

УДК 621.59

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЛОКА ЗАРЯДКИ КРИОГЕННОГО АККУМУЛЯТОРА ЭНЕРГИИ, РАБОТАЮЩЕГО ПО ЦИКЛУ КАПИЦЫ

© 2025 Е.В. Благин, А.С. Клентак, Д.А. Угланов, Е.М. Битерякова, В.В. Казандаев, И.С. Павлихин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 05.12.2025

В статье представлен технико-экономический анализ блока зарядки криогенного аккумулятора энергии, работающего по циклу Капицы. Исследование включает термодинамическое моделирование установки, оценку ее энергетической эффективности и экономической целесообразности. Рассматривается цикл Капицы, традиционно относимый к системам низкого давления, и демонстрируют, что оптимальные параметры работы достигаются при давлениях порядка 12 бар. Это подтверждается расчетами, показывающими улучшенные характеристики энергоэффективности и экономические преимущества при повышенных давлениях. Основные результаты работы включают определение удельных затрат энергии, которые составили 0,68 кВт·ч/кг, и оценку капитальных вложений в оборудование. Оптимальная конфигурация установки с параметрами $M = 0,85$ (доля воздуха, направляемого в турбодетандер) и давлением 12 бар обеспечивает баланс между энергопотреблением (5,788 кВт) и стоимостью оборудования (22,559 тыс. \$). В работе выполнен расчет тепловых балансов, работы компрессора и детандера, а также оценки стоимости компонентов установки. Результаты представлены в виде графиков зависимости потребляемой мощности и стоимости от давления, а также фронта Парето для выявления оптимальных конфигураций. Исследование основано на современных научных публикациях и методах анализа, что обеспечивает его научную значимость и практическую применимость. Результаты могут быть полезны для разработчиков криогенных систем и специалистов в области энергетики.

Ключевые слова: криогенный аккумулятор энергии, цикл Капицы, технико-экономический анализ, ожижение воздуха, термодинамическое моделирование, энергоэффективность, турбодетандер, компрессор, оптимальное давление, стоимость оборудования.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-6-21-29

EDN: CRPANX

Результаты работы получены при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSSS-2024-0017).

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕРМИНОВ

LAES – жидковоздушное хранилище энергии
 LNG (Liquefied Natural Gas) – Сжиженный природный газ (СПГ)
 M – доля воздуха, отводимого на детандер
 γ – доля сжиженного воздуха (коэффициент сжижения)
 β – обозначение для доли сжиженного воздуха, выходящего из сепаратора
 η_{is} – изотермический КПД компрессора
 η_{exp} – изоэнтальпийный КПД детандера
 R – удельная газовая постоянная
 R_u – универсальная газовая постоянная
 μ – молярная масса
 L_c – работа изотермического компрессора
 L_d – работа, производимая детандером
 Q_0 – абсолютные затраты энергии
 N_{sp} – удельные затраты энергии
 K – коэффициент теплопередачи

Благин Евгений Валерьевич, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей. E-mail: blagin.ev@ssau.ru

Клентак Анна Сергеевна, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей. E-mail: klentak.as@ssau.ru

Угланов Дмитрий Александрович, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей.

E-mail: uglanov.da@ssau.ru

Битерякова Екатерина Михайловна, лаборант-исследователь НОЦ ГДИ–209. E-mail: katya.biteryakova@mail.ru

Казандаев Василий Владимирович, лаборант-исследователь НОЦ ГДИ–209. E-mail: kazandaev.vasya@mail.ru

Павлихин Иван Сергеевич, лаборант-исследователь НОЦ ГДИ–209. E-mail: ivan.pavlikhin163@gmail.com

F – площадь поверхности теплообмена

Z – стоимость оборудования (ZC – компрессора, ZT – теплообменника, ZN – детандера)

P, p – давление

T – температура

h – удельная энтальпия

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] проведен анализ и сравнение четырех карт производительности криогенного аккумулятора, использующего цикл Капицы для сжижения воздуха. Было показано, что давление заряда оказывает незначительное влияние на удельное потребление по сравнению с отработанной холодной энергией, извлеченной путем регазификации жидкого воздуха.

В работе [2] рассматривается криогенный аккумулятор, работающий по циклу Линде. Проведен анализ динамические характеристик и стратегии управления LAES в условиях запуска, подключения к сети и регулирования первичной частоты. Так же было проведено сравнение линейного активного контроллера подавления помех (LADRC) и ПИД-регулятора, и результаты показывают, что контрольный эффект LADRC лучше, чем у ПИД-регулятора.

