



Оптимизация цикла малоразмерной газотурбинной установки с использованием САЕ-системы «АСТРА»

А. Ю. Ткаченко	кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов имени В. П. Лукачева; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара; tau@ssau.ru
Е. П. Филинов	кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов имени В. П. Лукачева; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара; filinov@ssau.ru
О. В. Тремкина	кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара; tereshchenko.ov@ssau.ru

В данной работе проведена оптимизация цикла малоразмерной газотурбинной установки, определены её термодинамические параметры с использованием САЕ-системы «АСТРА». Построены компьютерные модели энергетических установок, работающих по регенеративному циклу Брайтона, по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией, по циклу Брайтона с промежуточным подогревом и регенерацией, и по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением, промежуточным подогревом и регенерацией, а также проведена оценка их термодинамических параметров. Установлены закономерности влияния конструктивных параметров энергетических установок на их эффективность.

Ключевые слова: малоразмерная газотурбинная установка; энергетическая установка; термодинамический расчёт; математическое моделирование; оптимизация цикла

Цитирование: Ткаченко, А. Ю. Оптимизация цикла малоразмерной газотурбинной установки с использованием САЕ-системы «АСТРА» / А. Ю. Ткаченко, Е. П. Филинов, О. В. Тремкина // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №4. – С. 20-32. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-4-20-32

Введение

Авиадвигатели, изначально разработанные для авиации, обладают высокой удельной мощностью и эффективностью, что делает их привлекательными для использования в энергетике. Исследования в этой области рассматривают возможности адаптации газотурбинных двигателей (ГТД) для стационарных энергетических установок, например, для малых газотурбинных электростанций (ГТЭС). В частности, рассматриваются вопросы модификации системы охлаждения, повышения надёжности при длительной эксплуатации, а также оптимизации топливной системы для работы на различных типах топлива.

Существуют примеры успешного использования авиационных двигателей в энергетических установках. Например, двигатели, бывшие в эксплуатации на военных и гражданских самолётах, используются в малых газотурбинных электростанциях в удалённых районах, где требуется компактное и надёжное решение для генерации энергии. Также такие двигатели применяются в морских энергетических установках, где важны компактность и высокая мощность.

На сегодняшний день наблюдается тенденция к увеличению интереса к использованию авиационных двигателей в энергетике, что связано с развитием технологий и повышением требований к энергетическим установкам в различных секторах экономики. Основными направлениями исследований остаются оптимизация конструкций и увеличение эффективности таких установок, а также поиск новых применений для авиационных двигателей, например, в гибридных энергетических системах.

Экономичность ГТД можно существенно увеличить, например, путём реализации чисто изотермического процесса расширения газа в турбине, применив в качестве топлива метан. Если при этом снять ограничения на максимальную температуру газов с точки зрения прочности материалов, то можно заметно снизить необратимость процесса передачи теплоты рабочему телу. Это рассматривается специалистами как чисто гипотетическое решение, при котором за счёт глубокого охлаждения деталей турбины осуществляется одновременно горение топлива и расширение газа. После турбины с изотермическим процессом расширения предполагается разместить ГТД обычного цикла и затем теплоутилизационный контур. В подобном цикле за счёт высокой температуры выходящих из турбины газов повышается эффективность утилизации теплоты. КПД такой установки может быть получен по расчётам до 75 % [1].

Исследования в области перевода авиационных двигателей в энергетические установки показывают значительный потенциал такого направления, особенно с учётом роста потребностей в мобильных и компактных энергетических решениях. Однако для успешной реализации проектов требуется дальнейшая работа по адаптации авиационных двигателей к наземным условиям эксплуатации и снижению эксплуатационных затрат.

Рынок малоразмерных газотурбинных установок (далее – МГТУ) для России является достаточно молодым [2].

Оптимизация МГТУ заключается в улучшении их производительности, эффективности и надёжности с минимальными затратами на эксплуатацию, а также в снижении их воздействия на окружающую среду.

Основные направления оптимизации включают:

1) Повышение эффективности: увеличение коэффициента полезного действия МГТУ, что означает более эффективное преобразование топлива в полезную энергию. Это достигается за счёт модернизации оборудования, улучшения теплообмена, использования более совершенных технологий сгорания или внедрения более эффективных методов управления процессами.

2) Снижение потерь энергии: минимизация тепловых и электрических потерь в процессе работы МГТУ, что включает оптимизацию системы теплообмена, уменьшение утечек тепла и оптимизацию электрических систем.

3) Улучшение надёжности и долговечности: снижение частоты отказов и продление срока службы оборудования путём улучшения конструкции, использования более качественных материалов и внедрения систем мониторинга и диагностики для своевременного обнаружения проблем.

4) Экологическая оптимизация: снижение выбросов вредных веществ и парниковых газов за счёт использования более чистых видов топлива, внедрения технологий очистки выбросов, а также повышения энергоэффективности МГТУ.

5) Снижение эксплуатационных затрат: оптимизация затрат на обслуживание, ремонт и эксплуатацию установки путём внедрения автоматизации процессов, применения интеллектуальных систем управления и повышения квалификации персонала.

6) Гибкость и адаптивность: увеличение способности МГТУ адаптироваться к изменяющимся условиям работы, например, к изменению нагрузки, различным видам топлива или колебаниям спроса на энергию.

7) Энергетическая интеграция: внедрение систем рекуперации энергии и использования отходов производства для улучшения общей энергетической эффективности МГТУ.

