

экономическую выгоду и социальные преимущества. Применяя экологичную упаковку, компания показывает клиентам, что она ценит не только прибыль, но и благополучие общества, и заботу об окружающей среде, тем самым укрепляя репутацию бренда и повышая доверие клиентов.

Список использованных источников

1. Зеленый маркетинг. Правда или уловка? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vc.ru/marketing/1842172-zelenyi-marketing-pravda-ili-ulovka> (дата обращения: 26.10.2025).
2. Экологически ответственный маркетинг: как бренды интегрируют устойчивость в свои стратегии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stik.pro/blog/ekologichieski-otvietstviennyi-markieting/> (дата обращения: 26.10.2025).
3. Экологические сертификаты: укрепление доверия в зеленом маркетинге [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fastercapital.com/ru/content/Экологические-сертификаты--укрепление-доверия-в-зеленом-маркетинге.html> (дата обращения: 26.10.2025).
4. Что такое устойчивая упаковка: четкое руководство по переходу на экологичные решения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://somewang.com/ru/blog/what-is-sustainable-packaging-a-clear-guide-for-eco-friendly-shift/> (дата обращения: 26.10.2025).
5. Экоупаковка как основной элемент продвижения экологичного потребления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <file:///C:/Users/ASUS/Downloads/96-235-2-PB.pdf> (дата обращения: 26.10.2025).

УДК 621.039

Д.В. Паторкин, И.А. Максимов, В. Р. Жихарева
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
Москва, Россия

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ S-CO₂ ЦИКЛОВ ДЛЯ АСММ «ШЕЛЬФ-М»

***Аннотация.** Проведено сравнение трех вариантов s-CO₂-цикла для условий РУ «Шельф-М» с оптимизацией параметров методом Нелдера–Мида. Получены зависимости КПД от давления и выявлено влияние перехода через псевдокритическую область на оптимальные режимы. Показано, что*

максимальная эффективность 29,2% достигается рекомпрессионным циклом при $P_0 = 17,6$ МПа и $x = 0,56$.

D.V. Patorkin, I.A. Maksimov, V.R. Zhikhareva

National Research University "MPEI"

Moscow, Russia

EFFICIENCY ANALYSIS OF S-CO₂ CYCLES FOR THE «SHELF-M» SMR

Abstract. *A comparison of three s-CO₂ Brayton cycle configurations for the Shelf-M reactor unit was carried out with parameter optimization using the Nelder–Mead method. The obtained efficiency–pressure curves demonstrate a pronounced influence of the pseudo-critical region on optimal operating conditions. It is shown that the recompression cycle provides the highest efficiency of 29.2% at $P_0 = 17.6$ MPa and $x = 0.56$.*

Атомные станции малой мощности (АСММ) рассматриваются как перспективный источник энергоснабжения для удаленных и изолированных районов, где доставка традиционного топлива затруднена и отсутствует развитая энергетическая инфраструктура. Для таких регионов, особенно в условиях Крайнего Севера, актуальны разработки компактных, транспортабельных ядерных энергоблоков. Одним из ключевых факторов повышения эффективности и технологической реализуемости энергетических установок на базе АСММ является выбор рациональной схемы преобразования тепловой энергии реактора в электрическую. Для маломощных интегральных реакторных установок (РУ) с умеренными параметрами теплоносителя, таких как «Шельф-М», целесообразно рассматривать альтернативу традиционному паровому циклу в виде замкнутых термодинамических циклов Брайтона с рабочим телом на основе сверхкритического диоксида углерода (s-CO₂) [1]. Данные циклы характеризуются высокой эффективностью уже при температурных уровнях порядка 280–320 °С, что соответствует характеристикам легководных реакторов. Дополнительными преимуществами являются высокая плотность рабочего тела, позволяющая существенно снизить габариты и массу турбомашин, а также компактность теплообменного оборудования [2,3]. Это, в свою очередь, открывает возможность предварительной полной сборки и испытания энергоблока в заводских условиях с последующей транспортировкой на площадку эксплуатации в виде законченного модуля, что особенно важно для труднодоступных районов. Таким образом, циклы на s-CO₂ представляют собой перспективное решение для применения в составе АСММ,

ориентированных на энергообеспечение удаленных и изолированных потребителей.

