

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

Благин Е. В.¹, Битерякова Е. М.¹, Казандаев В. В.¹, Павлихин И. С.¹

¹Самарский университет, г. Самара, blagin.ev@ssau.ru

Ключевые слова: криогенный аккумулятор, цикл Гейландта, технико-экономический анализ, оптимизация, детандер, криогенные системы, энергоэффективность.

Статья посвящена технико-экономическому анализу блока зарядки криогенного аккумулятора энергии, работающего по циклу Гейландта. Актуальность работы обусловлена ростом спросом на экологически чистые хранилища энергии.

Цикл Гейландта представлен на рис. 1.

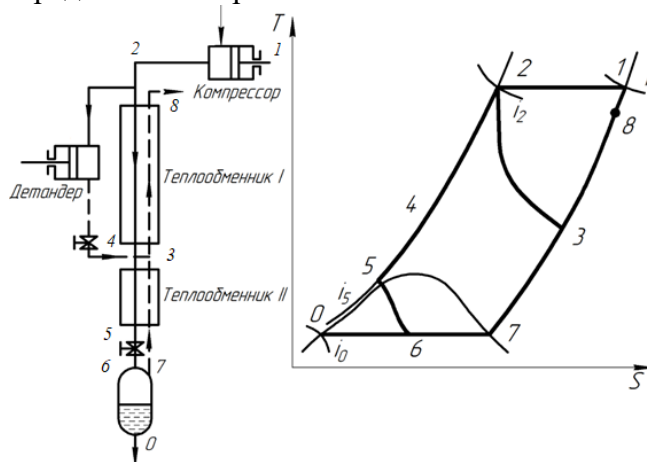


Рис. 1 – Цикл Гейландта

Газ сжимается в компрессоре до давления 20 МПа (линия 1-2), затем разделяется на два потока. Одна часть (М) направляется в детандер, расширяется в нем до давления 0,1 МПа с производством внешней работы (линия 2-3), охлаждается и поступает в теплообменник 1, где отдает свой холод другой части сжатого воздуха, поступающего из компрессора (линия 3-8). Эта часть воздуха (1 – М), охлажденная в теплообменнике 1 (линия 2-4), поступает в теплообменник 2, где охлаждается дросселированным воздухом (линия 4-5), а затем подводится к дроссельному вентилю, где дросселируется до давления 0,1 МПа, частично сжижаясь (линия 5-6), и собирается в сепараторе. Сконденсировавшийся газ отводится потребителю (точка 0). Образующиеся при дросселировании пары газа поступают в теплообменник 2, охлаждая поток сжатого газа (линия 7-3).

Для расчета была использована математическая модель:

- Тепловой баланс теплообменников:

$$(h_2 - h_4) \cdot (1 - M) = (h_8 - h_3) \cdot [(1 - y) \cdot (1 - M) + M]$$

$$(h_4 - h_5) \cdot (1 - M) = (h_3 - h_7) \cdot [(1 - y) \cdot (1 - M)]$$

$$h_5 = y \cdot h_0 + (1 - y) \cdot h_7$$

- Работа компрессора:

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

- Действительная работа сжатия газа выражается уравнением:

$$L = \frac{L_k}{\eta_{из}}$$

- Работа детандера:

$$L_d = M \cdot (h_2 - h_3)$$

- Абсолютные затраты энергии:
 $Q_0 = L_k - L_d.$

- Удельные затраты энергии:
 $N_{yd} = \frac{Q_0}{3600 \cdot \beta}.$

Затем был проведен экономический анализ:

- Зависимость стоимости теплообменных аппаратов от площади поверхности:

$$ZT_1 = \left(130 \cdot \left(\frac{F_1}{0,093} \right)^{0,78} \right) \cdot 1000$$

$$ZT_2 = \left(130 \cdot \left(\frac{F_2}{0,093} \right)^{0,78} \right) \cdot 1000$$

- Зависимость стоимости компрессора от мощности:

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

- Зависимость стоимости детандера от мощности:

$$ZN = 6000 \cdot W^{0,7}$$

- Общая стоимость криогенной установки:

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

В результате расчетов были получены фронт Парето, зависимость потребляемой мощности от давления на выходе из компрессора, а также зависимость стоимости оживителя от давления на выходе из компрессора. Графики представлены на рис. 2, рис. 3 и рис. 4.