Оптимизация этих аспектов позволяет добиться лучших экономических показателей МГТУ и снизить воздействие на окружающую среду.

1 Описание схемы МГТУ и термодинамический расчёт в САЕ-системе «АСТРА»

Одним из способов повышения эффективности цикла МГТУ является увеличение удельной полезной работы цикла и уменьшение количества подведённой теплоты, что может быть достигнуто применением регенерации теплоты [1]. Поэтому в качестве прототипа была выбрана энергетическая установка (ЭУ), работающая по регенеративному циклу Брайтона, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.

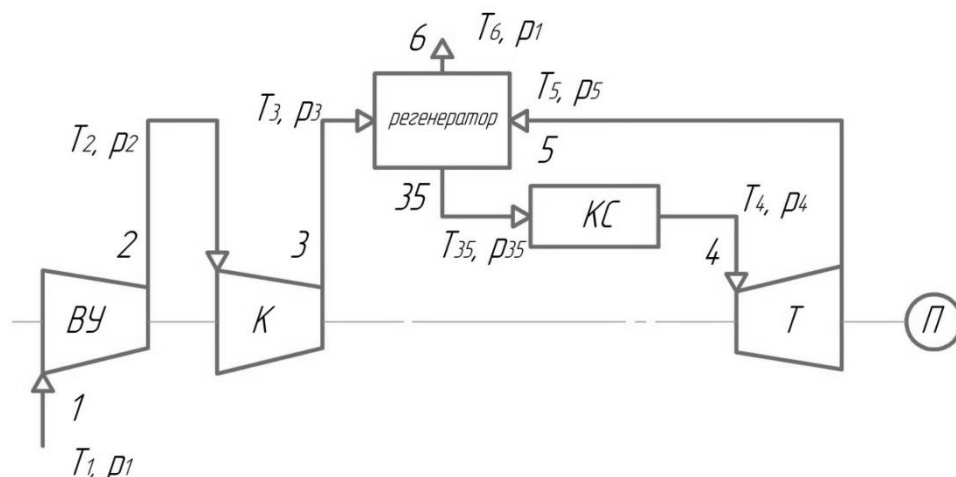


Рисунок 1 – Принципиальная схема ЭУ, работающей по регенеративному циклу Брайтона

Как видно на рисунке 1 рабочее тело из компрессора (К) с температурой T_3 поступает в регенератор, где подогревается до температуры T_{35} и затем идёт в камеру сгорания (КС). За КС перед турбиной (Т) рабочее тело имеет температуру T_4 и после расширения в турбине с температурой T_5 входит в регенератор. Регенератор выполнен в виде теплообменника с «холодной» и «горячей» сторонами.

В координатах Т-S регенеративный цикл Брайтона показан на рисунке 2. Сжатие рабочего тела в регенеративном цикле Брайтона происходит в процессе 1-3, после чего сжатое рабочее тело нагревается до температуры T_{35} в регенераторе. Уходящее горячее рабочее тело после турбины отдаёт в регенераторе теплоту, в результате чего его температура снижается от T_5 до T_6 .

Термодинамический расчёт ЭУ проводился в автоматизированной системе термогазодинамического расчёта и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей и энергетических установок, которая представляет собой интегрированную среду для совместного решения задач начального этапа проектирования ГТД и ГТУ любых типов и схем. Использование си-

системы АСТРА позволяет повысить эффективность, сократить время создания энергетических установок и уменьшить стоимость их жизненного цикла [3].

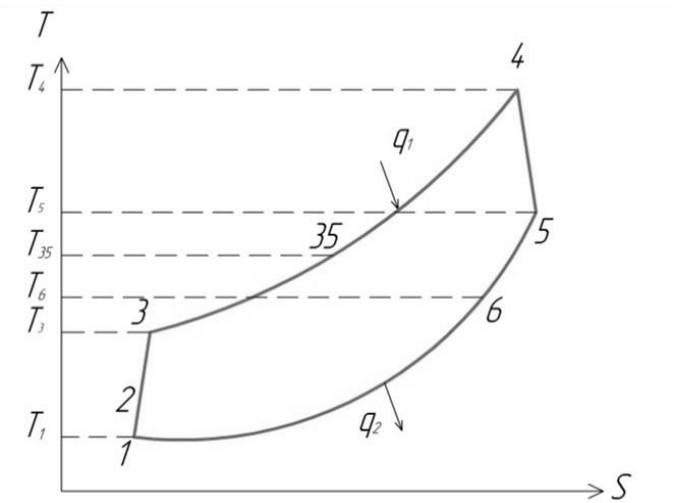


Рисунок 2 – Цикл ЭУ, работающей по регенеративному циклу Брайтона, в T-S координатах

На рисунке 3 представлена укрупнённая структура компьютерной модели ЭУ, работающей по регенеративному циклу Брайтона, а результаты термодинамического расчёта ЭУ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты термодинамического расчёта ЭУ, работающей по циклу Брайтона с регенерацией

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Эффективная мощность МГТУ	$N\{e\}$	кВт	75,0
Эффективный КПД МГТУ	$\eta\{e\}$	-	18,53
Степень повышения давления в К	$\Pi^*\{к\}$	-	3,28
Полная температура за КС	$T^* 4$	К	1103
Степень расширения в Т	$\Pi^*\{т\}$	-	2,491
Часовой расход топлива	$G\{т.ч\}$	кг/ч	29,213

