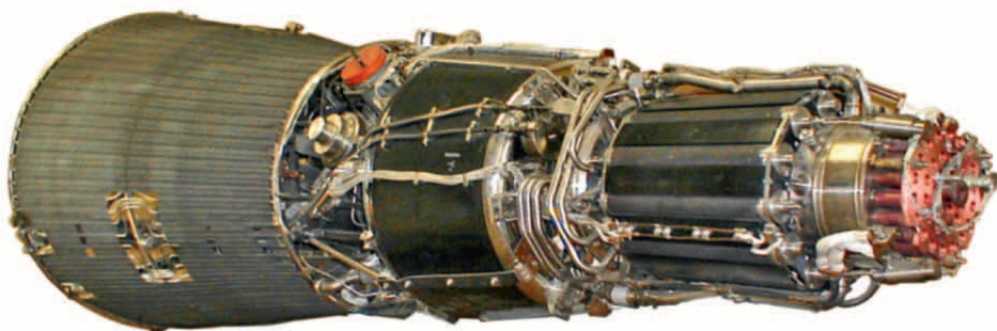




НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

ТЕПЛОСИЛОВЫЕ ЦИКЛЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК



**ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
И КРИТЕРИИ ВЫБОРА ЯЭУ
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ**

**ТЕРМИЧЕСКИЙ КПД
КАК СТЕПЕНЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЦИКЛА**

**ЦИКЛ РЕНКИНА
И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ –
ПЕРЕХОД НА СКД**

**ЦИКЛ БРАЙТОНА
И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО
РАЗВИТИЯ – ПРИМЕНЕНИЕ CO₂
СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ**

**ЦИКЛЫ ПРЯМОГО
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ**

**ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ
КОСМИЧЕСКИХ ЯЭУ**

Государственная корпорация
по атомной энергии «Росатом»
Частное учреждение «Наука и инновации»
Центр аналитических исследований
и разработок



Государственная корпорация «Росатом»
Частное учреждение «Наука и инновации»
Центр аналитических исследований и разработок
Акционерное общество «Научно-исследовательский институт
«Научно-производственное объединение «ЛУЧ»

ТЕПЛОСИЛОВЫЕ ЦИКЛЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Москва
2023

УДК 621.311

ББК 31.4

Т 34

Т 34 Теплосиловые циклы высокотемпературных ядерных энергетических установок. Аналитический отчет / Журавлев И.Б., Зарицкий Г.А., Колесников Е.Г., Птицын П.Б. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2023. – 92 с.

ISBN 978-5-498-01001-4

© ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2023.

Подписано в печать 31.08.2023. Формат 60x84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Rosatom. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,70.

Тираж 150 экз. Заказ № 8853.

Отпечатано в ООО «Элефант»:

610004, г. Киров, ул. Ленина, зд. 2б,

www.hibox.pro

Организация-доцент:

Государственная корпорация «Росатом», частное учреждение «Наука и инновации», отраслевой Центр аналитических исследований и разработок, г. Москва.

Название работы:

Теплосиловые циклы высокотемпературных ядерных энергетических установок.

Авторы:

Журавлев И.Б., руководитель Группы приоритетных направлений научно-технологического развития отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации».

Зарицкий Г.А., ведущий научный сотрудник отделения НТЦ «ИСТОК» АО «НИИ НПО «ЛУЧ».

Колесников Е.Г., директор отделения НТЦ «ИСТОК» АО «НИИ НПО «ЛУЧ».

Птицын П.Б., заместитель директора – директор отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации».

Рецензенты:

Каплар Е.П., Солдатов В.А., Соловьев С.Л.

Реферат:

Настоящий аналитический отчет описывает результаты аналитического исследования термодинамических циклов, применяемых в ядерных энергетических установках – как в действующих, так и в перспективных. В ходе исследования проведено сравнение КПД различных термодинамических циклов, их преимуществ и недостатков. По итогам аналитического исследования представлены выводы и рекомендации для практического применения в работе ГК «Росатом».

Аналитический отчет подготовлен в рамках Плана деятельности отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации» на 2022 год (п. 3.4.4).

Ключевые слова:

атомная энергетика, ядерные энергетические установки, термодинамические циклы, КПД, цикл Ренкина, цикл Брайтона, методы прямого преобразования энергии, космические ядерные энергетические установки.

Title:

Thermodynamic cycles of high temperature nuclear power installations.

Authors:

Zhuravlev I.B., Ptitsyn P.B. Centre of Analytical R&D (CARD), Private Enterprise «Science and Innovations», State Atomic Energy Corporation Rosatom, Moscow, Russian Federation.