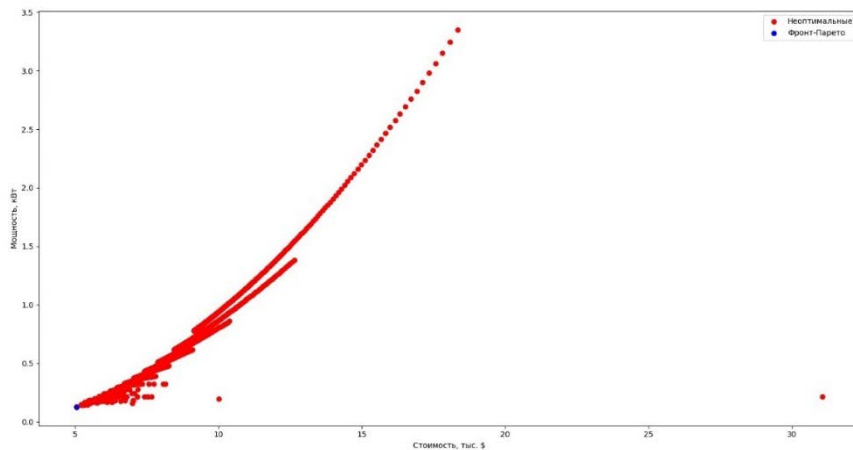


Рис. 2 - Фронт Парето для оживителей, работающих по циклу Гейландта

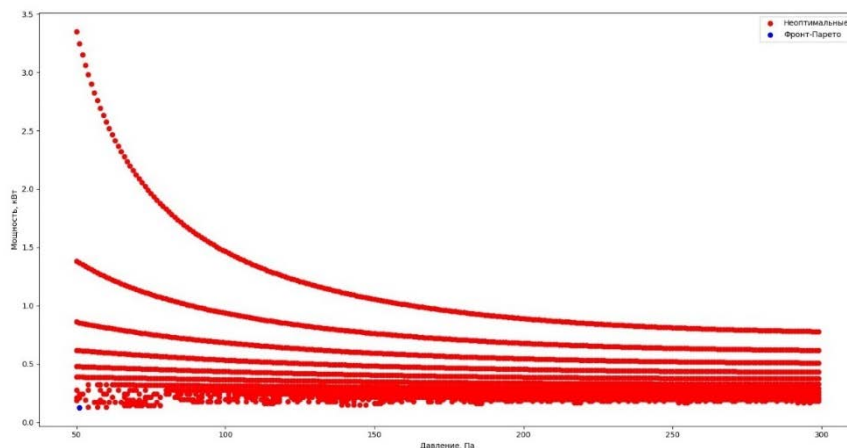


Рис. 3 - Зависимость потребляемой мощности оживителя от давления на выходе из компрессора

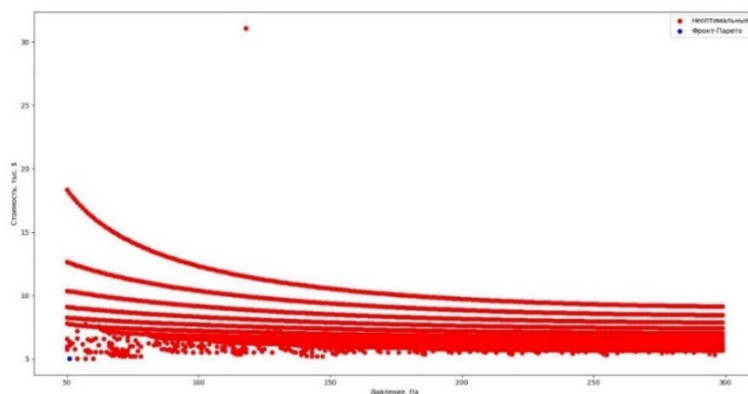


Рис. 4 - Зависимость стоимости охладителя от давления на выходе из компрессора

Анализ зависимостей показывает, что в отличие от цикла Линде увеличение давления не приводит к однозначному увеличению эффективности установки, так как кроме затрачиваемой работы появляется второй фактор – отвод части рабочего тела на детандер. Это кардинально меняет картину и теперь наиболее эффективной с точки зрения технико-экономического анализа будет установка с относительно небольшим давлением (50 бар), что фактически переносит ее в область циклов ожижения среднего давления (Клода).

Параметры для наиболее эффективной с точки зрения технико-экономического анализа конфигурации представлены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры оптимальной конфигурации

M	N, кВт	Z, тыс. \$	P, бар
0,7	0,1272	5,0478	51

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

Сведения об авторах

Благин Евгений Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, область научных интересов: термодинамика, теплопередача, криогенная техника.

Битерякова Екатерина Михайловна, лаборант-исследователь, Научно-образовательный центр ГДИ-209, область научных интересов: термодинамика, теплопередача, криогенная техника.

Казандаев Василий Владимирович, лаборант-исследователь, Научно-образовательный центр ГДИ-209, область научных интересов: термодинамика, теплопередача, криогенная техника.

Павлихин Иван Сергеевич, лаборант-исследователь, Научно-образовательный центр ГДИ-209, область научных интересов: термодинамика, теплопередача, криогенная техника.

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

Blagin E. V.¹, Uglanov D. A.¹, Biteriakova E. M.¹, Kazандаev V. V.¹, Pavlikhin I. S.¹

¹Samara University, Samara

The article presents a detailed techno-economic analysis of a cryogenic energy storage system operating on the Heylandt cycle. Based on a developed mathematical model that includes heat balance equations for heat exchangers, compressor work, and expander performance, optimal system parameters were determined. It was established that with a working fluid diversion fraction of $M = 0.7$ and pressure of 51 bar, minimal specific energy consumption of 0.1272 kW is achieved at an equipment cost of \$5,047.8. The economic assessment employed modern cost calculation models for the compressor, heat exchangers, and expander.