Цикл Брайтона на $s\text{-CO}_2$ может реализовываться в различных конфигурациях, отличающихся уровнем энергоэффективности и конструктивной сложностью. В настоящей работе рассмотрены три схемы: простая (без регенерации) (1), с регенерацией (2) и с рекомпрессией (3). Каждая из конфигураций проанализирована на предмет применимости к условиям РУ «Шельф-М» и возможности достижения максимального внутреннего абсолютного КПД (КПД) при допустимых тепловых параметрах. Объектом исследования являются варианты термодинамических циклов на $s\text{-CO}_2$ в составе АСММ с реактором «Шельф-М» и их энергетические характеристики. Основные параметры, использованные в расчетах, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры, используемые для расчета [4]

Параметр РУ	Значение	Параметр	Значение
Тепловая мощность реактора, МВт	35,2	Внутренний относительный КПД турбомашин, %	90
Давление первого контура, МПа	14,7	Внутренний относительный КПД компрессоров, %	80
Температура теплоносителя на входе в реакторный теплообменник, °С	308	Минимальный температурный напор в реакторном теплообменнике, °С	20
Температура теплоносителя на выходе из реакторного теплообменника, °С	271	Минимальный температурный напор в регенераторах, °С	10
Рабочая среда первого контура	H ₂ O	Температура холодного источника, °С	35

На основании расчетных данных построены зависимости термического КПД трех вариантов $s\text{-CO}_2$ -цикла от начального давления P_0 (рис. 1, а). Во всех точках на графике показан КПД при оптимальных параметрах цикла, определенных методом Нелдера–Мида (критерий – $\max(\text{КПД})$) для каждого значения P_0 .

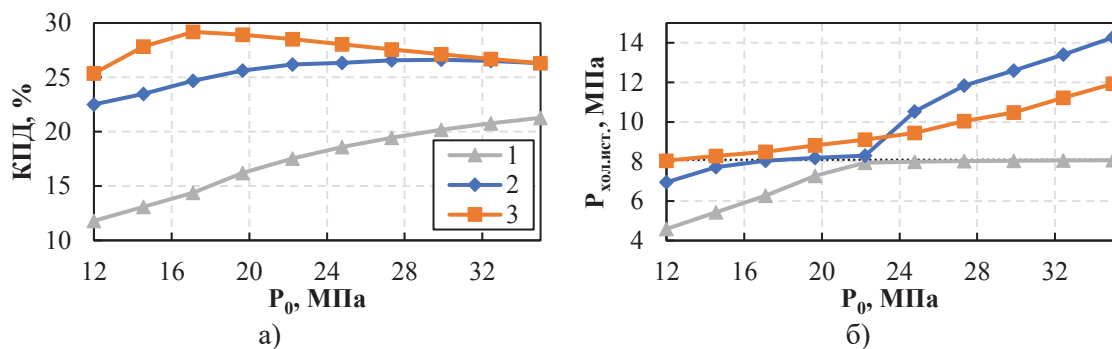


Рис. 1- Зависимость КПД (а) и оптимального нижнего давления $P_{\text{хол.ист}}$ (б) трех вариантов $s\text{-CO}_2$ -цикла от начального давления P_0

Для простой схемы наблюдается практически монотонный рост КПД от $\approx 11,7$ до $21,3$ % при увеличении P_0 с 12 до 35 МПа. Для схемы с регенерацией эффективность возрастает с $22,5$ до $26,3$ % при $P_0 = 22$ – 30 МПа, после чего на высоких давлениях тенденция переходит в слабое плато с незначительным ростом. Рекомпрессионная схема демонстрирует наибольшие значения КПД во всем диапазоне: максимум порядка $29,2$ % достигается при $P_0 = 17,6$ МПа, после чего эффективность плавно уменьшается до $26,3$ % при 35 МПа.

