в зависимости от температуры предварительного охлаждения [4]. Циклы охлаждения со смешанным хладагентом являются наиболее эффективными, поскольку охлаждение осуществляется путем кипения хладагента на разных уровнях температуры и постоянном давлении [5]. СХА позволяет достичь температур в циклах ниже 70 К, но при понижении температуры эффективность контура предварительного охлаждения снижается, что может отрицательно сказаться на общем энергопотреблении установки оживления водорода. Данный аспект требует проведения предварительного анализа и подбора смешанного хладагента.

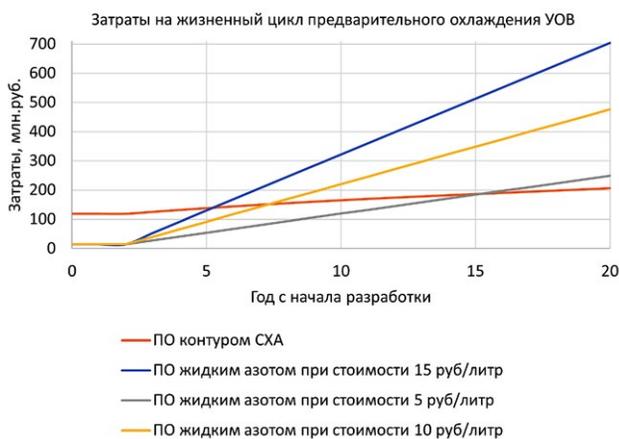
На рис. 1 представлены графики сравнения денежных затрат на предварительное охлаждение смесевым хладагентом и жидким азотом. Капитальные затраты на организацию цикла претерпевают изменения во времени. График показывает, что предварительное охлаждение с помощью смесевого хладагента экономически более эффективно, по сравнению с предварительным охлаждением жидким азотом.

## Моделирование

Было проведено моделирование циклов предварительного охлаждения малотоннажной установки оживления водорода в диапазонах температур от 70 до 120 К с шагом 5 К. Схема установки оживления водорода представлена на рис. 2. Для данной задачи была выбрана и смоделирована низкотемпературная часть, работающая по обратному циклу Брайтона, где в качестве рабочего тела использовался гелий.

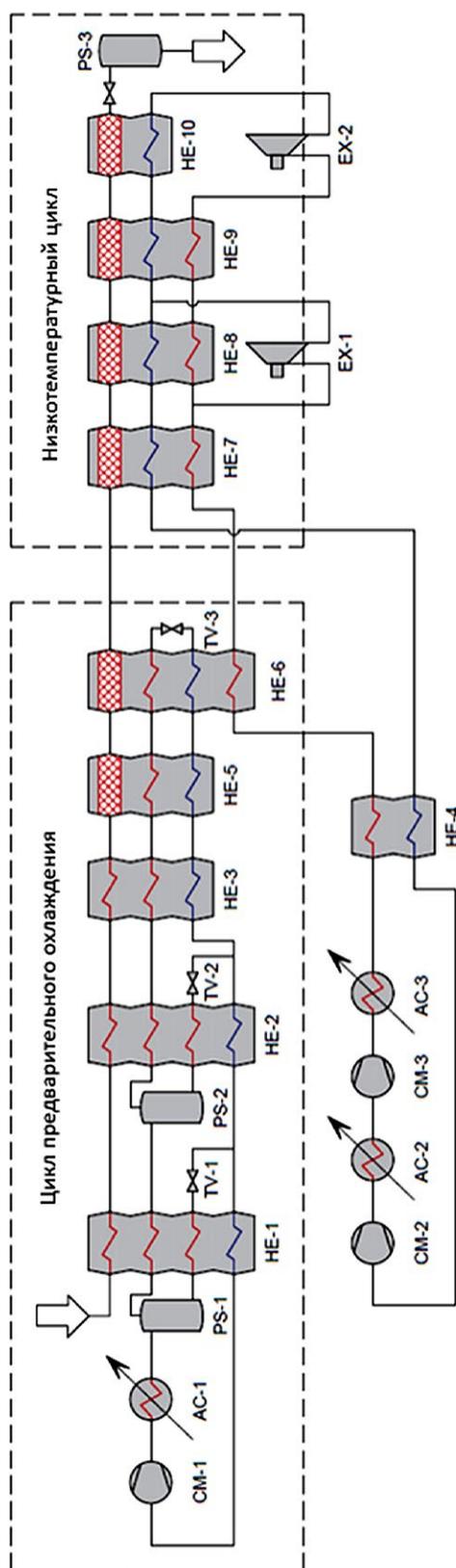
В качестве контура предварительного охлаждения рассматривался контур холодильной машины, работающей на смешанном хладагенте с двумя фазовыми сепараторами. Наличие сепараторов и их количество обуславливается необходимостью изменения состава компонентов в низкотемпературной части контура во избежание затвердевания высококипящих компонентов в дроссельном устройстве. В табл. 3 представлена информация по компонентам СХА. Состав хладагента с переменной температурой кипения и конденсации, без эвтектики, специально подобран для работы в диапазоне температур 70–300 К. Свойства компонентов хладагента рассчитывались с применением пакета REFPROP. Также стоит отметить, что данных о растворимости компонентов недостаточно, поэтому для формирования реальных ограничений на содержание высококипящих компонентов в низкотемпературной части был установлен предел 0,005% мольных сумм *n*-бутана и изопентана перед низкотемпературным дросселем.

