

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПАКТНОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ЗАМКНУТОГО ОБРАТНОГО ЦИКЛА БРАЙТОНА С ВОЗДУХОМ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Климовский С.Н.

ООО «КриОС», г. Владивосток, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты термодинамического анализа и численного моделирования замкнутого обратного цикла Брайтона, реализованного в компактной воздушной холодильной установке «КриОС». Базовая конфигурация установки, включающая центробежный компрессор и радиальный турбодетандер (диаметр рабочего колеса 100 мм, частота вращения 30 000 об/мин), обеспечивает холодильную мощность 13,1 кВт при коэффициенте холодопроизводительности $COP = 1,48$. Предложена и обоснована схема оптимизации, включающая два независимых улучшения: (1) квазиизотермическое сжатие с водяным впрыском (степень изотермичности $\alpha = 0,6$) и (2) регенеративный рекуператор (эффективность $\varepsilon = 0,70$). Численный эксперимент показал, что совместное применение обоих методов повышает COP до 2,38 — прирост 61% относительно базовой схемы при неизменной холодильной мощности.

Ключевые слова: обратный цикл Брайтона, турбодетандер, коэффициент холодопроизводительности, изотермическое сжатие, регенеративная теплообменная система, воздушная холодильная машина.

OPTIMIZATION OF THE COEFFICIENT OF PERFORMANCE OF A COMPACT UNIT BASED ON A CLOSED REVERSE BRAYTON CYCLE WITH AIR AS THE WORKING FLUID

Klimovskiy S.N.

KriOS LLC, Vladivostok, Russia

Abstract. The paper presents results of thermodynamic analysis and numerical simulation of a closed reverse Brayton cycle implemented in a compact air refrigeration unit "KriOS". An optimization scheme comprising quasi-isothermal compression with water injection (isothermality factor $\alpha = 0.6$) and a regenerative recuperator (effectiveness $\varepsilon = 0.70$) raises COP to 2.38, a 61% improvement at constant cooling capacity of 13.1 kW.

Keywords: reverse Brayton cycle, turboexpander, coefficient of performance, isothermal compression, regenerative heat exchanger, air refrigeration machine.

1. ВВЕДЕНИЕ

Компактные холодильные установки, работающие без синтетических хладагентов, остаются востребованным направлением в морской технике, пищевой промышленности и технологическом охлаждении в условиях ограниченного пространства. Воздушные машины, реализующие обратный цикл Брайтона, полностью лишены рисков утечки рабочего тела и взрывопожарной опасности, однако традиционно уступают парокompрессионным по коэффициенту холодопроизводительности [1, 2].

Проект «КриОС» направлен на создание компактной воздушной холодильной машины, конкурентоспособной в нишевых применениях, где экологическая безопасность рабочего тела является определяющим требованием. На первом этапе проекта разработан и рассчитан базовый прототип на основе одноступенчатого центробежного компрессора и радиального турбодетандера. Полученное расчётное значение COP = 1,48 при холодильной мощности 13,1 кВт превзошло ожидания для базовой адиабатической схемы, однако остаётся значительно ниже теоретического предела для данного температурного диапазона [3].

Настоящая работа посвящена анализу двух конфигурационных улучшений — квазиизотермического сжатия и регенеративного рекуператора — с целью повышения COP без увеличения холодильной мощности и принципиального изменения габаритов установки.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И БАЗОВЫЙ РАСЧЁТ

Установка «КриОС» реализует замкнутый обратный цикл Брайтона с воздухом в качестве рабочего тела. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Она включает следующие элементы: (1) центробежный компрессор, (2) воздухоохладитель высокого давления (НХ-hot, сброс тепла в атмосферу), (3) регенеративный рекуператор, (4) радиальный турбодетандер, (5) теплообменник холодной стороны (НХ-cold, полезное охлаждение нагрузки). Работа, совершаемая турбодетандером, механически передаётся на вал компрессора.