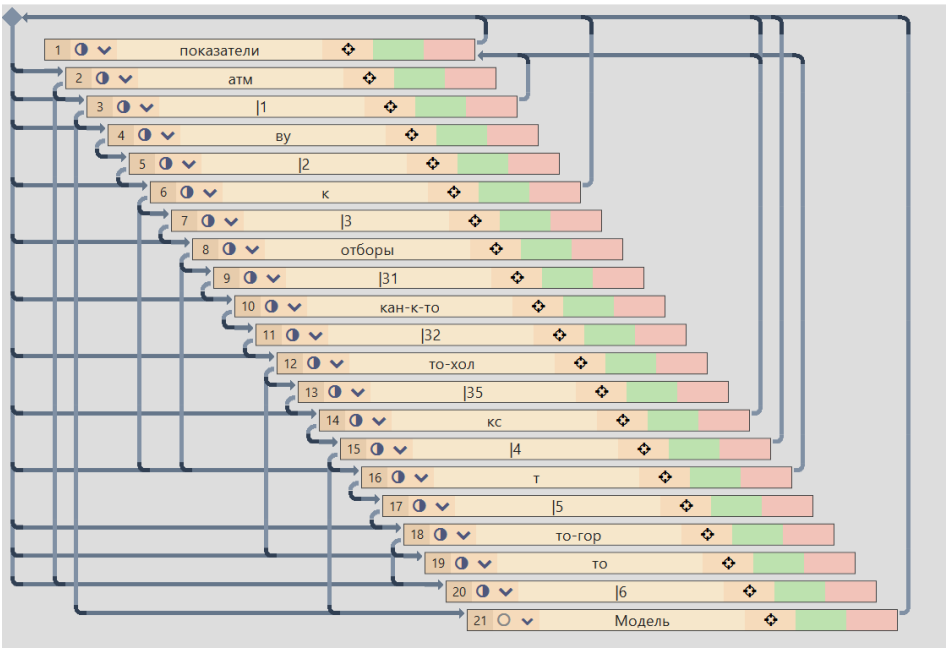


Рисунок 3 – Реализация компьютерной модели ЭУ, работающей по регенеративному циклу Брайтона, в САЕ-системе «АСТРА»

2 Оптимизация цикла МГТУ

2.1 Описание схемы и термодинамический расчёт ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией, в САЕ-системе «АСТРА»

С целью улучшения характеристик термодинамического совершенства цикл Брайтона может быть ещё более усложнён за счёт одновременного применения промежуточного охлаждения и регенерации. При этом удельная полезная работа цикла увеличится за счёт промежуточного охлаждения рабочего тела, а количество подведённой теплоты в цикле – за счёт применения регенератора [1].

Принципиальная схема ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией, представлена на рисунке 4. После первого этапа адиабатного сжатия (2-2.4) в компрессоре низкого давления (КВД) воздух охлаждается в промежуточном охладителе (2.4-2.5) и снова поступает в компрессор высокого давления (КВД). После второго этапа адиабатного сжатия (2.5-3) воздух поступает в регенератор, где подогревается (3-35). В камере сгорания (КС) воздух ещё больше подогревается (35-4) и адиабатно расширяется в турбине (Т), совершая работу (4-5). После адиабатного расширения газ проходит через регенератор, где его температура снижается (5-6), после чего он уходит из цикла.

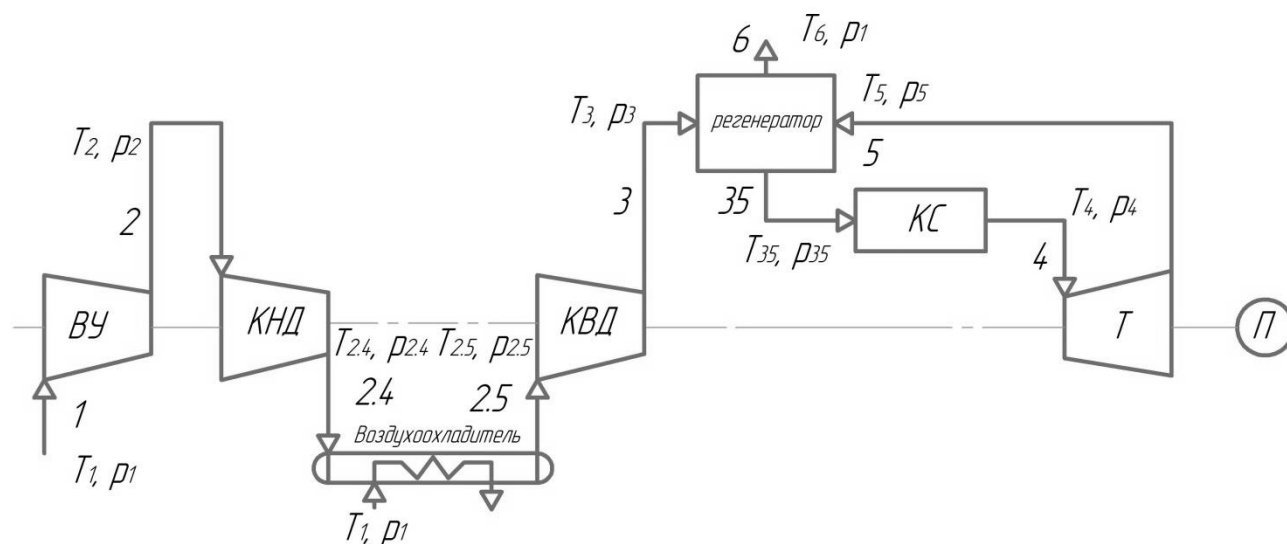


Рисунок 4 – Принципиальная схема ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией

На рисунке 5 представлена укрупнённая структура компьютерной модели ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией.