В работе [3] рассматривается внедрение полигенерационных электростанций в сценарии умной энергетики как обоснованной альтернативы традиционным системам генерации для снижения затрат, уменьшения выбросов загрязняющих веществ и общего повышения эффективности. В статье показано, что при принятии текущего состояния LAES, характеризующегося почти 50% эффективностью кругового цикла, окупаемость инвестиций в LAES мощностью 300 кВт·ч составляет менее 7 лет.

В работе [4] представлен цикл сжижения с промежуточным охлаждением и рекуперацией тепла в цикле, а также проведен термодинамический анализ для исследования производительности этой системы. Результаты показывают, что каскадное криогенное хранилище с насадочным слоем повышает эффективность рециркуляции холодной эксергии по сравнению с LAES на основе одиночного высококачественного холодного хранилища с насадочным слоем.

В работе [5] проведен технико-экономический анализ осуществимости внедрения технологии органического цикла Ренкина для утилизации отходящего тепла в жидковоздушном хранилище энергии. Исследование показало, что внедрение цикла Ренкина для утилизации низкопотенциального отходящего тепла, сбрасываемого на этапе зарядки, способно значительно снизить удельную стоимость хранения установки при благоприятных условиях.

В работе [6] проведено термодинамическое сравнение криогенных жидкостей на базе установки Джоуля-Томсона. В результате сравнения было выявлено, что метан имеет самую высокую эффективность восстановления и эффективность сжижения и, следовательно, самую высокую эффективность хранения.

В работе [7] теоретически анализируется влияние компрессора на производительность цикла сжижения с промежуточным охлаждением и исследуется влияние выходного давления на накопление энергии. Было показано, что коэффициент сжижения воздуха увеличивается с ростом давления сжижающего воздуха, поскольку выгоднее согласовывать температурные градиенты воздуха и холодных жидкостей, чтобы уменьшить минимальную разницу температур при более высоком давлении сжижающего воздуха.

В работе [8] предложена и проанализирована новая интегрированная система на основе жидкостного хранения энергии воздуха (LAES) и цикла Калины (KC), названная KC-LAES. Цикл Калины вводится для использования избыточной теплоты сжатия для выработки дополнительной электроэнергии. Результаты расчетов показывают, что введение цикла Калины может значительно улучшить производительность LAES. Эффективность цикла KC-LAES составляет 57,18%, по сравнению с B-LAES, 52,16%.

В работе [9] на примере ожижителя по циклу Линде исследуется влияние выходного давления компрессорного агрегата, выходного давления криогенного насоса, эффективности теплообменника, начальной температуры воздуха и давления перед дросселированием на производительность интегрированной системы хранения энергии сжиженного воздуха и системы выработки электроэнергии.

Анализ существующих публикаций подтверждает высокую востребованность исследований в данной области. Однако проведенный обзор литературы выявил существенный пробел: в работах других авторов отсутствуют комплексные алгоритмы многокритериальной оптимизации, способные одновременно учитывать как энергетические, так и экономические показатели. Данное обстоятельство подчеркивает актуальность настоящего исследования.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ОЖИЖИТЕЛЯ ПО ЦИКЛУ КАПИЦЫ

