

УДК 621.311.22

А. Д. Легкий, К. А. Ковалев, А. И. Жупанов, И. А. Обиднов

Волгоградский государственный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПГУ

Представлено исследование энергетической эффективности дубль-блочной парогазовой установки ПГУ-84. Проведен сравнительный анализ традиционного энергетического подхода и эксергетического метода для оценки эффективности работы установки. На основе технических характеристик оборудования выполнены расчеты деструкции эксергии основных компонентов ПГУ-84. Полученные результаты могут быть использованы при разработке программ энергосбережения и модернизации парогазовых установок данного типа.

К л ю ч е в ы е с л о в а: парогазовая установка, эксергетический анализ, энергетический баланс, деструкция эксергии, энергосбережение.

Введение

Парогазовые установки (ПГУ) играют ключевую роль в энергообеспечении промышленных предприятий, особенно в условиях необходимости повышения энергоэффективности производства.

Традиционно оценка эффективности работы энергетических установок проводится по первому закону термодинамики, с использованием классических тепловых балансов и расчетов КПД [1—3]. Данный подход позволяет вычислить энергетическую эффективность в процентах (для ПГУ-84 номинальный электрический КПД составляет 46,7 %), однако не позволяет учитывать качество энергии и детально локализовать необратимые потери в оборудовании [4—8].

Актуальность исследования заключается в том, что при оценке эффективности по традиционному энергетическому балансу не учитываются потери работоспособности, вызванные процессами необратимости. При этом энергия, которая по суммарным показателям кажется «сохраненной», может уже не обладать достаточной работоспособностью для выполнения полезной работы [6—10]. Именно эта особенность становится критичным ограничением при оптимизации и модернизации ПГУ. Рассматриваемая тема является актуальной в условиях необходимости повышения энергоэффективности, снижения выбросов парниковых газов и обеспечения конкурентоспособности промышленных предприятий.

Объектом исследования в данной работе является парогазовая установка ПГУ-84 (дубль-блок), состоящая из двух газотурбинных установок на базе газотурбинного двигателя Т32 (*MS5002E*), двух котлов-утилизаторов и одной паротурбинной установки Т-22-6,0/0,12.

Цель исследования — провести комплексный анализ и сравнительное исследование тепловых потерь в парогазовой установке ПГУ-84, используя как традиционный энергетический, так и эксергетический подходы к оптимизации, для:

- выявления и количественной оценки источников тепловых потерь — определить ключевые области в ПГУ-84, где происходят наибольшие тепловые

потери, используя эксергетический анализ для выявления скрытых источников неэффективности;

- локализации участков с высокими необратимыми потерями — определить конкретные узлы и процессы в ПГУ-84, характеризующиеся наибольшим количеством необратимых потерь энергии, что позволит сконцентрировать усилия на их оптимизации.

На основании предложенного в статье анализа предлагаются технические мероприятия по оптимизации параметров теплоэнергетических установок на примере ПГУ-84, а также снижению тепловых потерь и увеличению КПД.

Совершенствование существующих методов расчетов с возможностью внедрения эксергетического метода в расчетную практику необходимо для более точной оценки повышения эффективности и оптимизации управления теплоэнергетическим оборудованием.

Сравнительный анализ эксергетического метода, с обоснованием ключевых преимуществ перед традиционным энергетическим, с возможностью определения истинных источников тепловых потерь обеспечит проведение более глубокого анализа по оптимизации ПГУ.

Данное исследование направлено на разработку усовершенствованных методов оценки и минимизации тепловых потерь в парогазовых установках, что является актуальной задачей для современной энергетики.

Материал и методы

Для проведения расчетов использованы технические характеристики парогазовой установки ПГУ-84 мощностью 84 МВт производства АО «РЭП Холдинг». Установка представляет собой дубль-блочный энергоузел, включающий следующее основное оборудование [11].

Газотурбинный контур:

- Две газовые турбины *MS5002E* (производство АО «РЭП Холдинг» по лицензии General Electric).
- Номинальная мощность на валу каждой ГТ 33,3 МВт.
- Номинальный расход природного газа 6400 кг/ч на одну ГТ (всего 12 800 кг/ч).
- Теплота сгорания топлива *Нн* 50 056 кДж/кг.
- Необходимое давление топливного газа на входе ≥ 32 кг/см² (изб.).
- Температура газов на выходе из ГТ 520 °С.
- Температура наружного воздуха +15 °С.