Zaritsky G.A., Kolesnikov E.G. Joint Stock Company «Scientific Research Institute Scientific Industrial Association «Luchl», Podolsk, Russian Federation.

Reviewers:

Kaplar E.P., Soldatov V.A., Solovyev S.L.

Abstract:

The report describes the results of the analytical study of thermodynamic cycles used in nuclear power installations – functioning now and future ones. The study compares the thermal effectiveness of various thermodynamic cycles, their advantages and disadvantages. Conclusions and recommendations are presented for practical application in the work of Rosatom State Corporation.

Keywords:

nuclear energy, nuclear power installations, thermodynamic cycles, thermal effectiveness, Rankine cycle, Brayton cycle, direct power conversion, space nuclear power installations.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ЦИКЛ РЕНКИНА (ПАРОТУРБИННЫЙ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДЫ В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ	11
1.1. Теоретические основы	11
1.2. Практическая реализация	15
1.3. Перспективы развития	19
2. ЦИКЛ БРАЙТОНА (ГАЗОТУРБИННЫЙ)	23
2.1. Теоретические основы	23
2.2. Практическая реализация	26
2.3. Перспективы развития	31
3. ТЕПЛОСИЛОВЫЕ ЦИКЛЫ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ	41
3.1. Цикл термоэлектрической установки	41
3.2. Цикл термоэмиссионной установки	50
3.3. Цикл термофотовольтаического преобразователя	53
3.4. Цикл МГД-установки	54
4. ПРИМЕНЕНИЕ ЯЭУ В КОСМИЧЕСКОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ	59
4.1. Состояние разработки космических ЯЭУ	59
4.2. Функциональные схемы космических ЯЭУ	62
4.3. Сравнительный анализ ЯЭУ космического применения, построенных на различных принципах преобразования энергии	65
4.3.1. Направления сравнительного анализа	65
4.3.2. Уровень достоверности закладываемых в расчетную и проектную документацию параметров	66
4.3.3. Массогабаритные характеристики ЯЭУ	67
4.3.4. Ресурсоспособность и надежность ЯЭУ как функции совершенства конструкции и ее технологичности	69
4.3.5. Наличие проблемных вопросов при создании космических ЯЭУ	70
4.3.6. Результаты сравнительного анализа космических ЯЭУ различных типов	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	84
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	87



ВВЕДЕНИЕ

Эффективность ядерной энергетической установки (ЯЭУ) во многом определяется применяемым способом преобразования тепловой энергии, выделяемой в процессе деления или синтеза атомных ядер, в механическую и далее – в электрическую энергию.

К настоящему времени ЯЭУ, в которых источником тепловой энергии является энергия деления атомных ядер, реализуемая в реакторах деления, нашли применение в наземных АЭС, в корабельных энергоустановках и в перспективной космической технике. При этом для каждой области применения сформировались определенные типоразмеры ЯЭУ, характеризующиеся как типами и размерностями ядерных реакторов, так

и конструктивными отличиями ключевого компонента энергетической установки – системы преобразования тепловой энергии ядерного реактора в электрическую энергию.

По способу преобразования энергии все ЯЭУ можно разделить на энергоустановки с машинным и прямым преобразованием. К первым относятся ЯЭУ с электромеханическим способом преобразования: на основе турбогенератора (газотурбинные и паротурбинные) и на основе двигателя Стирлинга. Ко второму классу преобразователей энергии относятся устройства на основе термоэлектрического, термоэмиссионного и фотовольтаического способов преобразования. Обычно к ним относят также установки с магнитогидродинамическими (МГД) генераторами, хотя это отнесение условно, поскольку МГД-генераторы все же используют в качестве промежуточной стадии преобразование теплоты в кинетическую энергию рабочего тела.

В соответствии со своими свойствами каждый из перечисленных способов преобразования энергии нашел приемлемую область применения. Так, турбомашинное преобразование энергии используется в наиболее развитой наземной энергетике в составе АЭС большой и средней мощности.

Прямое преобразование энергии, благодаря своей автономности и относительно невысокому уровню востребованной электроэнергии, может найти наиболее эффективное применение в ЯЭУ, предназначенных для энергоснабжения удаленных и изолированных регионов, а также в космической, включая напланетную, ядерной энергетике.

Ниже представлены тенденции развития ядерной энергетике в этих областях применения. При этом критерии выбора типа ЯЭУ для каждой из этих областей могут заметно отличаться. Так, если для наземного применения одним из основных критериев, кроме надежности, являются технико-экономические показатели, во многом определяемые удельными капитальными затратами, зависящими, в свою очередь, от выбора теплоносителя, то для космической техники ключевыми являются минимальные массогабаритные характеристики энергоисточника при его высокой надежности и автономности.