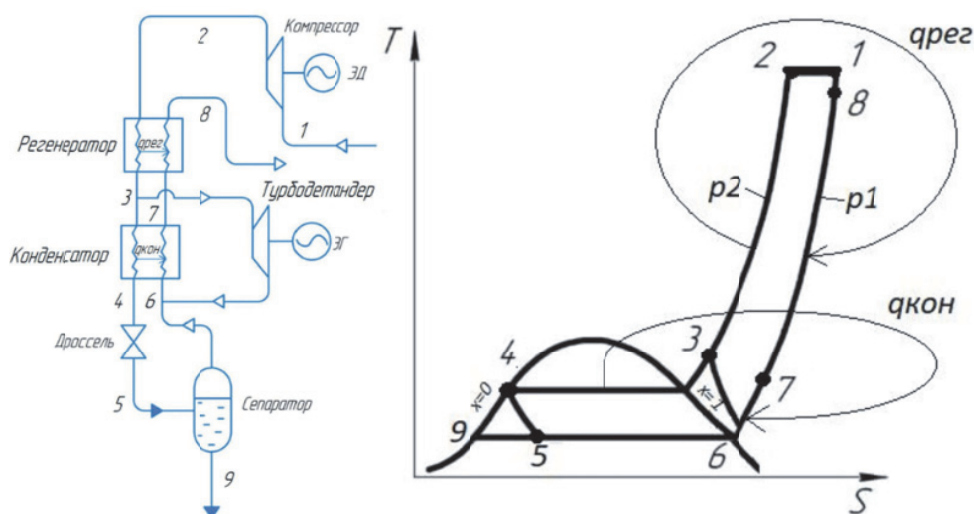


Рис. 1. Схема установки и T-s диаграмма цикла

Газ сжимается в компрессоре (линия 1 – 2), затем поступает в теплообменник–регенератор, где охлаждается не сконденсировавшимся газом (линия 2 – 3). После регенератора газ разделяется на два потока. Большая часть газа направляется в турбодетандер, в котором расширяется до давления порядка 0,1 МПа с производством внешней работы. В идеальном случае процесс расширения является адиабатным, в действительности происходит увеличение энтропии (процесс 3 – 6). Расширившийся газ подается в трубки конденсатора, где охлаждает и сжимает оставшуюся часть сжатого газа в количестве $(1-M)$ кг, проходящего в межтрубном пространстве. Конденсация этой части газа протекает по линии 3 – 4. Сжиженный газ из конденсатора через дроссельный вентиль дросселируется до давления 0,1 МПа (линия 4 – 5) и поступает в сепаратор. Образующиеся при дросселировании пары газа смешиваются с потоком газа из турбодетандера и через трубки конденсатора и поступают в регенератор, охлаждая газ высокого давления. При этом этот поток газа нагревается практически до первоначальной температуры T_1 по линии 6-7-8 постоянного давления P_1 , после чего удаляется в окружающую среду (если это воздух) или обратно в резервуар.

3. РАСЧЕТ ОЖИЖИТЕЛЯ

Допущения при расчете:

- Процесс сжатия в компрессоре происходит при постоянной температуре;
- гидравлические потери в трубопроводах и теплообменниках отсутствуют.

Свойства воздуха определены с использованием библиотеки CoolProp [10] по текущим значениям температуры и давления.

В таблицах 1 и 2 представлены исходные данные для расчета.

Таблица 1 – Свойства воздуха

R , кДж/кмоль	8,314
μ , моль/кг	28,96
η_{is}	0,7
η_{exp}	0,6

Таблица 2 – Исходные данные для расчета

Минимальное расчетное давление p_2 , бар	1
Максимальное расчетное давление p_2 , бар	12
Шаг по давлению, бар	0,1
Минимальная расчетная часть воздуха, отводимая на детандер M	0
Минимальная расчетная часть воздуха, отводимая на детандер M	1
Минимальная расчетная часть воздуха, отводимая на детандер M	0,05
Производительность, л/сут	10

Ниже представлен пример расчета для случая, когда степень повышения давления в компрессоре равна 10, а на детандер отводится 75% рабочего тела.

Тепловой баланс теплообменников:

$$h_2 - h_3 = (1 - \beta) \cdot (h_{1'} - h_8);$$

$$(h_3 - h_6) \cdot (1 - M) = (h_8 - h_4) \cdot (1 - \beta);$$

$$h_6 = \gamma \cdot h_0 + (1 - \gamma) \cdot h_4;$$

$$\beta = \gamma \cdot (1 - M),$$

где $h_{1'}$ – энтальпия воздуха, возвращаемого в атмосферу,

h_2 – энтальпия воздуха на выходе из компрессора,

h_3 – энтальпия воздуха в точке отвода рабочего тела на турбодетандер,

h_4 – энтальпия воздуха в точке смешения потоков из сепаратора и турбодетандера,

h_6 – энтальпия воздуха на входе в дроссельный клапан,

h_8 – энтальпия воздуха в точке между конденсатором и регенератором в магистрали низкого давления

γ – доля сжиженного воздуха;

M – доля воздуха, отводимого на детандер.

Решая систему уравнений, получаем:

$$\gamma = 0,377;$$

$$h_6 = 1,85h_8 = 113,566.$$

Работа компрессора:

$$L_c = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right),$$

где R – удельная газовая постоянная, $R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8,314}{28,96} = 0,287 \text{ кДж/кгК}$;

T – температура;

P_1 и P_2 – давления на входе и выходе из компрессора.