Результаты термодинамического расчёта ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией, представлены в таблице 2.

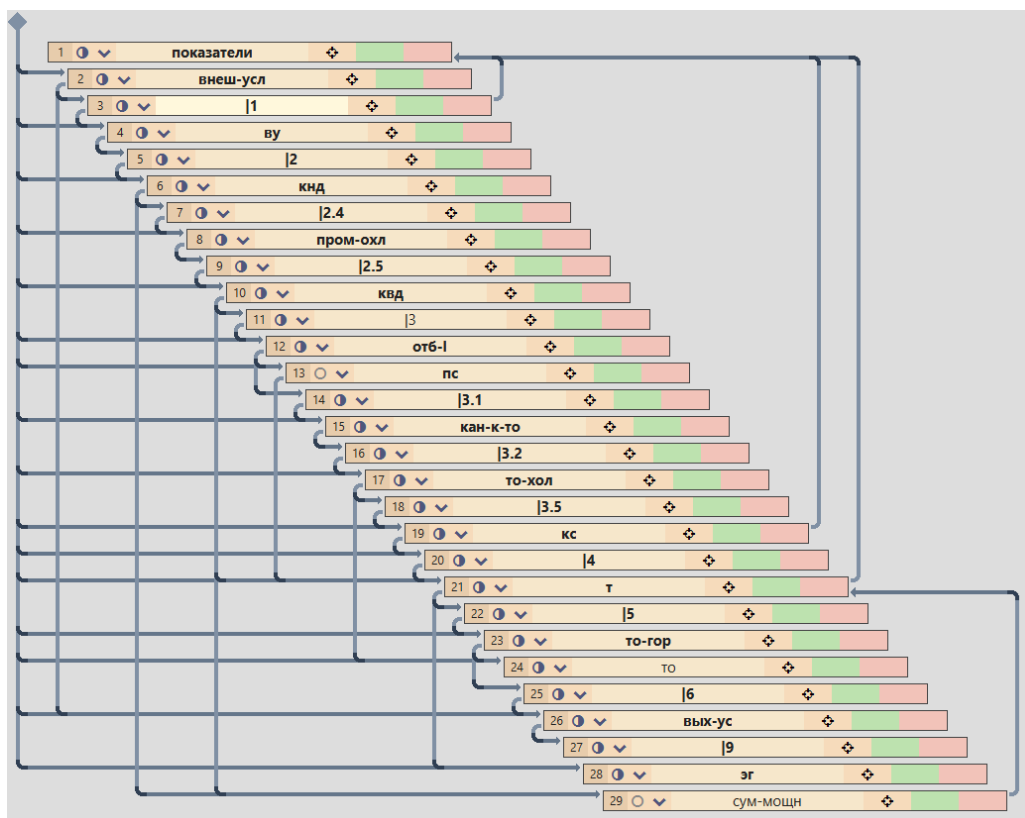


Рисунок 5 – Реализация компьютерной модели ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией, в САЕ-системе «АСТРА»

Таблица 2 – Результаты термодинамического расчёта ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Эффективная мощность МГТУ	$N\{e\}$	кВт	75,0
Эффективный КПД МГТУ	$\eta\{e\}$	-	21,33
Степень повышения давления в КНД	$\Pi^*\{кнд\}$	-	2
Степень повышения давления в КВД	$\Pi^*\{квд\}$	-	2
Полная температура за КС	$T^*\{4\}$	К	1103
Степень расширения в Т	$\Pi^*\{т\}$	-	2,947
Часовой расход топлива	$G\{т.ч\}$	кг/ч	25,381

2.2 Описание схемы и термодинамический расчёт ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным подогревом и регенерацией, в САЕ-системе «АСТРА»

Улучшение характеристик термодинамического совершенства цикла Брайтона может быть достигнуто за счёт одновременного применения промежуточного подогрева и регенератора [1]. Принципиальная схема ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным подогревом и регенерацией, представлена на рисунке 6.

После адиабатного сжатия (2-3) в компрессоре (К) воздух поступает в регенератор, где подогревается (3-35). В камере сгорания (КС1) воздух ещё больше подогревается (35-4) и адиабатно расширяется в турбине высокого давления (ТВД) (4-4.5).