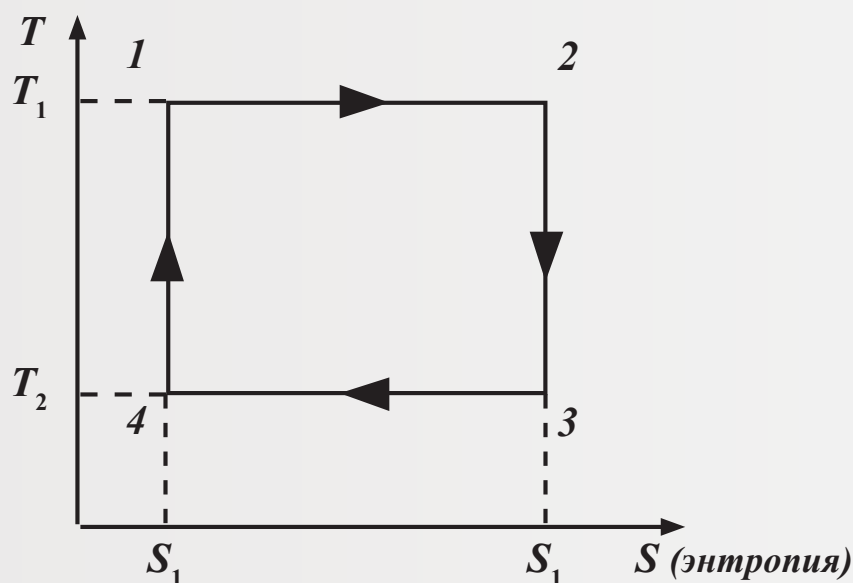
Безусловно, в обоих случаях указанные критерии базируются на параметрах эффективности преобразования энергии, характеризующих КПД энергоустановки, влияющим на тепловую мощность реактора при заданной электрической мощности и на расход топлива (пусть даже топливная составляющая и не является столь «весомой» в общей структуре затрат ЯЭУ, в отличие от тепловой энергетической установки).

Все тепловые машины работают в циклическом режиме. Термическим КПД цикла называют отношение производимой в цикле работы L к количеству теплоты Q , подведенному к рабочему телу в цикле [1]:

$$\eta_T = L/Q \quad (1)$$

Термический КПД характеризует степень эффективности того или иного цикла: чем выше КПД, тем эффективнее цикл. Анализ эффективности термодинамических циклов был начат в работе С. Карно 1824 г. «Размышление о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Рассмотренный Карно цикл состоит из двух изотерм и двух адиабат и имеет, следовательно, в диаграмме «температура – энтропия» (T - S диаграмме) вид прямоугольника (рис. 1).

Рисунок 1. Цикл Карно в T - S диаграмме



Тепло подводится к рабочему телу в изотермическом процессе (1–2 на рис. 1) при температуре T_1 , далее рабочее тело совершает работу в адиабатическом процессе (т.е. без теплообмена с внешней средой, 2–3 на рис. 1), охлаждаясь до температуры T_2 . Далее в изотермическом процессе при температуре T_2 имеет место отвод тепла от рабочего тела (3–4 на рис. 1), которое затем нагревается при адиабатическом сжатии до температуры T_1 (4–1 на рис. 1), и цикл за-

мыкается. Следует отметить, что цикл Карно является обратимым, т.е. может быть осуществлен в противоположном направлении, что, как правило, несправедливо для реальных циклов. В своей работе С. Карно доказал теорему, носящую его имя, содержание которой состоит в том, что термический КПД обратимого цикла не зависит от рода рабочего тела и определяется только температурами нагревателя и охладителя:

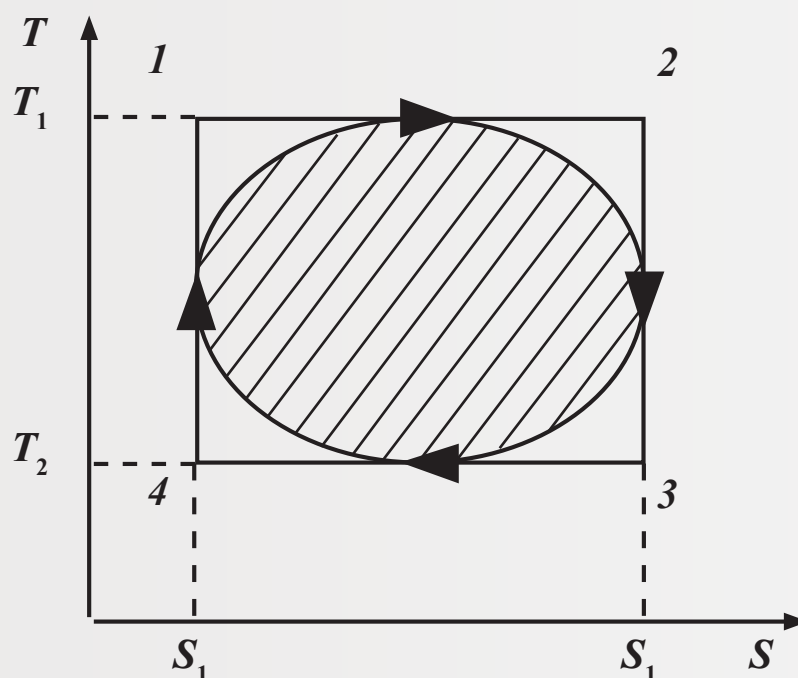
$$\eta_T = (T_1 - T_2) / T_1 \quad (2)$$

Из формулы (2), в частности, следует, что для повышения термического КПД цикла желательно достигнуть как можно более высокого значения температуры T_1 источника тепла, поскольку понижение температуры холодильника T_2 связано с существенными ограничениями (она не может быть ниже температуры окружающей среды).

Термический КПД любого обратимого цикла меньше термического КПД обратимого цикла Карно, осуществляемого между крайними температурами этого цикла, а поскольку термический КПД любого необратимого цикла меньше термического КПД обратимого цикла, осуществляемого между теми же крайними температурами, то, следовательно, термический КПД любого необратимого цикла заведомо меньше термического КПД цикла Карно, осуществляемого между теми же крайними температурами. Иными словами, термический КПД цикла Карно является предельным для заданных крайних температур T_1 и T_2 .

Одним из способов определения термического КПД обратимого цикла является умножение термического КПД цикла Карно, рассчитанного по формуле (2) при тех же крайних температурах T_1 и T_2 , на «коэффициент заполнения», равный отношению площадей, занимаемых в T - S диаграмме рассматриваемым циклом и «описанным» вокруг него циклом Карно (рис. 2).