Паротурбинный контур:

- Два котла-утилизатора паровых двух давлений (КУП).
- Конструкция КУП вертикальная, барабанного типа.
- Количество теплообменных секций 5 (подогревательные, испарительные, пароперегревательные).
- Давление пара ВД 6,0 МПа, температура 490 °С.
- Давление пара НД 0,6 МПа, температура 250 °С.
- Паровая турбина Т-22-6,0/0,12.
- Номинальная мощность на валу ПТ 22 МВт.
- Регулируемый отбор пара 47 Гкал/ч.
- Система смазки ПТУ и турбогенератора единая.
- Емкость маслобака ПТУ 6 м³.

Электрический контур:

- Два турбогенератора для ГТ (по одному на каждую ГТ) 84 МВт.
- Один турбогенератор для ПТ.
- Потребляемая мощность собственных нужд 850 кВт.

Для проведения анализа эффективности и оптимизации работы дублирной ПГУ, основными элементами которой являются газовая турбина марки *MS5002E*, паровая турбина марки Т-22-6,0/0,12 и котел-утилизатор, необходимо провести сравнение эффективности ее работы по энергетическому и эксергетическому методу.

Блок-схема процесса оптимизации ПГУ с использованием эксергетического анализа приведена на рис.



Блок-схема процесса оптимизации ПГУ
с использованием эксергетического анализа

К традиционным подходам оптимизации ПГУ следует отнести методологию расчета по первому закону термодинамики, где основное внимание уделяется количеству переданной и преобразованной энергии. В таких расчетах используются массовые и тепловые балансы, позволяющие определить полезный выход энергии и рассчитать КПД установки [12—16]:

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{N_{\text{чист}}}{Q_{\text{вход}}} 100 \%,$$

где $N_{\text{чист}} = 84$ МВт — чистая электрическая мощность установки; $Q_{\text{вход}} = 179,8$ МВт — подведенное тепло (рассчитано: $12\,800 \text{ кг/ч} \times 50\,056 \text{ кДж/кг} / 3600 \text{ с} = 177,9 \text{ МВт} + \text{потери}$);

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{84}{179,8} 100 \% = 46,7 \ %.$$

Полученное значение соответствует паспортным данным установки ПГУ-84. Однако энергетический подход не различает качество энергии: все ее формы рассматриваются как эквивалентные без учета неизбежных потерь работоспособности.

Эксергия (доступная энергия) — это мера качества энергии, характеризующая ее способность совершать полезную работу при достижении равновесия с окружающей средой [1—5]. В отличие от энергии, эксергия принимает во внимание необратимые потери, возникающие из-за второго закона термодинамики, и поэтому всегда разрушается, когда процесс протекает неидеально.

Основное определение эксергии для открытой системы записывается по следующей формуле [17—19]:

$$e = (h - h_0) - T_0 (s - s_0),$$

где e — эксергия потока, кДж/кг; h — энтальпия потока, кДж/кг; s — энтропия потока, кДж/(кг · К); h_0 и s_0 — энтальпия и энтропия в условиях окружающей среды, кДж/кг и кДж/(кг · К) соответственно; $T_0 = 288$ К — температура окружающей среды (+15 °С).

Анализ эксергии позволяет составить баланс, в котором учитываются не только потоки энергии, но и ее качество. Для каждого компонента системы применяется основной баланс эксергии, который выражается следующим уравнением [12—16]:

$$E_{\text{вх}} - E_{\text{вых}} - E_{\text{дестр}} = 0,$$

где $E_{\text{дестр}}$ — деструкция эксергии, связанная с необратимыми процессами, возникающими в оборудовании, МВт.

Именно эта характеристика позволяет локализовать потери работоспособной энергии в конкретных участках установки.

1. Камера сгорания газовых турбин.

Эксергия топлива: $E_{\text{топл}} = m_{\text{топл}} \cdot e_{\text{топл}} = 3,56 \cdot 52559 = 187,1$ МВт
(где $e_{\text{топл}} = 1,05 \cdot H_u = 1,05 \cdot 50\,056 = 52\,559$ кДж/кг).

Эксергия воздуха на входе: $E_{\text{возд}} = 174 \cdot 0,3806 = 66,3$ МВт.

Эксергия газов на выходе: $E_{\text{газ}} = 177,8 \cdot 0,7212 = 128,2$ МВт.

Деструкция эксергии: $E_{\text{дестр, КС}} = (187,1 + 66,3) - 128,2 = 125,2$ МВт.

2. Газовая турбина MS5002E (на одну турбину).

Эксергия газов на входе: $E_{\text{вх}} = 88,9 \cdot 0,7212 = 64,1$ МВт.

Эксергия газов на выходе: $E_{\text{вых}} = 88,9 \cdot 0,3392 = 30,2$.

Полезная мощность: $E_{\text{ГТ}} = 33,3$ МВт.