Процесс конверсии моделировался как непрерывный, происходящий внутри теплообменного аппарата. Конверсия начиналась при температуре 135 К и заканчивалась



**Рис. 1.** Сравнение денежных затрат на предварительное охлаждение с помощью жидкого азота и СХА.

**Fig. 1.** Cost comparison between liquid nitrogen precooling and mixed refrigerant precooling.



**Рис. 2.** Цикл ожижения водорода (AC — аппарат воздушного охлаждения, CM — компрессор, EX — детандер, HE — теплообменный аппарат, PS — фазовый сепаратор, TV – дроссельный вентиль).

**Fig. 2.** Hydrogen liquefaction cycle (AC: Air Cooler, CM: Compressor, EX: Expander, HE: Heat Exchanger, PS: Phase Separator, TV: Throttle Valve).

**Таблица 3.** Информация по компонентам СХА

**Table 3.** Components of the mixed refrigerant

Вещество	Температура кипения, К	Тройная точка, К
Неон	27,1	24,5
Азот	77,4	63,3
Метан	111,5	90,6
Этан	184,5	90,3
Пропан	231,1	85,5
Н-Бутан	272,6	134,7
И-Пентан	301,0	113,2

на температурном уровне предварительного охлаждения с концентрацией орто-пара фазы, связанной с равновесной концентрацией при температуре на 2 К выше температуры потока. Непрерывный тип конверсии является наиболее энергоэффективным [6].

Теплота орто-пара конверсии:

$$q_c = 7.06 \cdot (C - C_0) \quad (1)$$

где  $q_c$  — удельная теплота орто-пара конверсии в кВт/кг,  $C$  — конечная концентрация орто-пара,  $C_0$  — начальная концентрация орто-пара.

Ограничения эффективности машин, недорекуперации в теплообменных аппаратах, а также значения гидравлических потерь были установлены исходя из единичной производительности 20 кг/ч (0,48 т/сутки) жидкого водорода [7].

В процессе оптимизации были выбраны неизвестные параметры цикла, согласно методу изложенному в работах [8, 9]. Оптимизируемые параметры варьировались в заданном диапазоне и передавались в расчет цикла. Ограничения и целевая функция передавались из расчета цикла в программу оптимизации, где происходила проверка на достижение целевой функцией минимума. В случае достижения минимума и выполнении всех ограничений, решение принималось алгоритмом. Далее из всех найденных решений выбиралось наиболее энергоэффективное. На рис. 3 представлена схема с описанием процесса оптимизации.



**Рис. 3.** Схема оптимизации.

**Fig. 3.** Optimization scheme.

В качестве оптимизируемых параметров были выбраны расходы компонентов, давления и промежуточные температуры. В качестве ограничений принимались минимальные значения недорекуперации в теплообменных аппаратах, температура всасывания в компрессорах и условие отсутствия жидкости на входе в компрессор [10, 11].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