Таким образом, получаем работу компрессора равную:

$$L_c = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 0,287 \cdot 300 \cdot \ln\left(\frac{10}{1}\right) = 199,55, \text{ кДж/кг.}$$

Действительная работа сжатия газа выражается уравнением:

$$L = \frac{L_c}{\eta_{is}} = 285,06, \text{ кДж/кг.}$$

Работа детандера:

$$L_{exp} = M \cdot (h_{3s} - h_4) = 0,75 \cdot (148,3 - 77,07) = 53,42, \text{ кДж/кг,}$$

где h_{3s} – энтальпия после изэнтропийного расширения;

h_4 – энтальпия на выходе из детандера.

Абсолютные затраты энергии:

$$Q_0 = L_c - L_d = 285,06 - 53,42 = 231,64, \text{ кДж/кг.}$$

Удельные затраты энергии:

$$N_{sp} = \frac{Q_0}{\beta} = \frac{231,64}{0,094} = 2464,26, \text{ кДж/кг;}$$

$$N_{sp} = \frac{N_{sp}}{3600} = \frac{2464,26}{3600} = 0,68, \text{ кВт ч/кг.}$$

На следующем этапе расчета требуется определить коэффициенты теплопередачи в теплообменном аппарате. В данном расчете не рассчитываются непосредственно теплообменные аппараты, используемые в криогенной силовой установке. Коэффициент теплопередачи для жидкости

Таблица 3 – Результаты расчета

	p, Бар	T, К	G, кг/с	h, кДж/кг	s, кДж/кг·К	Состав
1	1	293	1,0	303,9	6,821	Воздух
2	12	293	1,0	301,4	6,076	Воздух
3	12	137,7	1,0	130,6	5,239	Воздух
4	12	106,6	0,15	-43,0	3,658	Воздух
5	1	77,2	0,15	-43,0	3,857	Воздух
6	1	77,2	0,91	77,1	5,412	Воздух
7	1	103,5	0,91	105,7	5,731	Воздух
8	1	283	0,91	293,5	6,785	Воздух
9	1	77,2	0,09	-122,2	2,831	Воздух

находится в диапазоне значений $500...4500 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, в данном расчете для жидкости условно примем равным $1000 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, для воздушной среды находится в диапазоне $50...270 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, условно примем его равным $200 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

Коэффициент теплопередачи для нагрева и охлаждения газообразной среды:

$$K = 200 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Среднетемпературный напор по участкам найден по следующим формулам:

$$dT_1 = \frac{(T_2 - T_4) - (T_3 - T_8)}{\ln\left(\frac{T_2 - T_4}{T_3 - T_8}\right)};$$

$$dT_2 = \frac{(T_4 - T_5) - (T_7 - T_3)}{\ln\left(\frac{T_4 - T_5}{T_7 - T_3}\right)}.$$

Необходимая площадь наружной поверхности теплообмена на участках определяется по формуле:

$$F_1 = \frac{Q}{K \cdot dT_1};$$

$$F_2 = \frac{Q}{K \cdot dT_2}.$$

Затем был проведен экономический анализ с использованием модели, предложенной Fang [11], для оценки стоимости компрессора и модели Abdolalipouradl [12] для оценки стоимости теплообменников.

Адекватность модели Fang [11] подтверждается ее относительной новизной (2023 год) и активным использованием при оценке стоимости элементов криогенных машин (в том числе криогенных воздухоразделительных установок [13-14] и при сжижении газов [15]).

Модель Abdolalipouradl [12] также широко используется для оценки стоимости криогенного оборудования, в частности для регазификации СПГ [16] и при производстве жидкого азота [17].

Стоимость теплообменника аппаратов:

$$ZT_1 = (130 \cdot (F_1/0,093)^{0,78}) \cdot 1000;$$

$$ZT_2 = (130 \cdot (F_2/0,093)^{0,78}) \cdot 1000.$$

Стоимость компрессора определяется по формуле:

$$ZC = 10167,5 \cdot W^{0,46}.$$

Стоимость детандера определяется по формуле:

$$ZN = 6000 \cdot W^{0.7}.$$

Общая стоимость криогенной установки:

$$Z = ZC + ZT_1 + ZT_2 + ZN.$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Фронт Парето для ожижителей, работающих по циклу Капицы, а также зависимость потребляемой мощности от давления на выходе из компрессора представлены на рисунках 2-4.