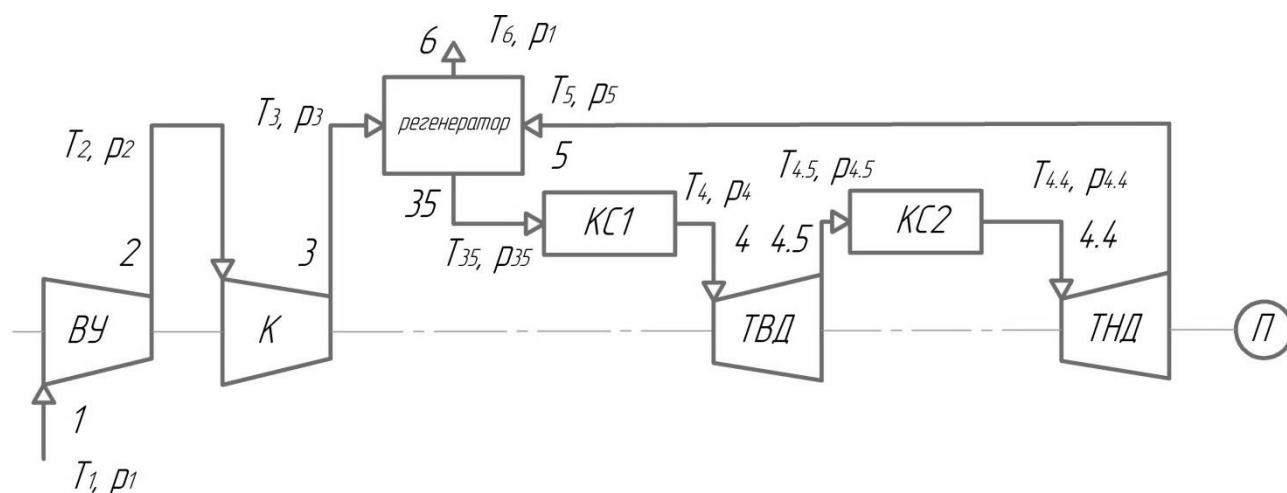


Рисунок 6 – Принципиальная схема ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным подогревом и регенерацией

После первого этапа адиабатного расширения газ поступает во вторую камеру сгорания (КС2), где подогревается (4.5-4.4). Затем газ поступает в турбину низкого давления (ТНД), где снова адиабатно расширяется (4.4-5). После адиабатного расширения газ проходит через регенератор, где его температура снижается (5-6), после чего он уходит из цикла.

На рисунке 7 представлена укрупнённая структура компьютерной модели ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным подогревом и регенерацией, а результаты термодинамического расчёта ЭУ представлены в таблице 3.

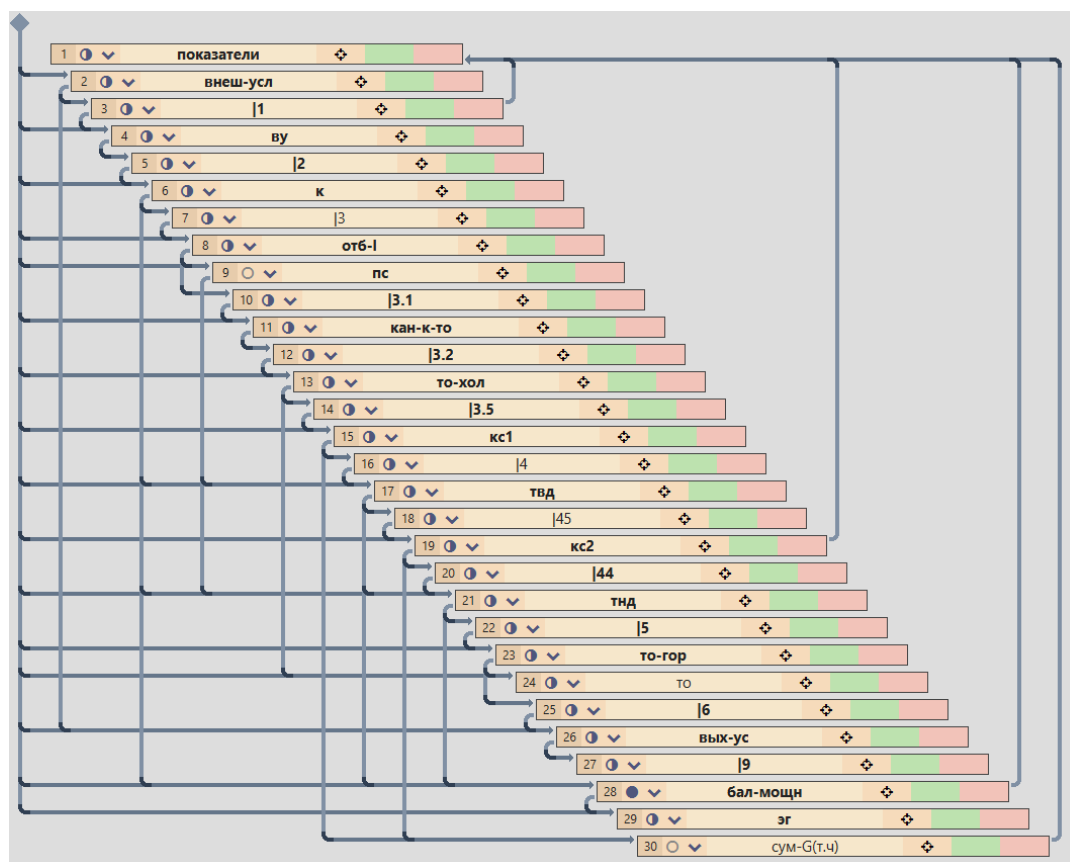


Рисунок 7 – Реализация компьютерной модели ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным подогревом и регенерацией, в САЕ-системе «АСТРА»

Таблица 3 – Результаты термодинамического расчёта ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным подогревом и регенерацией

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Эффективная мощность МГТУ	$N\{e\}$	кВт	75,0
Эффективный КПД МГТУ	$\eta\{e\}$	-	13,24
Степень повышения давления в К	$\Pi^*\{k\}$	-	3,28
Полная температура за КС2	$T^*\{4\}$	К	1000
Степень расширения в ТВД	$\Pi^*\{ТВД\}$	-	1,522
Степень расширения в ТНД	$\Pi^*\{ТНД\}$	-	1,522
Часовой расход топлива	$G\{т.ч\}$	кг/ч	40,899

2.3 Описание схемы и термодинамический расчёт ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением, промежуточным подогревом и регенерацией, в САЕ-системе «АСТРА»

Одновременное использование в цикле Брайтона промежуточного охлаждения, нагрева и регенератора позволяет существенно повысить эффективность цикла [1]. Принципиальная схема ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением, промежуточным подогревом и регенерацией, представлена на рисунке 8.