Рисунок 2. Заполнение цикла Карно



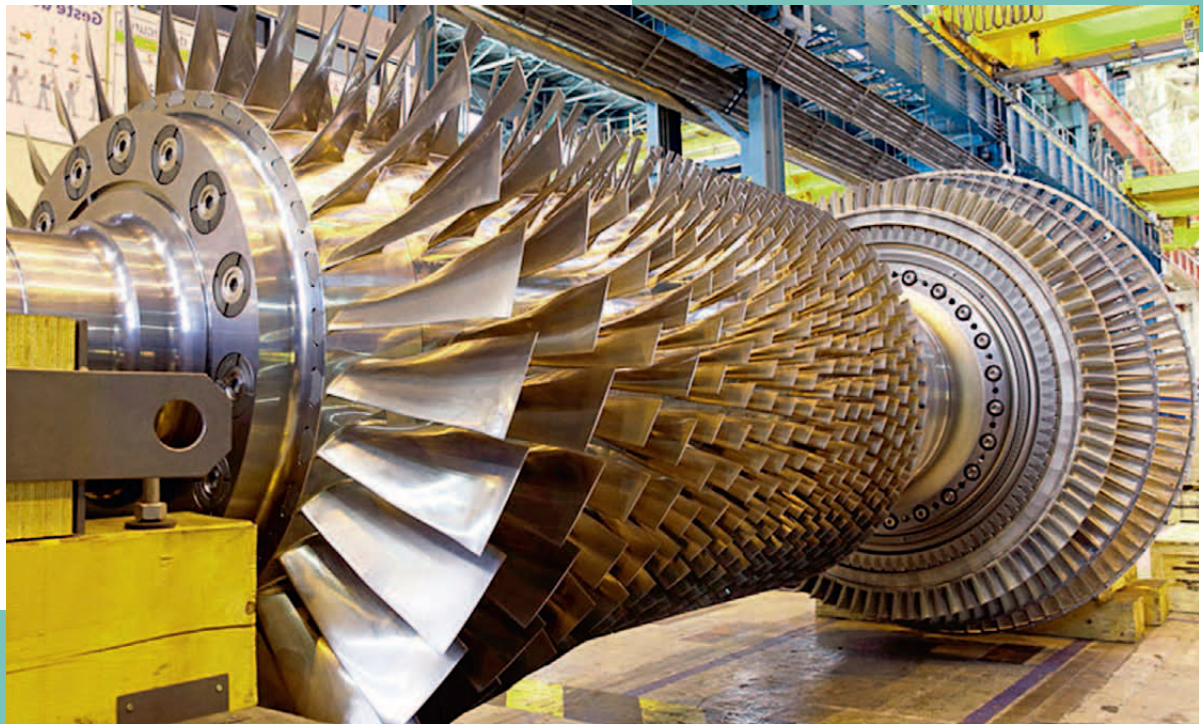
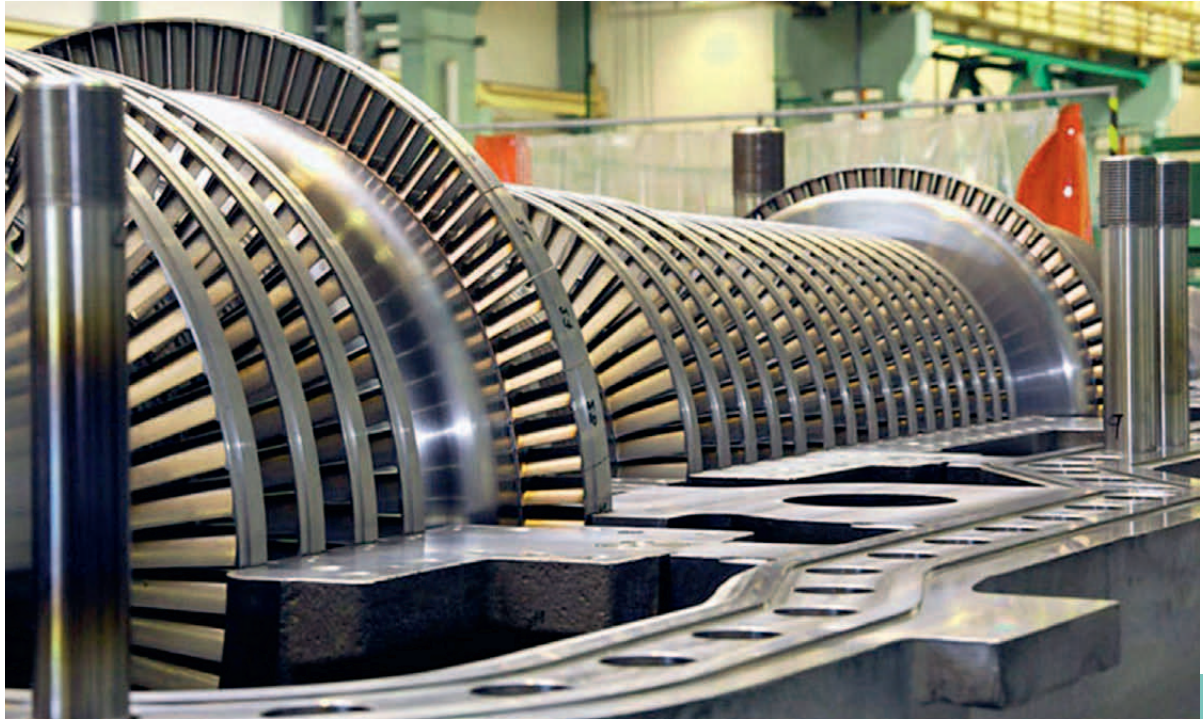
Процесс повышения эффективности реального цикла, приближающий его термический КПД к термическому КПД цикла Карно, иногда называют «карнотизацией».

Оценка эффективности теплосиловой установки зависит от ответа на две основные группы вопросов:

- насколько велик КПД обратимого цикла теплосиловой установки, от каких факторов он зависит и что следует предпринять для его повышения;

- насколько велики необратимые потери в реальном цикле установки, как распределяются эти потери по отдельным элементам цикла и, следовательно, на усовершенствование какой части цикла теплосиловой установки нужно обратить внимание с целью уменьшения степени необратимости цикла (и, следовательно, увеличения КПД цикла)?

В соответствии с этим анализ термодинамических циклов теплосиловых установок проводится, как правило, в два этапа: первый этап – анализ обратимого цикла; второй этап – анализ реального цикла с учетом основных источников необратимости.



С полными версиями аналитических отчетов отраслевого Центра аналитических исследований и разработок можно ознакомиться на следующих ресурсах:

1. Портал отраслевого Центра аналитических исследований и разработок (доступ осуществляется через внутреннюю сеть КСПД Росатома)



2. Раздел отраслевого Центра аналитических исследований и разработок на портале «Страна Росатом» (доступ осуществляется через внутреннюю сеть КСПД Росатома)