Рис. 1. Принципиальная схема замкнутого обратного цикла Брайтона — установка «КриОС»

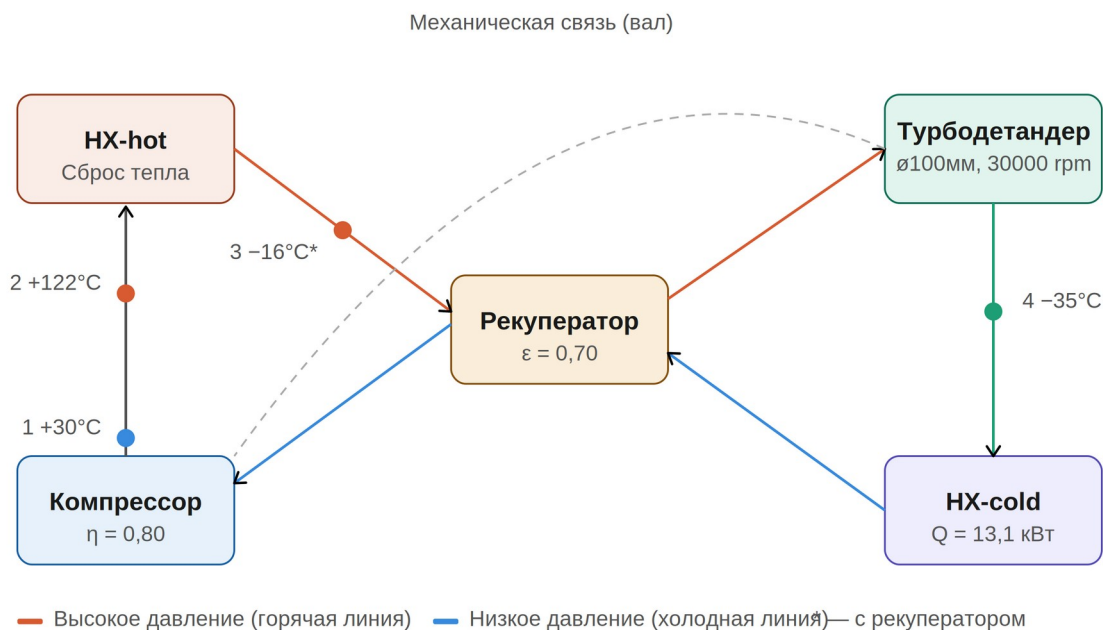


Рис. 1. Принципиальная схема замкнутого обратного цикла Брайтона — установка «КриОС». Красная линия — высокое давление (горячая сторона); синяя — низкое давление (холодная сторона); пунктир — механическая связь вала турбодетандера и компрессора. * — состояние с рекуператором.

Основные конструктивные параметры турбодетандера: диаметр рабочего колеса $D = 100$ мм; частота вращения $n = 30\,000$ об/мин; линейная скорость на периферии $u = 157,1$ м/с; изоэнтروпный КПД $\eta_t = 0,80$. Расчёт выполнен для следующих граничных условий: температура на входе в компрессор $T_1 = +30$ °С; степень давления $\pi = 3,0$; массовый расход $G = 0,200$ кг/с. Результирующая холодильная мощность $Q_{\text{cold}} = 13,1$ кВт, $\text{COP}_{\text{баз}} = 1,48$.

3. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Термодинамическая интерпретация предложенных улучшений наглядно представлена на T-S диаграмме (рис. 2). Базовый адиабатный цикл показан сплошными линиями; оптимизированный вариант — штриховыми. Уменьшение подъёма температуры при сжатии (точка $2 \rightarrow 2'$) и сдвиг точки входа в детандер ($3 \rightarrow 3'$) непосредственно отражают действие обоих методов.