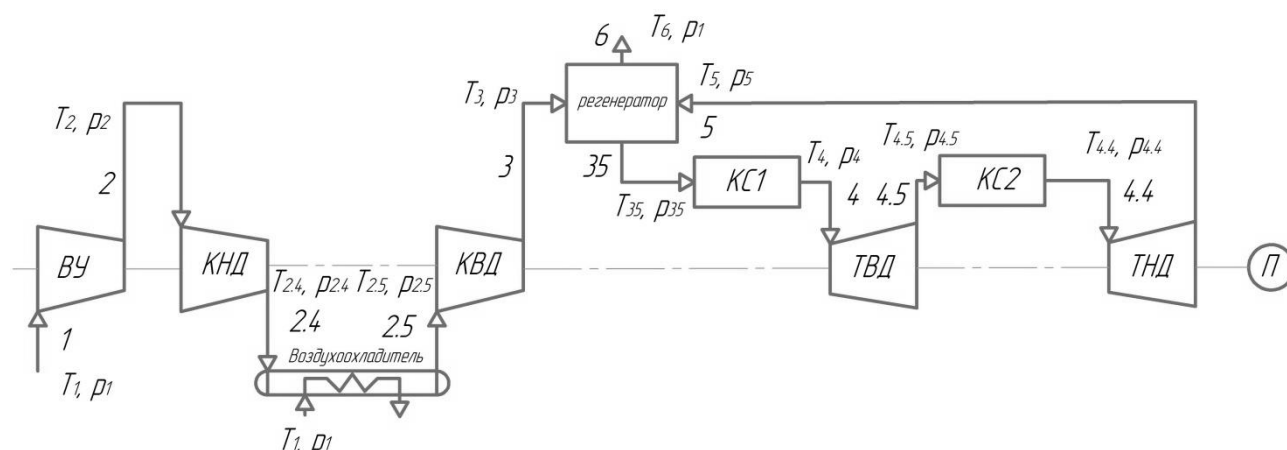


Рисунок 8 – Принципиальная схема ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением, промежуточным подогревом и регенерацией

После первого этапа адиабатного сжатия (2-2.4) в КНД воздух охлаждается в промежуточном охладителе (2.4-2.5) и поступает в КВД. После второго этапа адиабатного сжатия (2.5-3) воздух поступает в регенератор, где подогревается (3-3.5). В КС1 воздух ещё больше подогревается (3.5-4) и адиабатно расширяется в ТВД (4-4.5). После первого этапа адиабатного расширения газ поступает в КС2, где подогревается (4.5-4.4). Затем газ поступает в ТНД, где снова адиабатно расширяется (4.4-5). После адиабатного расширения газ проходит через регенератор, где его температура снижается (5-6), после чего он уходит из цикла.

На рисунке 9 представлена укрупнённая структура компьютерной модели ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией, а результаты термодинамического расчёта ЭУ представлены в таблице 4.

