

УДК 621.438

doi:10.18720/SPBPU/2/id25-412

Арафат Ск. Ясин,

магистр, студент предаспирантуры

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ HITACHI H-25 (32 МВт)

Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого,
skyasinarafat@gmail.com

Аннотация. В данном исследовании рассматриваются производительность, эффективность и устойчивость газотурбинной электростанции Hitachi H-25 мощностью 32 МВт с использованием термодинамического моделирования в программном обеспечении Thermoflow. Параметрический анализ проводился при температуре окружающей среды 280 – 310 К с оценкой охлаждения всасываемого воздуха, предварительного подогрева топлива, регенерации, циклов с обратным циклом (паровой Ренкина, сверхкритический цикл углекислого газа и органический цикл Ренкина), а также гибридных систем для 19 конфигураций. Результаты показали, что модификация с абсорбционным охлаждением обеспечивает наиболее экономически эффективное улучшение установки, в то время как наибольший прирост производительности достигается при использовании комбинированного цикла с испарительным охлаждением всасываемого воздуха и интегрированным третичным ОЦР. Гибридная система с опреснением воды продемонстрировала компромисс между стоимостью и устойчивостью.

Ключевые слова: газовая турбина (ГТ), парогазовая установка (ПГУ), органический цикл Ренкина (ОЦР), сверхкритический цикл углекислого газа (sCO₂), опреснение.

Sk. Yasin Arafat,
MSc, pre-postgraduate student

IMPROVING THE EFFICACY OF HITACHI H25 GT (32 MW)

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,
skyasinarafat@gmail.com

Abstract. This study investigates the performance, efficiency and sustainability performance of a 32 MW Hitachi H-25 gas turbine power plant using thermodynamic modeling in Thermoflow software. The parametric analysis was performed at ambient temperatures of 280 – 310 K, evaluating inlet air cooling, fuel preheating, regeneration, bottoming cycles (Rankine cycle, supercritical CO₂ and Organic Rankine Cycle) and hybrid systems totaling 19 configurations. The results showed that modification with absorption cooling provided the most cost-effective improvement, while the largest performance gain was achieved by a combined cycle with evaporative inlet air cooling and integrated tertiary ORC. The hybrid system with desalination demonstrated a trade-off between cost and sustainability.

Keywords: Gas Turbine (GT), combined cycle power plant (CCPP), Organic Rankine Cycle (ORC), supercritical CO₂ cycle (sCO₂), desalination.

ВВЕДЕНИЕ

Газовые турбины являются необходимым компонентом современной энергетики, поскольку они обеспечивают надежную и адаптируемую выработку электроэнергии, особенно при пиковом потреблении часов [1 – 4]. Сегодня в центре внимания находится повышение эффективности газовых турбин и снижение их воздействия на окружающую среду [5]. Поэтому в настоящее время в мировой научно-технической практике активно развиваются исследования газотурбинных установок различного функционального назначения, направленные на оптимизацию их термодинамических циклов с целью повышения энергоэффективности, надежности, экологических показателей, а также улучшения экономических перспектив [6 – 8].

Целью исследования является разработка решений в области устойчивой энергетики путем повышения эффективности существующей инфраструктуры электростанций на базе газотурбинного двигателя Hitachi H25 (32 МВт).

Методы исследования

Термодинамическое моделирование и параметрический анализ методов повышения эффективности газотурбинных электростанций выполняются с помощью программного обеспечения Thermoflow, особенно GT PRO и Thermoflex. Исследование начинается с создания базовой модели газовой турбины Hitachi H-25, которая включает в себя основные эксплуатационные характеристики:

- степень повышения давления в компрессоре;
- массовый расход выхлопных газов;
- температура на входе в турбину.

Расчёты проводятся при изменении температуры окружающей среды в пределах 280 — 310 К, что даёт возможность проследить влияние климатических условий на работу установки. В исследовании последовательно рассматриваются различные подходы к повышению эффективности:

- охлаждение воздуха на входе в компрессор с помощью испарительных охладителей, систем туманообразования, абсорбционных и электрических установок;
- предварительный подогрев топлива;
- использование регенерации;
- интеграцию с циклами нижнего уровня, такими как паровой цикл Ренкина, $s\text{CO}_2$ и ОЦР.

Дополнительно анализируются гибридные конфигурации и гибридная система, обеспечивающие одновременное производство электроэнергии и опреснённой воды. Каждый метод оценивается на основе чистой выходной мощности, эффективности, выбросов CO_2 и экономической целесообразности с расчётом приведенной стоимости электроэнергии (ПСЭ), включающей расходы на топливо, воду и установку за 20-летний срок службы проекта.