Анализ зависимостей показывает, что несмотря на то, что цикл Капицы является циклом низкого давления, оптимальные с точки зрения технико-экономического анализа конфигурации имеют достаточно большое давление (порядка 12 бар), а доля рабочего тела, отводимого на детандер, составляет 85%.

Параметры для наиболее эффективной с точки зрения технико-экономического анализа конфигурации представлены в таблице 4.

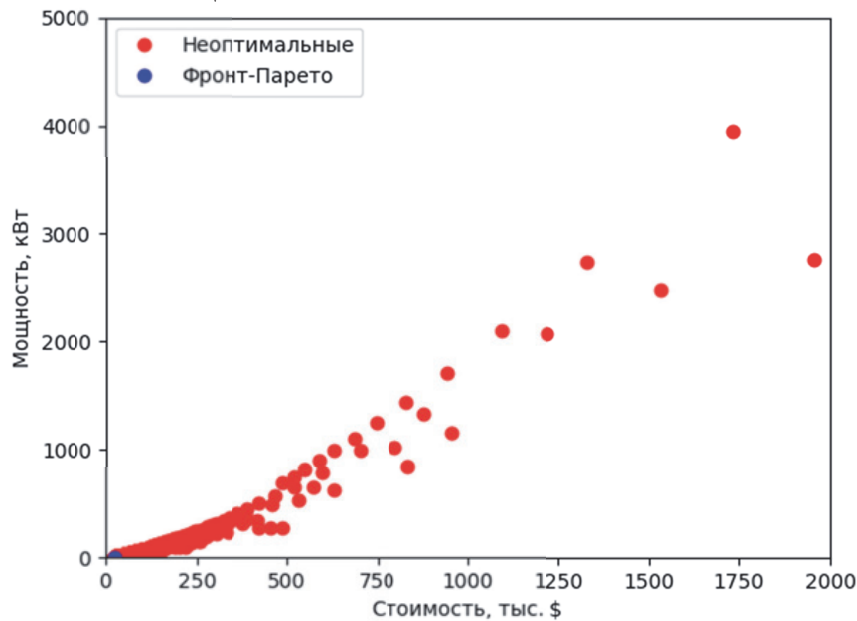


Рис. 2. Фронт Парето для ожижителей, работающих по циклу Капицы

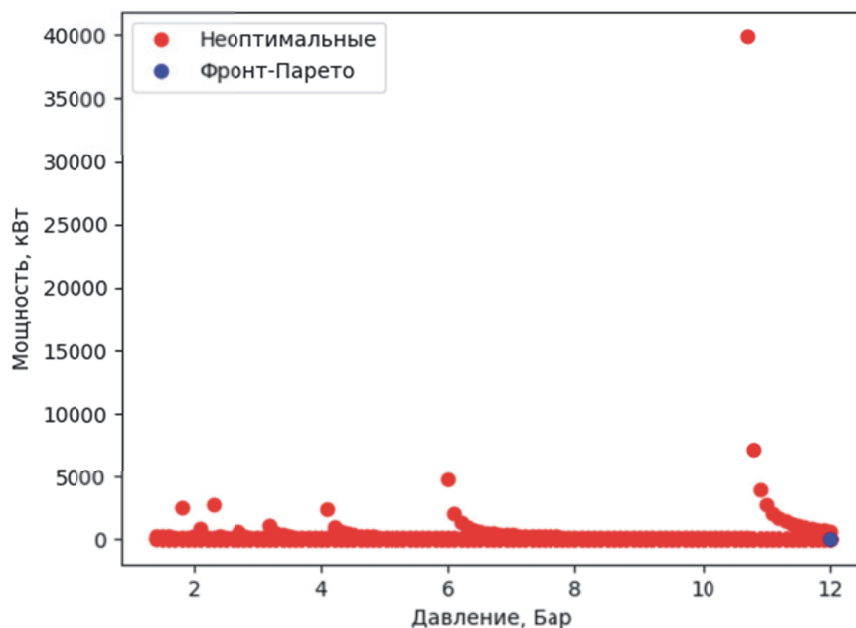


Рис. 3. Зависимость потребляемой мощности ожижителя от давления на выходе из компрессора