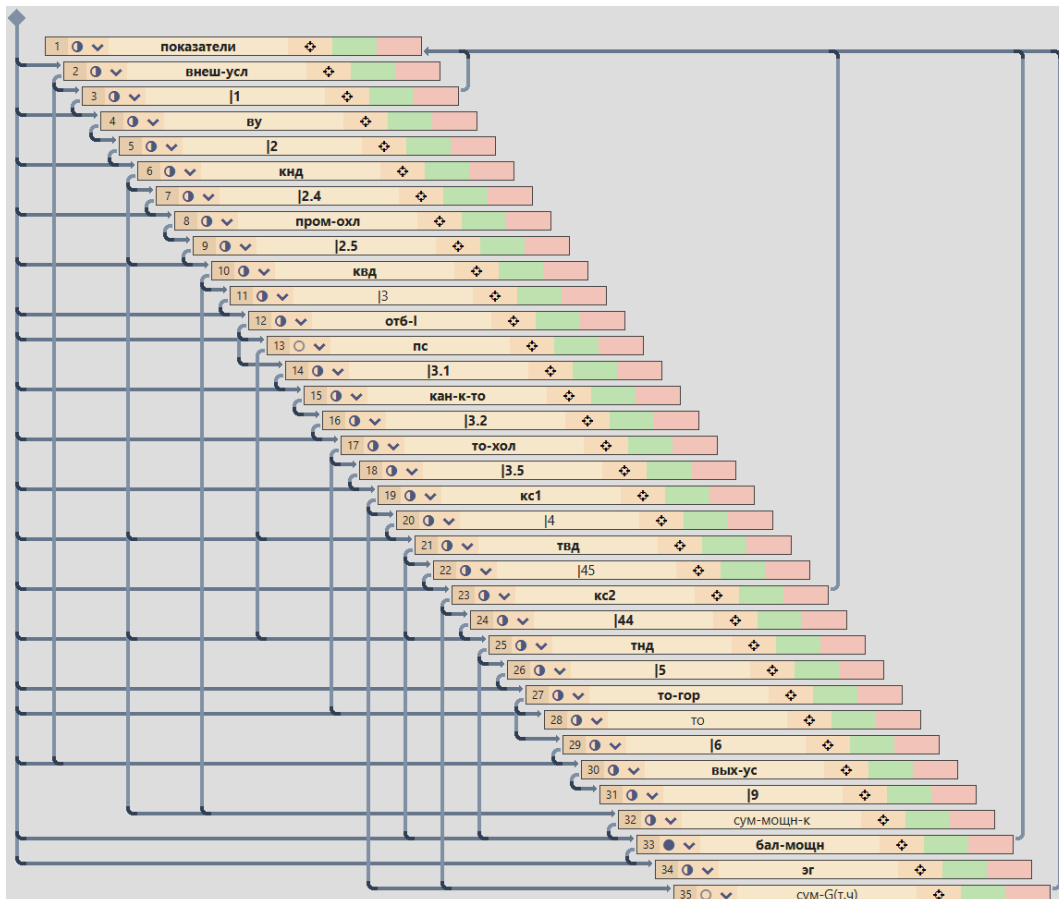


Рисунок 9 – Реализация компьютерной модели ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением, промежуточным подогревом и регенерацией, в САЕ-системе «АСТРА»

Таблица 4 – Результаты термодинамического расчёта ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением, промежуточным подогревом и регенерацией

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Эффективная мощность МГТУ	$N\{e\}$	кВт	75,0
Эффективный КПД МГТУ	$\eta\{e\}$	-	21,42
Степень повышения давления в КНД	$P^*\{кнд\}$	-	3,28
Степень повышения давления в КВД	$P^*\{квд\}$	-	3,28
Полная температура за КС2	$T^*\{4\}$	К	1000
Степень расширения в ТВД	$P^*\{твд\}$	-	2,715
Степень расширения в ТНД	$P^*\{тнд\}$	-	2,715
Часовой расход топлива	$G\{т.ч\}$	кг/ч	25,273

3 Сравнительный анализ циклов ЭУ

Сравнительный анализ циклов ЭУ, работающей по регенеративному циклу Брайтона, ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией, ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным подогревом и регенерацией, и ЭУ, работающей по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением, промежуточным подогревом и регенерацией, проводился на основании результатов термодинамического расчёта.

Результаты термодинамического расчёта показали, что применение регенератора вместе с промежуточным охлаждением позволяет наряду с удельной полезной работой увеличить и эффективность цикла. Одновременное использование промежуточного нагрева и регенератора не позволило наряду с удельной полезной работой повысить эффективность цикла. При одинаковых условиях использование промежуточного охлаждения и регенератора

позволяет увеличить эффективность цикла немного больше, чем использование промежуточного нагрева и регенератора. Одновременное использование в цикле Брайтона промежуточного охлаждения, нагрева и регенератора позволяет существенно повысить эффективность цикла.

Результаты термодинамического расчёта ЭУ представлены графически на рисунке 10.



Рисунок 10 – Показатели эффективности циклов ЭУ при эффективной мощности 75,5 кВт

Заключение

В результате проведённой оптимизации цикла малоразмерной газотурбинной установки было определено, что реализация цикла Брайтона с промежуточным охлаждением, промежуточным подогревом и регенерацией показывает наиболее высокие значения эффективного КПД – 21,42%, одновременно в этом возрастают и массогабаритные характеристики энергетической установки за счёт использования дополнительных узлов ЭУ. Оптимальным вариантом является реализация цикла Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией, эффективный КПД цикла имеет значение 21,33 % при часовом расходе топлива 25,381 кг/с и эффективной мощности 75,0 кВт.

Благодарности

Работа выполнена по проекту FSSS-2022-0019, реализуемого в рамках федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок».

Список использованных источников

1. Злобин, В. Г. Газотурбинные установки. Часть 1. Тепловые схемы. Термодинамические циклы / В. Г. Злобин, А. А. Верхованцев. – Санкт-Петербург : ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 114 с.
2. Смелов, В. Г. Аддитивное производство деталей МГТУ в условиях импортозамещения / В. Г. Смелов, В. В. Кокарева, В. П. Алексеев [и др.] // Сборник статей международной научной конференции «Перспективное научно-техническое развитие: тенденции, проблемы и пути совершенствования». – 2024. – С. 48-50.

3. Кузьмичев, В. С. Формирование математической модели выполненного ГТД различных типов и схем в САЕ-системе АСТРА / В. С. Кузьмичев, В. В. Кулагин, И. Н. Крупенич, А. Ю. Ткаченко, В. Н. Рыбаков. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 24 с.

4. Зысин, Л. В. Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции / Л. В. Зысин. – Санкт-Петербург : Изд.-во Политехн. ун-та, 2010. – 368 с.

5. Филинов, Е. П. Выбор параметров рабочего процесса малоразмерной газотурбинной установки / Е. П. Филинов // Сборник трудов конференции «Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова, посвященный 110-летию ПАО «ОДК-Кузнецов». – 2022. – С. 129-130.