Таблица 1

Данные производителей и модели для проверки турбины при 288 К

Параметры	Данные производителя	Данные модели	Отклонение (%)
Номинальная мощность ISO (кВт)	32000	31829	0,56
Полезная выходная мощность (кВт)	31000	31030	0,097
Степень повышения давления	14,7	14,7	0
Массовый расход выхлопных газов (кг/с)	96,6	95,74	0,89
Температура выхлопных газов (°C)	564	587	4,07
КПД (низшая теплотворная способность)	34,8%	34,64%	0,46%

Для проверки корректности построенной модели результаты сопоставляются с данными производителя (табл. 1), а также анализируются на чувствительность, что повышает достоверность выводов. Такой подход позволяет выявить наиболее рациональные стратегии — как отдельные, так и комбинированные — для оптимизации работы газотурбинных установок с учётом не только технических, но и экономических и экологических факторов.

Задачи исследования

Исследование систематически структурировано для достижения комплексного повышения производительности, эффективности и устойчивости газотурбинной электростанции Hitachi H-25 (32 МВт). Начальный этап исследования посвящен анализу эксплуатационных характеристик тепловых электростанций, использующих газотурбинные установки, с акцентом на ключевые показатели эффективности, такие как выходная мощность, чистая электрическая эффективность и воздействие на окружающую среду в изменяющихся условиях окружающей среды [9]. На основе этой оценки разработана методология оптимизации

для повышения термодинамической эффективности системы, с особым акцентом на тепловой баланс газотурбинной установки Hitachi H-25. Thermoflow для моделирования и расчета основных эксплуатационных параметров установки в различных конфигурациях и условиях нагрузки.

Рассматривается ряд технологий повышения эффективности как по отдельности, так и в комплексе. К ним относятся: охлаждение всасываемого воздуха (с использованием испарительных охладителей, туманообразователей, абсорбционных охладителей и электрических охладителей), предварительный подогрев топлива (нагрев метана CH_4 до 805,7 К за счет тепла отработавших газов с сохранением температуры самовоспламенения ниже 810 К), регенерация (предварительный подогрев сжатого воздуха в рекуператоре с использованием тепла отработавших газов), опреснение (использование тепла отработавших газов для производства пресной воды в гибридной системе) и интеграция циклов с пониженной теплотой сгорания, в частности парового цикла Ренкина, цикла сверхкритического CO_2 (sCO_2) и органического цикла Ренкина (ОЦР), для рекуперации тепла отработавших газов и выработки дополнительной энергии. Также моделируются и анализируются гибридные и каскадные системы, такие как электростанции комбинированного цикла (ПГУ), усовершенствованные за счет охлаждения всасываемого воздуха и подогревателей топлива, а также третичные конфигурации (например, sCO_2 + ОЦР). Всего было изучено 19 различных конфигураций Hitachi H25 GT.

Моделирование проводится при температуре окружающей среды от 280 до 310 К, что отражает различные климатические условия эксплуатации в разных регионах или сезонах. Для оценки каждого изменения чистой выработки электроэнергии, чистой эффективности и выбросов CO_2 на МВт·ч валовой выработки электроэнергии проводится параметрический анализ и анализ чувствительности. Экономическая оценка выполняется путем расчета ПСЭ с учетом капитальных затрат, затрат на электроснабжение и техническое обслуживание, дисконтных расходов (15%) и срока службы проекта (20 лет), что позволяет провести комплексный

анализ трех факторов (энергетический, экологический, экономический). Выделяются наиболее технически и экономически обоснованные концепции. В исследовании представлены практические рекомендации для операторов и инженеров электростанций по стратегиям повышения чистой производительности и эффективности.

Результаты исследования

Исследование продемонстрировало значительное повышение производительности газовой турбины Hitachi H-25 (32 МВт) благодаря термодинамической оптимизации. В табл. 2 показано, что абсорбционное охлаждение оказалось наиболее экономичным методом охлаждения входящего воздуха, обеспечив наименьшие затраты на электроэнергию (ПСЭ) (0,0512 долл. США/кВт·ч) и повышение чистого КПД до 34,29%.

Таблица 2

Результаты комплексного анализа эффективности турбины при 310 К

№	Конфигурация	Себестоимость электроэнергии (ПСЭ, USD/кВт·ч)	Полезная выходная мощность (кВт)	Чистый КПД (%)	Выбросы CO ₂ (кг/ МВт·ч)
1	Простая ГТ	0,069	26 407	32,25	604
2	ГТ + Испарительный охладитель	0,0725	27 684	32,87	592
3	ГТ + Форсунка (недоувлажнение)	0,0725	27 680	32,87	592,5
4	ГТ + Форсунка (переувлажнение-3%)	0,069	27 967	32,89	591,4
5	ГТ + Абсорбционный охладитель	0,0512	27 804	34,29	568,3
6	ГТ + Электрический охладитель	0,0704	27 804	32,99	590,8
7	ГТ + Подогреватель топлива	0,0518	26 276	32,87	565
8	ГТ + Регенерация	Н/Д	26 407	34,21	571,2
9	ГТ + sCO ₂ цикл	Н/Д	34 430	38,46	486