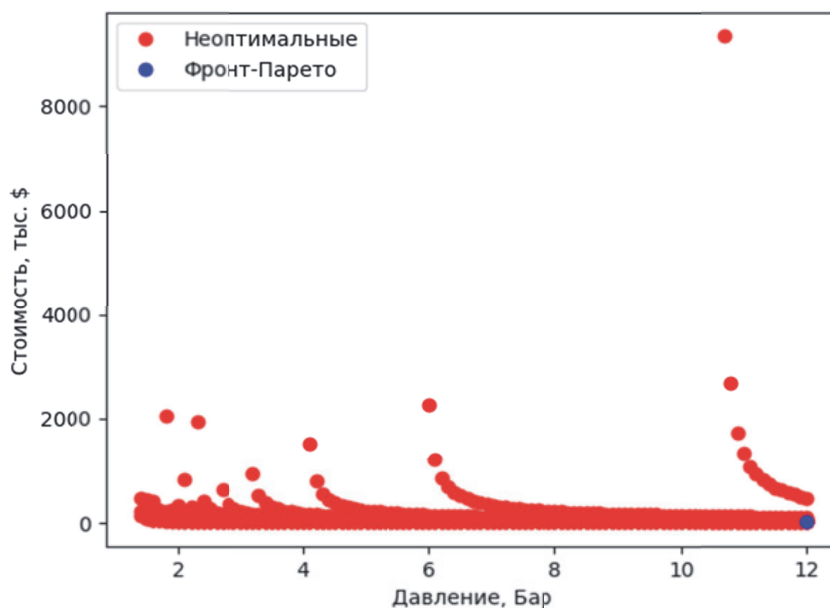


Рис. 4. Зависимость стоимости ожижителя от давления на выходе из компрессора

Таблица 4 – Параметры оптимальной конфигурации

М	N, кВт	Z, тыс. \$	P, бар
0,85	5,788	22,559	12

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен анализ ожижителя, работающего по циклу Капицы, включая его термодинамическое моделирование и технико-экономическую оценку. Основные выводы исследования заключаются в следующем:

Несмотря на то, что цикл Капицы традиционно относится к установкам низкого давления, результаты расчетов показали, что оптимальное давление сжатия составляет около 12 бар, а доля рабочего тела, отводимого на детандер, составляет 85%. Это обусловлено улучшенными характеристиками энергоэффективности и экономической целесообразности при повышенных давлениях.

Установка на основе цикла Капицы демонстрирует удельные затраты энергии порядка 0,68 кВт·ч/кг и требует значительных капитальных вложений. Оптимальная конфигурация с параметрами $M = 0,85$, $P = 12$ бар обеспечивает баланс между энергопотреблением 5,788 кВт и стоимостью оборудования 22,559 тыс. \$.

Хотя цикл Капицы уступает по энергоэффективности и стоимости некоторым другим криогенным системам [18,19], его преимущество заключается в относительной простоте конструкции и надежности, что может быть критически важным для определенных применений.

Таким образом, цикл Капицы представляет собой перспективное решение для криогенного ожижения воздуха, особенно в условиях, где важны надежность и умеренные давления. Дальнейшие исследования должны быть направлены на снижение энергозатрат и стоимости системы за счет оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капица П. Л. Новый метод ожижения воздуха с помощью турбодетандера / П. Л. Капица // Журнал технической физики. – 1939. – Т. 9. № 2. – С. 124–135.
2. Parametric performance maps for design and selection of Liquid Air Energy Storage system for mini to micro-grid scale applications // Energy Procedia. – 2019. – Т. 158. – DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.649.
3. Research on dynamic characteristics and control strategy of energy release process of liquid air energy storage system // Journal of Applied Physics. – 2023. – Т. 133. – DOI: 10.1063/5.0186843.
4. Liquid Air Energy Storage as a polygeneration system to solve the unit commitment and economic dispatch problems in micro-grids applications // Energy Procedia. – 2019. – Т. 158. – DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.660.
5. Thermodynamic analysis of the cascaded packed bed cryogenic storage based supercritical air energy storage system // Energy Procedia. – 2019. – Т. 158. – DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.639.
6. Levelised Cost of Storage (LCOS) analysis of liquid air energy storage system integrated with Organic Rankine Cycle // Energy. – 2020. – Т. 200. – С. 117275. – DOI: 10.1016/j.energy.2020.117275.