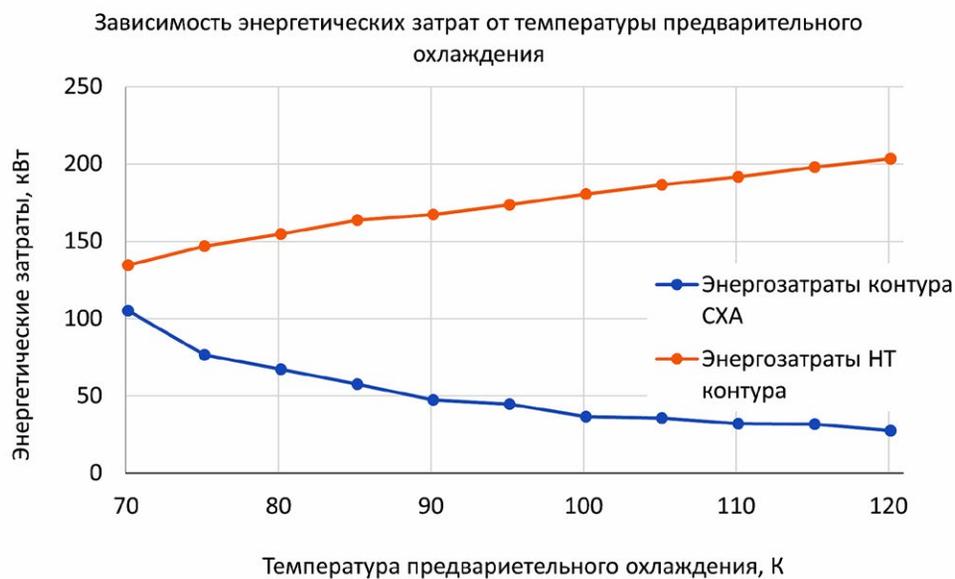
В ходе моделирования и оптимизации были получены параметры, соответствующие удельным затратам энергии в цикле ожижения водорода (см. рис. 4 и 5).

Из графика суммарного энергопотребления видно, что оптимальные значения температуры предварительного

охлаждения находятся в пределах 80–100 К. Предполагается, что с изменением производительности цикла ожижения в результате уточнения эффективности машин и аппаратов, а также использования данных о растворимости, температурный диапазон может измениться. Однако, тенденция, заключающаяся в том, что оптимальная температура находится в середине диапазона, сохраняется.

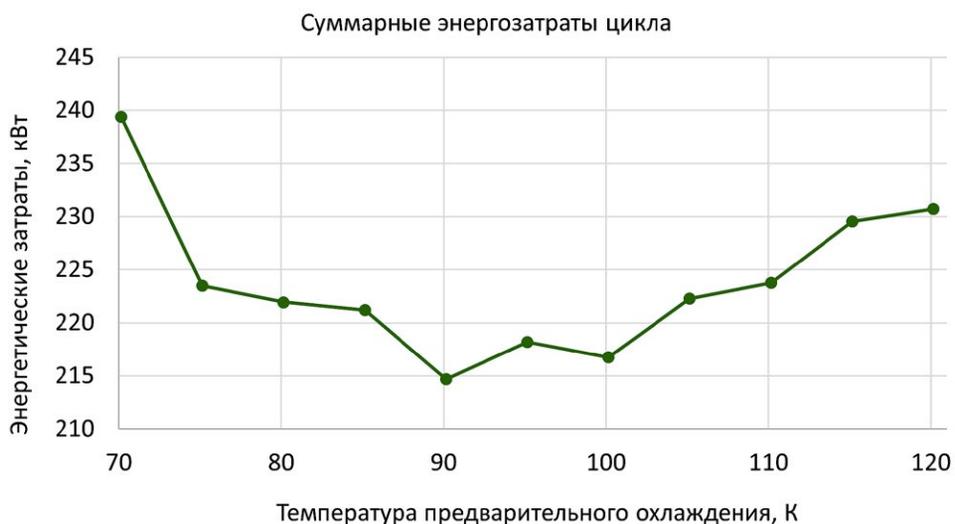
## ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование циклов предварительного охлаждения малотоннажной установки ожижения водорода в диапазонах температур от 70 до 120 К показало, что оптимальные значения температуры предварительного охлаждения



**Рис. 4.** Удельное энергопотребление.

**Fig. 4.** Specific power consumption.



**Рис. 5.** Суммарное удельное энергопотребление.

**Fig. 5.** Total specific power consumption.

находятся в пределах 80–100 К. При этих значениях соблюдается разумный баланс энергетических затрат низкотемпературного контура и контура предварительного охлаждения. Повышение температуры предварительного охлаждения снижает нагрузку на контур предварительного охлаждения, тем самым повысит нагрузку на низкотемпературный контур. Понижение температуры предварительного охлаждения, наоборот, приведет к повышению нагрузки на контур предварительного охлаждения, при этом нагрузка на низкотемпературный контур снизится.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлено сравнение энергозатрат на ожижение различных газов, которое показывает возможность снижения энергозатрат на ожижение водорода. Показано влияние непрерывной орто-пара-конверсии или увеличения стадий конверсии на снижение энергопотребления. Описаны основные особенности холодильных циклов и обоснован выбор цикла предварительного охлаждения на смешанном хладагенте. Экономическую эффективность цикла смешанного хладагента сравнивали с предварительным охлаждением жидким азотом. Описаны основные трудности выбора хладагента при моделировании. Представлены основные принципы моделирования и выбора параметров оптимизации цикла ожижения водорода малой мощности. Смоделирован низкотемпературный гелиевый цикл, затем с учетом полученных результатов смоделирован контур предварительного охлаждения на смешанном хладагенте. Выявлен оптимальный диапазон температур (80–100 К) предварительного охлаждения на смешанном хладагенте, при котором наблюдается снижение общего удельного энергопотребления в установках ожижения водорода малой мощности.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** М.П. Крикунова — моделирование предложенных термодинамических циклов, написание текста