№	Конфигурация	Себестоимость электроэнергии (ПСЭ, USD/кВт·ч)	Полезная выходная мощность (кВт)	Чистый КПД (%)	Выбросы CO ₂ (кг/ МВт·ч)
10	ГТ + sCO ₂ + ОЦР	Н/Д	35 375	39,0	485
11	ПГУ	0,0609	40 389	49,4	388,1
12	ПГУ + Испарительный охладитель	0,061	41 756	49,6	385
13	ПГУ + Форсунка (недоувлажнение)	0,0603	41 844	49,59	385,1
14	ПГУ + Форсунка (переувлажнение-3%)	0,0597	42 028	49,56	384,8
15	ПГУ + Абсорбционный охладитель	0,0618	40 389	49,6	385
16	ПГУ + Электрический охладитель	0,061	41 865	49,22	386
17	ПГУ + Испарительный охладитель + подогреватель топлива	0,0609	41 301	50,05	386
18	ПГУ + Испарительный охладитель + ОЦР	Н/Д	42 767	50,3	383,6
19	ГТ + Опреснительная установка	0,0811	26 407	32,25	608

Комбинированный цикл с испарительным охладителем и третичным циклом ORC, показанный на рис. 1, обеспечил наибольший прирост выходной мощности до 42 767 кВт, увеличив чистый КПД до 50,3% и снизив выбросы до 383,6 кг/МВт·ч, что демонстрирует преимущества каскадной рекуперации тепла. Эта конфигурация становится все более эффективной по мере повышения температуры окружающей среды, демонстрируя улучшенные характеристики в условиях более высоких температур (рис. 2). Цикл sCO₂ оказался многообещающим, достигнув чистой эффективности 38,46%, а гибрид с опреснением подчеркнул компромиссы между устойчивостью и стоимостью (ПСЭ: 0,0811 долл. США/кВт·ч).