7. Investigation of a working fluid for cryogenic energy storage systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Т. 278. – С. 012069. – DOI: 10.1088/1757-899X/278/1/012069.
8. Performance analysis of liquid air energy storage utilizing LNG cold energy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Т. 171. – С. 012032. – DOI: 10.1088/1757-899X/171/1/012032.
9. Thermodynamic Analysis of a Hybrid Power System Combining Kalina Cycle with Liquid Air Energy Storage // Entropy. – 2019. – Т. 21. – № 3. – С. 220. – DOI: 10.3390/e21030220.
10. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2014. – Т. 53. – № 6. – С. 2498 – 2508.
11. Exergoeconomic, exergoenvironmental analysis and multi-objective optimization of a novel combined cooling, heating and power system for liquefied natural gas cold energy recovery // Energies. – 2018. – Т. 11. – № 10. – С. 2540. – DOI: 10.1016/j.energy.2023.126752.
12. An economic feasibility assessment of decoupled energy storage in the UK: With liquid air energy storage as a case study // Applied Energy. – 2018. – Т. 222. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.074.
13. Cryogenic Air Separation Process Integrated with Cold Utilization of Liquefied Natural Gas: Design, Simulation and Performance Analysis // Arabian Journal for Science and Engineering 48(12). – 2023. – DOI: 10.1007/s13369-023-08218-5.
14. Design and multi-objective optimization of combined air separation and ORC system for harnessing LNG cold energy considering variable regasification rates // International Journal of Hydrogen Energy 57. – 2024. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.033.
15. Optimization and Analysis of integrated hydrogen production and liquefaction system combining LNG and CO₂ Regeneration Rankine Cycle // Energy 324(183). – 2025. – DOI: 10.1016/j.energy.2025.135920.
16. Bilayer fiber membrane electrospun from MOF derived Co3S4 and PAN for solar steam generation induced sea water desalination // Journal of Solid State Chemistry 303. – 2021. – DOI: 10.1016/j.desal.2024.118180.
17. Geothermal assisted hydrogen liquefaction systems integrated with liquid nitrogen precooling; Thermoeconomic comparison of Claude and reverse Brayton cycle for liquid nitrogen supply // Process Safety and Environmental Protection 171. – 2023. – DOI: 10.1016/j.psep.2023.01.003.
18. Технико-экономический анализ блока зарядки криогенного аккумулятора энергии, работающего по циклу Гейландта // Вестник Международной академии холода. – 2025. – № 4. (в печати).
19. Технико-экономический анализ блока зарядки криогенного аккумулятора энергии, работающего по циклу Клода // Вестник РГТА имени П.А. Соловьева. – 2025- № 4. (в печати).

TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF A CHARGING UNIT FOR A CRYOGENIC ENERGY ACCUMULATOR OPERATING ON THE KAPITSA CYCLE

© 2025 E.V. Blagin, D.A. Uglanov, E.M. Biteryakova, V.V. Kazandaev, I.S. Pavlikhin

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

This article presents a technical and economic analysis of a charging unit for a cryogenic energy accumulator operating on the Kapitza cycle. The study includes thermodynamic modeling of the unit, an assessment of its energy efficiency, and an economic feasibility study. The authors examine the Kapitza cycle, traditionally classified as a low-pressure system, and demonstrate that optimal operating parameters are achieved at pressures of approximately 12 bar. This is supported by calculations demonstrating improved energy efficiency and economic benefits at elevated pressures. Key findings include a determination of specific energy consumption of 0.68 kW h/kg and an estimate of capital investment in the equipment. The optimal plant configuration, with parameters $M = 0.85$ (the proportion of air directed to the turboexpander) and a pressure of 12 bar, provides a balance between energy consumption (5.788 kW) and equipment cost (\$22,559,000). The study utilized mathematical models to calculate heat balances, compressor and expander operation, and to estimate the cost of the plant components. The results are presented as graphs of power consumption and cost versus pressure, as well as a Pareto frontier for identifying optimal configurations. The study is based on modern scientific publications and analytical methods, ensuring its scientific significance and practical applicability. The results may be useful to cryogenic system developers and energy specialists.

Keywords: cryogenic energy accumulator, Kapitza cycle, technical and economic analysis, air liquefaction, thermodynamic modeling, energy efficiency, turboexpander, compressor, optimal pressure, equipment cost.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-6-21-29

EDN: CRPANX

REFERENCES

1. Kapica P.L. Novyj metod ozhizheniya vozduha s pomoshch'yu turbodetandera / P.L. Kapica // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 1939. – Т. 9. № 2. – С. 124–135.
2. Parametric performance maps for design and selection of Liquid Air Energy Storage system for mini to micro-grid scale applications // Energy Procedia. – 2019. – Т. 158. – DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.649.
3. Research on dynamic characteristics and control strategy of energy release process of liquid air energy storage system // Journal of Applied Physics. – 2023. – Т. 133. – DOI: 10.1063/5.0186843.