6. Патент на изобретение 2819326 С1 Российская Федерация, МПК F02С 7/08 (2006-01-01), F02С 3/08 (2006-01-01). Малоразмерная газотурбинная установка : № 2024100642 : заявлено 10.01.2024 : опубликовано 17.05.2024 / Смелов В. Г., Ткаченко А. Ю., Шиманов А. А., Виноградов А. С., Филинов Е. П., Батулин О. В., Зубрилин И. А.; патентообладатель ФГАОУ ВО Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева. – 18 с.

7. Патент 2023614609 Российская Федерация. Библиотека модулей универсальной компьютерной модели рабочего процесса газотурбинного двигателя для среды концептуального проектирования «АСТРА» : программа для ЭВМ № 202268703 : заявлено 20.12.2022 : опубликовано 03.03.2023 / Ткаченко А. Ю., Остапук Я. А., Филинов Е. В.; правообладатель ФГАОУ ВО Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева. – 1 с.

8. Патент 2023614608 Российская Федерация. Среда концептуального проектирования «АСТРА-9.С» : программа для ЭВМ № 202268748: заявлено 13.12.2022 : опубликовано 03.03.2023 / Ткаченко А. Ю., Остапук Я. А., Филинов Е. В.; правообладатель ФГАОУ ВО Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева. – 1 с.

Optimization of the cycle of a small-sized gas turbine plant using the CAE-system «ASTRA»

A. Yu. Tkachenko	Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aircraft Engine Theory named after V. P. Lukachev; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; tau@ssau.ru
E. P. Filinov	Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Aircraft Engine Theory named after V. P. Lukachev; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; filinov@ssau.ru
O. V. Tremkina	Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; tereshchenko.ov@ssau.ru

In this work, the optimization of the cycle of a small-sized gas turbine unit was carried out, its thermodynamic parameters were determined using the CAE-system «ASTRA». Computer models of power plants operating on the regenerative Brayton cycle, on the Brayton cycle with intermediate cooling and regeneration, on the Brayton cycle with intermediate heating and regeneration, and on the Brayton cycle with intermediate cooling, intermediate heating and regeneration were built, and their thermodynamic parameters were assessed. Regularities in the influence of design parameters of power plants on their efficiency were established.

Keywords: small-sized gas turbine unit; power plant; thermodynamic calculation; mathematical modeling; cycle optimization

Citation: Tkachenko, A. Yu., Filinov, E. P. and Tremkina, O. V. (2024), "Optimization of the cycle of a small-sized gas turbine plant using the CAE-system «ASTRA»", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 10, no. 4, pp. 20-32. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-4-20-32. (In Russian; abstract in English)

References

1. Zlobin, V. G. and Verkholtantsev, A. A. (2020), *Gazoturbinnye ustanovki. Chast' 1. Teplovye skhemy. Termodinamicheskie tsikly* [Gas turbine units. Part 1. Thermal schemes. Thermodynamic cycles], VShTE SPbGUPTD, St. Petersburg, 114 p. (In Russian)
2. Smelov, V. G., Kokareva, V. V. and Alekseev, V. P. [et al.] (2024), "Additive manufacturing of MSTU parts in the context of import substitution", *Collection of articles from the international scientific conference "Promising scientific and technical development: trends, problems and ways of improvement"*, p. 48-50. (In Russian)
3. Kuzmichev, V. S., Kulagin, V. V., Krupenich, I. N., Tkachenko, A. Yu. and Rybakov, V. N. (2012), *Formirovanie matematicheskoy modeli vypolnennogo GTD razlichnykh tipov i skhem v CAE-sisteme ASTRA* [Formation of a mathematical model of the completed GTE of various types and schemes in the ASTRA CAE system], Publishing house of Samara state aerospace University, Samara, 24 p. (In Russian)
4. Zysin, L. V. (2010), *Combined-cycle and gas-turbine thermal power plants*, Publishing house of Polytechnic University, St. Petersburg, 368 p. (In Russian)
5. Filinov, E. P. (2022), "Selection of parameters of the working process of a small-sized gas turbine unit", *Collection of works of the conference «All-Russian scientific and technical forum on engines and power plants named after N. D. Kuznetsov, dedicated to the 110th anniversary of PJSC «UEC-Kuznetsov»*, pp. 129-130. (In Russian)
6. Smelov, V. G., Tkachenko, A. Yu., Shimanov, A. A., Vinogradov, A. S., Filinov, E. P., Baturin, O. V. and Zubrilin, I. A. (2024), *Malorazmernaya gazoturbinnaya ustanovka* [Small-sized gas turbine plant], Russian Federation, Pat. No. 2819326, 18 p. (In Russian)

7. Tkachenko, A. Yu., Ostapyuk, Ya. A. and Filinov, E. V. (2023), *Biblioteka moduley universal'noy komp'yuternoy modeli rabocheho protsessa gazoturbinnogo dvigatelya dlya sredy kontseptual'nogo proektirovaniya «ASTRA» : programma dlya EVM № 202268703* [Library of modules of the universal computer model of the working process of a gas-turbine engine for the conceptual design environment «ASTRA»: computer program No. 202268703], Russian Federation, Pat. № 2023614609, 1 p. (In Russian)

8. Tkachenko, A. Yu., Ostapyuk, Ya. A. and Filinov, E. V. (2023), *Sreda kontseptual'nogo proektirovaniya «ASTRA-9.S» : programma dlya EVM № 202268748* [Conceptual design environment «ASTRA-9.S»: computer program No. 202268748], Russian Federation, Pat. № 2023614608, 1 p. (In Russian)