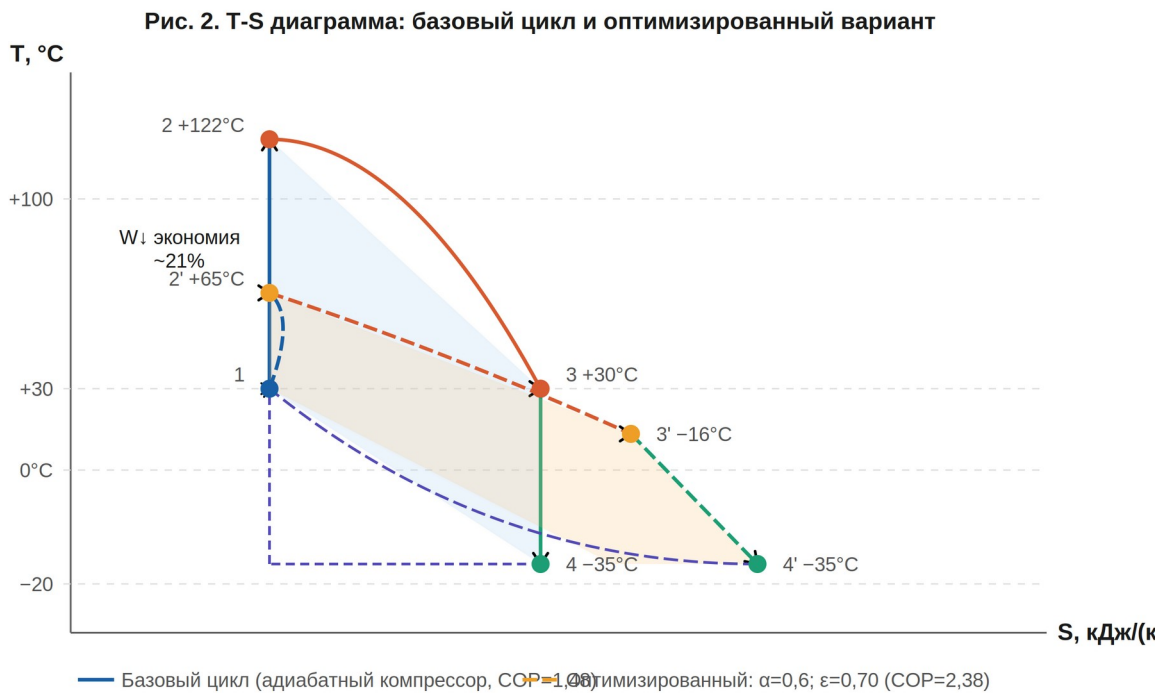


Рис. 2. T-S диаграмма обратного цикла Брайтона. Сплошные линии — базовый цикл (адиабатный компрессор, $\text{COP} = 1,48$); штриховые — оптимизированный вариант ($\alpha = 0,6$; $\epsilon = 0,70$, $\text{COP} = 2,38$). Заштрихованная область — экономия работы компрессора (~21%).

Квазиизотермическое сжатие с водяным впрыском (параметр $\alpha = 0,6$) снижает температуру воздуха после компрессора с $+122$ °С до $+65$ °С, уменьшая потребляемую компрессором мощность примерно на 21%. Регенеративный рекуператор ($\epsilon = 0,70$), установленный между выходом детандера и линией высокого давления перед детандером, снижает температуру T_3 с $+30$ °С до -16 °С, что дополнительно увеличивает холодопроизводительность детандера при неизменном π и G [4, 5].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Сравнение COP трёх конфигураций установки «КриОС» приведено на рис. 3. Из диаграммы следует, что совместное применение квазиизотермического сжатия ($\alpha = 0,6$) и регенерации ($\epsilon = 0,70$) обеспечивает повышение COP с 1,48 до 2,38 — рост на 61% при неизменной холодильной мощности 13,1 кВт. Достигнутое значение составляет 65% от теоретического предела Карно (COP_{Карно} = 3,66 для данного температурного диапазона), что сопоставимо с показателями промышленных гелиевых машин малой мощности [2, 7].

Рис. 3. Коэффициент холодопроизводительности COP — сравнение конфигураций установки «КриОС»