статьи; Я.В. Самохвалов — расчёт показателей эффективности, анализ результатов исследования, написание текста статьи; А.С. Кротов — формулировка темы, анализ результатов исследования, редактирование статьи; Н.Н. Полянский — расчет и оптимизация моделей; П.Р. Ситников — сбор и анализ литературных источников, редактирование статьи; В.О. Новиков — обзор литературы, написание текста статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions.** M.P. Krikunova — cycle simulation, model optimization, writing the text of the article; Y.V. Samokhvalov — performance metrics calculation, research data analysis, writing the text of the article; A.S. Krotov — topic formulation, research data analysis, article editing; N.N. Polyanskiy — model calculation and optimization; P.R. Sitnikov — collection and analysis of literature sources, article editing; V.O. Novikov — literature review, writing the text of the article. All authors substantially contributed to the conception, acquisition, analysis, and data interpretation, drafting, and revising of the work, as well as final approval of the version to be published, and they agree to be held accountable for all aspects of the work.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest. Funding. This study was not supported by any external sources of funding

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Capurso T., Stefanizzi M., Torresi M., Camporeale S.M. Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 251. P. 114898. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114898
2. Bondarenko V.L., Ilyinskaya D.N., Kazakova A.A., et al. Application of liquid hydrogen in hydrogen engines and fuel cells // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2022. Vol. 57. P. 1033–1037. doi: 10.1007/s10556-022-01042-y
3. Yin L., Ju Y. Review on the design and optimization of hydrogen liquefaction processes // *Front. Energy*. 2019. Vol. 14. P. 530–544. doi: 10.1007/s11708-019-0657-4
4. Yang Y., Park T., Kwon D. Effectiveness analysis of precooling methods on hydrogen liquefaction process // *Progress in Superconductivity and Cryogenics*. 2020. Vol. 22, N. 3. P. 20–24.
5. Venkatarathnam Gadhiraaju. *Cryogenic Mixed Refrigerant Processes*. New York: Springer, 2008. doi: 10.1007/978-0-387-78514-1
6. Park J., Lim H., Rhee G. H., Karng S.W. Catalyst filled heat exchanger for hydrogen liquefaction // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 170. P. 121007. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121007
7. Wilhelmsen Ø., Berstad D., Aasen A., et al. Reducing the exergy destruction in the cryogenic heat exchangers of hydrogen liquefaction processes // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. P. 5033–5047. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.094

8. Bychkov E.G. An integrated approach for designing Joule-Thomson refrigerators operating with mixtures // *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 202. P. 117837. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117837
9. Zherdev A.A., Makarov B.A., Yakovlev V.I., Bychkov E.G. The Calculation of Thermodynamic Properties of Multicomponent Refrigerant Blends — Working Fluids of Throttling Low-Temperature Refrigeration Machines // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020. Vol. 55, N. 12. P. 976–985. doi: 10.1007/s10556-020-00724-9

10. Zuev O.A., Garanov S.A., Ivanova E.V., Karpukhin A.S. Investigation of the efficiency of autocascade and cascade heat pumps in cold climate // *Chemical and petroleum engineering*. 2020. Vol. 56. P. 448–455. doi: 10.1007/s10556-020-00793-w
11. Semyonov V.Y., Alikov S.D. Comparison of C3MR and arctic cascade cycles for operation in arctic conditions using entropystatistical analysis method // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2022. Vol. 58. P. 23–32. doi: 10.1007/s10556-022-01050-y