На рис. 1, б показано изменение оптимального нижнего давления $P_{\text{хол.ист.}}$ для трех вариантов цикла. Во всех случаях $P_{\text{хол.ист.}}$ растет с увеличением P_0 , но характер роста различается. Для простой схемы $P_{\text{хол.ист.}}$ остается ниже псевдокритического давления CO_2 (≈ 8 МПа) и увеличивается умеренно. Для схемы с регенерацией оптимальное $P_{\text{хол.ист.}}$ подходит к псевдокритической области при $P_0 = 20$ – 22 МПа, после чего рост ускоряется. Для рекомпрессионного цикла $P_{\text{хол.ист.}}$ находится выше псевдокритического давления во всем диапазоне, и его увеличение с ростом P_0 выражено сильнее.

Поскольку именно рекомпрессионная схема демонстрирует наибольшую эффективность среди рассмотренных вариантов, дальнейший анализ выполнен для нее. На рисунке 2 представлено распределение полей КПД рекомпрессионного s- CO_2 -цикла в координатах начального давления P_0 и доли рекомпрессии x . Изолинии эффективности формируют выраженный максимум, соответствующий оптимальной комбинации параметров. Область максимума достаточно узкая, что свидетельствует о высокой чувствительности схемы к выбору режимных параметров. Анализ двумерного поля показывает, что увеличение давления P_0 повышает эффективность лишь до определенной границы; дальнейший рост приводит к росту удельных затрат на компримирование. Аналогично изменение доли рекомпрессии x сначала улучшает температурный профиль в регенераторах и снижает тепловые потери на охлаждение, однако при слишком высокой доле перепуска ухудшается степень регенерации, и КПД снижается. Максимальная энергоэффективность наблюдается при параметрах $P_0 = 17,6$ МПа и $x = 0,56$. В табл. 2 приведены параметры в узлах схемы при полученных оптимальных значениях P_0 и x .

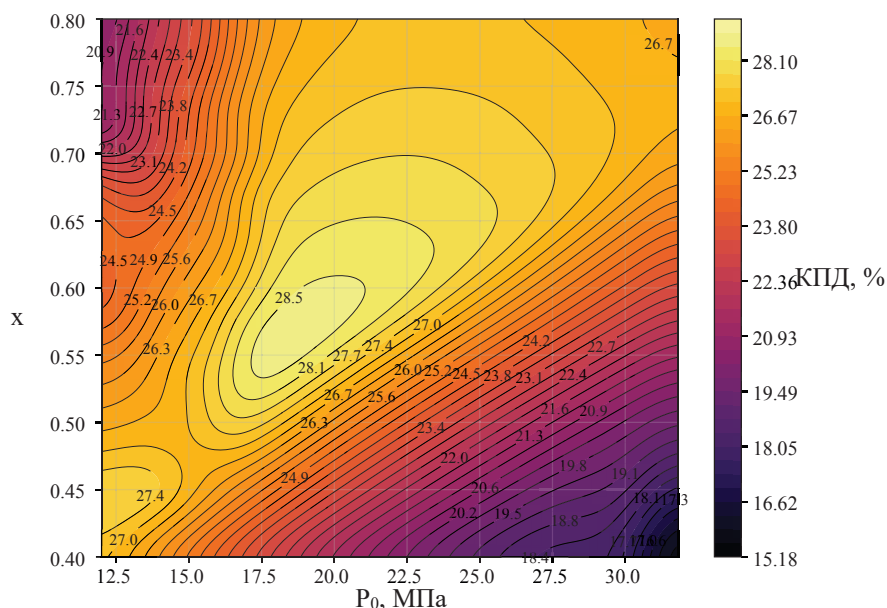


Рис. 2- Поле распределения КПД рекompрессионного s-CO₂-цикла в координатах начального давления P_0 и доли рекompрессии x