4. Liquid Air Energy Storage as a polygeneration system to solve the unit commitment and economic dispatch problems in micro-grids applications // *Energy Procedia*. – 2019. – Т. 158. – DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.660.
5. Thermodynamic analysis of the cascaded packed bed cryogenic storage based supercritical air energy storage system // *Energy Procedia*. – 2019. – Т. 158. – DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.639.
6. Levelised Cost of Storage (LCOS) analysis of liquid air energy storage system integrated with Organic Rankine Cycle // *Energy*. – 2020. – Т. 200. – S. 117275. – DOI: 10.1016/j.energy.2020.117275.
7. Investigation of a working fluid for cryogenic energy storage systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Т. 278. – S. 012069. – DOI: 10.1088/1757-899X/278/1/012069.
8. Performance analysis of liquid air energy storage utilizing LNG cold energy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Т. 171. – S. 012032. – DOI: 10.1088/1757-899X/171/1/012032.
9. Thermodynamic Analysis of a Hybrid Power System Combining Kalina Cycle with Liquid Air Energy Storage // *Entropy*. – 2019. – Т. 21. – № 3. – S. 220. – DOI: 10.3390/e21030220.
10. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2014. – Т. 53. – № 6. – S. 2498 – 2508.
11. Exergoeconomic, exergoenvironmental analysis and multi-objective optimization of a novel combined cooling, heating and power system for liquefied natural gas cold energy recovery // *Energies*. – 2018. – Т. 11. – № 10. – S. 2540. – DOI: 10.1016/j.energy.2023.126752.
12. An economic feasibility assessment of decoupled energy storage in the UK: With liquid air energy storage as a case study // *Applied Energy*. – 2018. – Т. 222. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.074.
13. Cryogenic Air Separation Process Integrated with Cold Utilization of Liquefied Natural Gas: Design, Simulation and Performance Analysis // *Arabian Journal for Science and Engineering* 48(12). – 2023. – DOI: 10.1007/s13369-023-08218-5.
14. Design and multi-objective optimization of combined air separation and ORC system for harnessing LNG cold energy considering variable regasification rates // *International Journal of Hydrogen Energy* 57. – 2024. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.033.
15. Optimization and Analysis of integrated hydrogen production and liquefaction system combining LNG and CO2 Regeneration Rankine Cycle // *Energy* 324(183). – 2025. – DOI: 10.1016/j.energy.2025.135920.
16. Bilayer fiber membrane electrospun from MOF derived Co3S4 and PAN for solar steam generation induced sea water desalination // *Journal of Solid State Chemistry* 303. – 2021. – DOI: 10.1016/j.desal.2024.118180.
17. Geothermal assisted hydrogen liquefaction systems integrated with liquid nitrogen precooling; Thermoeconomic comparison of Claude and reverse Brayton cycle for liquid nitrogen supply // *Process Safety and Environmental Protection* 171. – 2023. – DOI: 10.1016/j.psep.2023.01.003.
18. Tekhniko-ekonomicheskij analiz bloka zaryadki kriogennogo akkumulyatora energii, rabotayushchego po ciklu Gejlantda // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. – 2025. – № 4. – 2025 (v pechati).
19. Tekhniko-ekonomicheskij analiz bloka zaryadki kriogennogo akkumulyatora energii, rabotayushchego po ciklu Kloda // *Vestnik RGATA imeni P.A. Solov'eva*. – 2025. – № 4. (v pechati).

Evgeny Blagin, Associate Professor, Department of Heat Engineering and Heat Engines. E-mail: blagin.ev@ssau.ru

Anna Klentak, Associate Professor, Department of Heat Engineering and Heat Engines. E-mail: klentak.as@ssau.ru

Dmitry Uglanov, Professor, Department of Heat Engineering and Heat Engines. E-mail: uglanov.da@ssau.ru

Ekaterina Biteryakova, Research Assistant, Scientific and Educational Center GDI-209. E-mail: katya.biteryakova@mail.ru

Vasiliy Kazandaev, Research Assistant, Scientific and Educational Center GDI-209. E-mail: kazandaev.vasya@mail.ru

Ivan Pavlikhin, Research Assistant, Scientific and Educational Center GDI-209. E-mail: ivan.pavlikhin163@gmail.com