## REFERENCES

1. Capurso T, Stefanizzi M, Torresi M, Camporeale SM. Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. *Energy Conversion and Management*. 2022;251:114898. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114898
2. Bondarenko VL, Ilyinskaya DN, Kazakova AA, et al. Application of liquid hydrogen in hydrogen engines and fuel cells. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2022;57:1033–1037. doi: 10.1007/s10556-022-01042-y
3. Yin L, Ju Y. Review on the design and optimization of hydrogen liquefaction processes. *Front. Energy*. 2019;14:530–544. doi: 10.1007/s11708-019-0657-4
4. Yang Y, Park T, Kwon D. Effectiveness analysis of precooling methods on hydrogen liquefaction process. *Progress in Superconductivity and Cryogenics*. 2020;22(3):20–24.
5. Venkatarathnam Gadhiraaju. *Cryogenic Mixed Refrigerant Processes*. New York: Springer; 2008. doi: 10.1007/978-0-387-78514-1
6. Park J, Lim H, Rhee GH, Karnig SW. Catalyst filled heat exchanger for hydrogen liquefaction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;170:121007. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121007
7. Wilhelmsen Ø, Berstad D, Aasen A, et al. Reducing the exergy destruction in the cryogenic heat exchangers of hydrogen liquefaction processes. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018;43:5033–5047. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.094
8. Bychkov EG. An integrated approach for designing Joule-Thomson refrigerators operating with mixtures. *Applied Thermal Engineering*. 2022;202:117837. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117837
9. Zherdev AA, Makarov BA, Yakovlev VI, Bychkov EG. The Calculation of Thermodynamic Properties of Multicomponent Refrigerant Blends — Working Fluids of Throttling Low-Temperature Refrigeration Machines. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020;55(12):976–985. doi: 10.1007/s10556-020-00724-9
10. Zuev OA, Garanov SA, Ivanova EV, Karpukhin AS. Investigation of the efficiency of autocascade and cascade heat pumps in cold climate. *Chemical and petroleum engineering*. 2020;56:448–455. doi: 10.1007/s10556-020-00793-w
11. Semyonov VY, Alikov SD. Comparison of C3MR and arctic cascade cycles for operation in arctic conditions using entropystatistical analysis method. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2022;58:23–32. doi: 10.1007/s10556-022-01050-y

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### \* Ситников Павел Романович,

студент;  
ORCID: 0009-0000-0960-4108;  
eLibrary SPIN: 8917-8176  
e-mail: spr18ea332@student.bmstu.ru

### Крикунова Маргарита Петровна,

аспирант;  
адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,  
Лефортовская наб., д.1;  
ORCID: 0009-0006-5152-3559;  
eLibrary SPIN: 8727-4951;  
e-mail: krikunova@bmstu.ru

### Самохвалов Ярослав Владимирович,

заведующий лабораторией инжинирингового центра  
«Криогенные технологии в энергетике»;  
ORCID: 0000-0003-2380-6982;  
eLibrary SPIN: 5016-7729;  
e-mail: samokhvalov@bmstu.ru

## AUTHORS' INFO

### \* Pavel R. Sitnikov,

student;  
ORCID: 0009-0000-0960-4108;  
eLibrary SPIN: 8917-8176  
e-mail: spr18ea332@student.bmstu.ru

### Margarita P. Krikunova,

graduate student;  
address: 1 Lefortovskaya Naberezhnaya, 105005 Moscow,  
Russian Federation;  
ORCID: 0009-0006-5152-3559;  
eLibrary SPIN: 8727-4951;  
e-mail: krikunova@bmstu.ru

### Yaroslav V. Samokhvalov,

head of laboratory of the RnD center “Cryogenic technologies  
in power engineering”;  
ORCID: 0000-0003-2380-6982;  
eLibrary SPIN: 5016-7729;  
e-mail: samokhvalov@bmstu.ru

**Кротов Александр Сергеевич,**

доцент, канд. тех. наук;  
ORCID: 0000-0001-9671-8890;  
eLibrary SPIN: 4165-8154;  
e-mail: krotov@bmstu.ru

**Полянский Николай Никитович,**

инженер;  
ORCID: 0009-0006-0009-7764;  
e-mail: polansky@bmstu.ru

**Новиков Всеволод Олегович,**

студент;  
ORCID: 0009-0007-9710-8008;  
e-mail: novikovvo@student.bmstu.ru

**Alexander S. Krotov,**

assistant professor, Cand. Sci. (Tech.);  
ORCID: 0000-0001-9671-8890;  
eLibrary SPIN: 4165-8154;  
e-mail: krotov@bmstu.ru

**Nikolay N. Polyansky,**

engineer;  
ORCID: 0009-0006-0009-7764;  
e-mail: polansky@bmstu.ru

**Vsevolod O. Novikov,**

student;  
ORCID: 0009-0007-9710-8008;  
e-mail: novikovvo@student.bmstu.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author