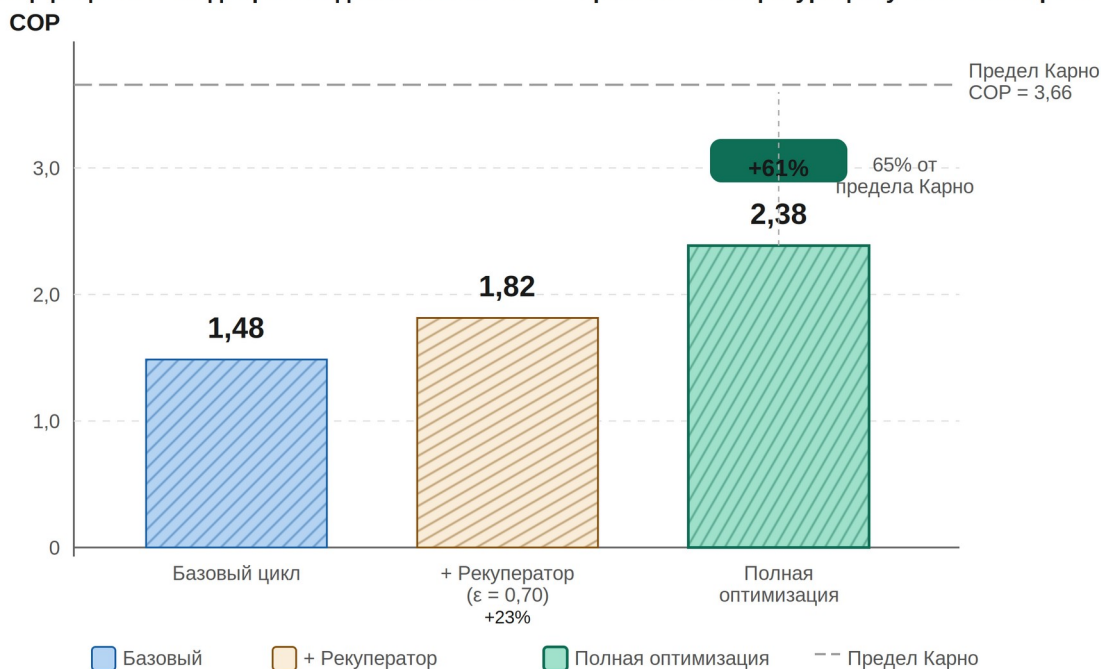


Рис. 3. Коэффициент холодопроизводительности COP — сравнение трёх конфигураций установки «КриОС». Горизонтальная штриховая линия — теоретический предел Карно (COP = 3,66). Бейдж «+61%» — прирост относительно базовой конфигурации. Штриховка столбцов введена для различения при ч/б печати.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Полученные результаты расширяют область применения воздушных машин в направлении промышленного технологического охлаждения в диапазоне от -20 °C до -40 °C. Принципиально важным является соотношение между циклом Брайтона и циклом Стирлинга в контексте конкретной установки. Турбодетандерный Брайтон превосходит Стирлинг при средних температурах и относительно больших массовых расходах; Стирлинг наиболее эффективен при глубоких температурах (ниже -80 °C), где регенерация работает в оптимальном режиме [8]. Это делает перспективной каскадную конфигурацию: Брайтон-турбодетандер — первая ступень (до -40 °C), Стирлинг — вторая ступень (до -100 °C и ниже).

Практическая реализация водяного впрыска в центробежный компрессор при $n = 30\ 000$ об/мин требует применения форсунок с размером капель $d < 20$ мкм и

эффективного влагоотделения перед детандером. Оба аспекта требуют экспериментального подтверждения на физическом прототипе.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена методология оптимизации COP компактной воздушной холодильной установки «КриОС». Показано, что:

- 1) квазиизотермическое сжатие с водяным впрыском при $\alpha = 0,60$ повышает COP на 23% (с 1,48 до 1,82);
- 2) регенеративный рекуператор с $\varepsilon = 0,70$ даёт дополнительный прирост COP на 38%;
- 3) совместное применение обоих методов обеспечивает $COP = 2,38$ — 65% от предела Карно;
- 4) каскадная архитектура Брайтон + Стирлинг перспективна для расширения диапазона до -100 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Whitfield A., Baines N.C. Design of Radial Turbomachines. Longman Scientific & Technical, 1990. 397 p.
- [2] Barron R.F. Cryogenic Systems. 2nd ed. Oxford University Press, 1985. 512 p.
- [3] Ackermann R.A. Cryogenic Regenerative Heat Exchangers. Springer, 1997. 268 p.
- [4] Kim T.S., Ro S.T. Power augmentation of combined cycle power plants using cold energy of liquefied natural gas // Energy. 2000. Vol. 25. No. 9. P. 841–856.
- [5] Zheng Q., Sun Y., Li S., Wang Y. Thermodynamic analyses of wet compression process in the compressor of gas turbine // Journal of Turbomachinery. 2002. Vol. 124. No. 4. P. 692–697.
- [6] Климовский С.Н. Внутренний технический отчёт по проекту «КриОС». ООО «КриОС», 2025. (Рукопись.)
- [7] Radebaugh R. Development of the pulse tube refrigerator as an efficient and reliable cryocooler // Proc. Inst. Refrigeration (London). 1999–2000. P. 1–29.
- [8] Walker G. Stirling Engines. Clarendon Press, 1980. 532 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Климовский Семён Николаевич — инженер-исследователь, ООО «КриОС», г. Владивосток. Область научных интересов: компактные воздушные холодильные машины, термодинамика обратных циклов, турбодетандерные системы.