Подводя итоги, в работе выполнено сравнение трех вариантов CO₂-циклов для условий РУ «Шельф-М». Расчёты показывают, что рекompрессионный цикл обеспечивает максимальный внутренний КПД — до 29,2 % при $P_0 = 17,6$ МПа и $x = 0,56$, что заметно выше значений для простой (до 21 %) и регенеративной (до 26 %) схем. Оптимизация параметров выявила выраженный максимум эффективности и высокую чувствительность к начальному давлению и доле рекompрессии. Применение рекompрессионного s-CO₂-цикла позволяет увеличить эффективность на 0,8 % абсолютных по сравнению с традиционным пароводяным циклом Ренкина для данного уровня тепловой мощности (КПД Ренкина $\approx 28,4$ %). Таким образом, рекompрессионный CO₂-цикл является наиболее перспективным вариантом для интеграции с АСММ «Шельф-М» и формирует основу для дальнейшей компоновочной и теплотехнической оптимизации энергоблока.

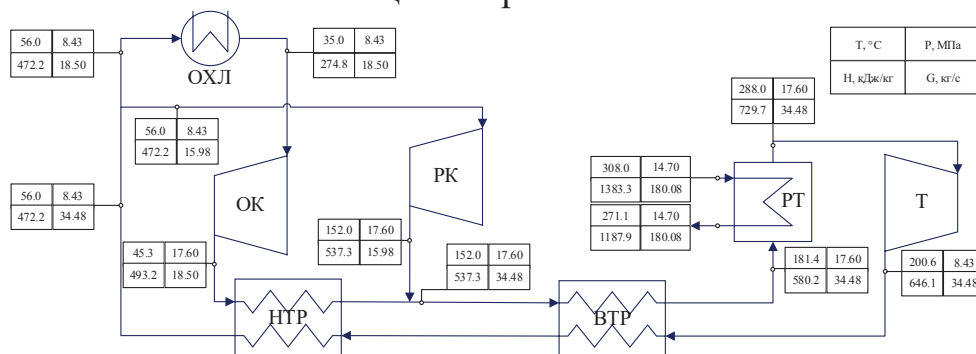


Рис. 3 - Параметры в узлах рекompрессионного s-CO₂-цикла: PT – реакторный теплообменник; T – турбина; ВТР/НТР – высоко-/низкотемпературный регенератор,

ОХЛ – холодный источник; ОК – основной компрессор; РК – рекомпрессионный компрессор

Исследование выполнено в Национальном исследовательском университете МЭИ за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-30037, <https://rscf.ru/project/25-79-30037/>

Список использованных источников

1. Wu P. et al. Supercritical CO₂ Brayton cycle design for small modular reactor with a thermodynamic analysis solver //Science and Technology of Nuclear Installations. – 2020. – Т. 2020. – №. 1. – С. 5945718.
2. Dostal V., Hejzlar P., Driscoll M. J. High-performance supercritical carbon dioxide cycle for next-generation nuclear reactors //Nuclear technology. – 2006. – Т. 154. – №. 3. – С. 265-282.
3. Ahn Y. et al. Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development //Nuclear engineering and technology. – 2015. – Т. 47. – №. 6. – С. 647-661.
4. Кулаков Г. В. и др. Обоснование конструкции и материалов компонентов ТВЭЛов для атомных станций мощностью не выше 10 МВт //Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – №. 6. – С. 310-313.

УДК 378.147:621.3

А. В. Повный

Гомельский государственный политехнический колледж
Гомель, Беларусь

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММАХ КОЛЛЕДЖЕЙ: ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ И ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

***Аннотация.** Рассматривается инновационный подход к подготовке специалистов по специальности «Монтаж и эксплуатация электрооборудования» в области возобновляемых источников энергии. Описывается опыт внедрения в Гомельском политехническом колледже учебного предмета «Возобновляемые источники энергии», интегрирующего теорию с практикой в ресурсном центре.*

A.V. Povny

Gomel Polytechnic College