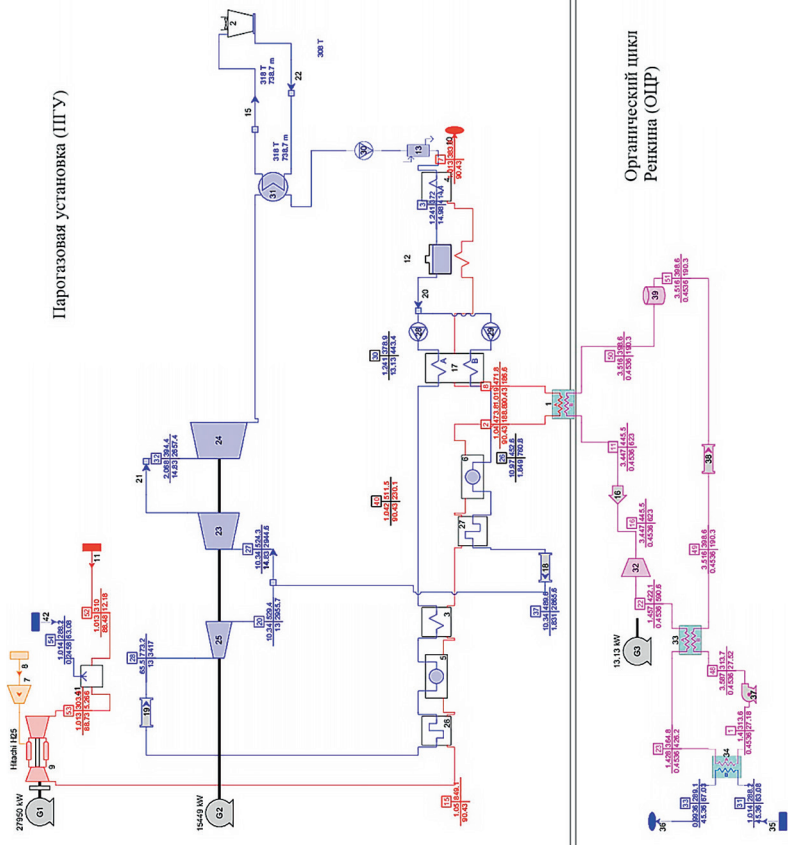


Рис. 1. Схема ПГУ с испарительным охладителем и ОР

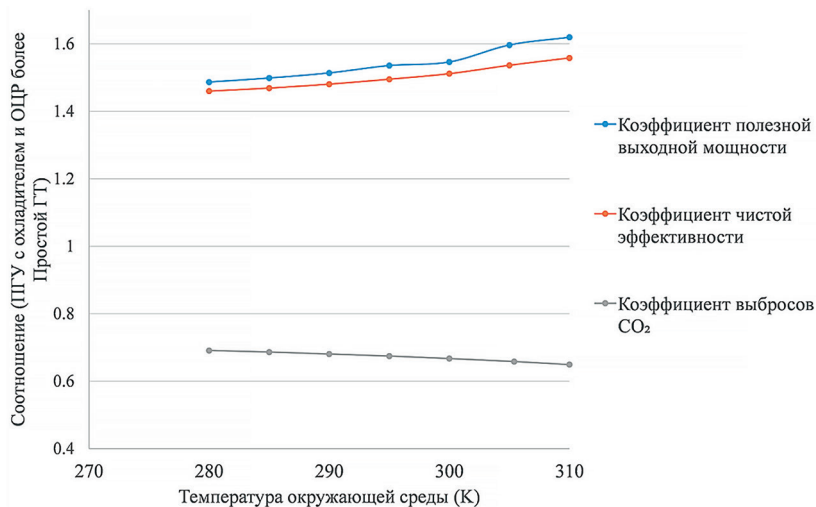


Рис. 2. Соотношение производительности ПГУ с испарительным охладителем и ОЦР

Выводы

Исследование доказывает, что даже для существующих газотурбинных установок существует широкий спектр технических решений для их модернизации. Выбор оптимальной стратегии зависит от конкретных целей оператора: максимизации мощности, повышения КПД, снижения затрат или минимизации экологического следа. Наиболее сбалансированные и высокие результаты достигаются за счет комбинирования методов, в частности, использования испарительного охлаждения и интеграции сложных каскадных циклов рекуперации тепла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eugenio G. The importance of operational flexibility in gas turbine power plants // *Energia, Ambiente e Innovazione*, 2013. 6. 58 – 63. DOI: 10.12910/EAI2013-35.

2. Espanani R., Ebrahimi S., Ziaeimoghadam H. Efficiency Improvement Methods of Gas Turbine // *Energy and Environmental Engineering*, 2013. 1(2). 36 – 54. DOI: 10.13189/eee.2013.010202.

3. Proctor D. Efficiency improvements mark advances in gas turbines [Electronic recourse] // *Power. News & Technology for the Global Energy Industry* January 3, 2018. URL: <https://www.powermag.com/efficiency-improvements-mark-advances-in-gas-turbines/>.

4. Liu K., Chen D., Serbin S., Patlaichuk V. Improving the Efficiency of the Gas Turbine Units. In: Liu, K., Chen, D., Serbin, S., Patlaichuk, V. (eds) *Gas Turbines Structural Properties, Operation Principles and Design Features*. Springer, Singapore, 2023. 243 – 256. DOI: 10.1007/978-981-99-0977-3_17.

5. Li N., Aksoy M., Nutakki T., Kumar P., El-Shorbagy M., Dahari M., Alkhalaf S., Alotaibi K., Elhosiny H. Development of a modified gas turbine-based sustainable power generation and water treatment system; Economical/environmental considerations and data-driven optimization // *Journal of Cleaner Production*, 2024. Vol. 450. 141904. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141904.

6. Лаптев М.А., Барсков В.В., Рассохин В.А. Перспективные газотурбинные установки с внешним подводом теплоты // *Современные технологии и экономика энергетики. Материалы Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 29 апреля 2021 года. СПб., ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. 142 – 144. EDN: JZDVGZ. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46341213>.*

7. Басати Панах М., Рассохин В.А., Барсков В.В., Матвеев Ю.В., Кортиков Н.Н., Лаптев М.А., Гун Б., Чу В.Ч. Повышение экономичности и надежности газотурбинных установок за счет применения аддитивных технологий // *Надежность и безопасность энергетики*, 2022. 15(2). 102 – 110. DOI: 10.24223/1999-5555-2022-15-2-102-110.

8. Басати Панах М., Рассохин В.А., Барсков В.В., Матвеев Ю.В., Лаптев М.А., Гун Б., Чу В.Ч. Влияние характеристик потерь кинетической энергии на экономичность газотурбинных установок // *Газовая промышленность*, 2023. 6(850). 82 – 89. URL: <https://neftegas.info/magazines/gas-industry/27/579>.

9. Arafat Sk.Y., Basati Panah M., Barskov V.V., Chu V.C., Pham T.Q. Optimizing gas turbine performance in combined cycle power plants: evaluating cooling system efficacy for enhanced efficiency and power output // *Современные технологии и экономика в энергетике. Материалы Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 25 апреля 2024 года / Ред. Григорьев А.М., Коняева Е.В., Чернова В.А., Каюкова С.С. СПб., ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. 145 – 148. EDN: LIGUML. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80083787>.*