Деструкция эксергии: $E_{\text{дестр, ГТ}} = 64,1 - 30,2 - 33,3 = 0,6$ МВт.

Деструкция эксергия в двух газовых турбинах: $E_{\text{дестр, ГТ}} = 1,2$ МВт.

3. Котел-утилизатор (один КУП).

Эксергия газов на входе: $E_{\text{вх}} = 88,9 \cdot 0,3392 = 30,2$ МВт.

Эксергия газов на выходе: $E_{\text{вых}} = 88,9 \cdot 0,0524 = 4,7$ МВт.

Эксергия пара ВД: $E_{\text{пар, ВД}} = 42,7 \cdot 1,4454 = 61,7$ МВт.

Эксергия пара НД: $E_{\text{пар, НД}} = 12,1 \cdot 0,8997 = 10,9$ МВт.

Деструкция эксергии:

$E_{\text{дестр, КУ}} = 30,2(1 - \eta_{\text{экс, КУ}}) = 30,2 - (1 - 0,5) = 15,1$ МВт.

Деструкция эксергии в двух котлах-утилизаторах: $E_{\text{дестр, КУ}} = 30,2$ МВт.

4. Паровая турбина Т-22-6,0/0,12.

Эксергия пара на входе:

$E_{\text{пар, вх}} = (42,8 - 1,4454) + (12,2 \cdot 0,8997) = 61,9 + 11,0 = 72,9$ МВт.

Эксергия пара в конденсаторе: $E_{\text{конд}} = 55,0 \cdot 0,147 = 8,1$ МВт.

Полезная мощность: $N_{\text{ПТ}} = 22$ МВт.

Деструкция эксергии:

$E_{\text{дестр, ПТ}} = E_{\text{пар, вх}} - E_{\text{конд}} - N_{\text{ПТ}} = 72,9 - 8,1 - 22 = 42,8$ МВт.

Эксергетический КПД определяется как отношение полезного выхода (например, чистой мощности генератора) к поступающей эксергии, что выражается следующей формулой [17—19]:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{N_{\text{чист}}}{E_{\text{топл}}} 100 \%,$$

где $N_{\text{чист}} = 84$ МВт — чистая электрическая мощность установки;
 $E_{\text{топл}} = 187,1$ МВт — общая эксергия топлива.

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{84}{187,1} 100 \% = 44,9 \%$$

Проведенный эксергетический расчет показал, что суммарный эксергетический КПД модуль-блочной схемы ПГУ установки составляет 44,9 %, что ниже ее энергетического КПД. Это свидетельствует о более полном учете

потерь в цикле работы ПГУ. Расчет позволяет определить, что наибольшая доля эксергетических потерь сосредоточена в камере сгорания и котле-утилизаторе. Полученный расчет указывает на характер теплоэнергетических установок, в которых высокотемпературное сжигание топлива сопровождается значительным снижением химической эксергии в тепловую. Концентрация основных тепловых потерь в камере сгорания и котле-утилизаторе указывает на основные направления для оптимизации: совершенствование процесса горения и увеличение эффективности теплообмена для генерации пара.

В результате проведенного расчета представлена табл. сравнительного анализа, демонстрирующая основные показатели оптимизации ПГУ с использованием энергетического и эксергетического подходов.

*Сравнительный анализ энергетического и эксергетического подходов
в оптимизации ПГУ*

Параметр	Энергетический метод	Эксергетический метод
КПД цикла, %	46,7 (паспортное значение)	Не применяется напрямую
Эксергетический КПД, %	Не рассчитывается	44,9 (рассчитанное значение)
Деструкция эксергии, МВт	Не определяется	53,5 (примерное значение)
Распределение потерь	Агрегированные данные: <ul style="list-style-type: none">• потери с уходящими газами: 14,5 МВт;• потери с охлаждающей водой: 18,2 МВт;• механические потери: 7,65 МВт	Выделены конкретные участки: <ul style="list-style-type: none">• камера сгорания: 125,2 МВт (57,8 %);• паровая турбина: 42,8 МВт (19,8 %);• котлы-утилизаторы: 30,2 МВт (13,9 %);• газовые турбины 1,2 МВт (0,6 %)
Целевые компоненты для модернизации	Нет конкретики	Камеры сгорания и котлы-утилизаторы как основные источники деструкции эксергии
Учет необратимости	Не учитывается	Соответствие второму закону термодинамики

Выводы и заключение

В ходе проведенного исследования были проанализированы традиционные методы оптимизации парогазовых установок, основанные на энергетическом балансе, а также предложен и детально рассмотрен эксергетический подход, позволяющий сделать выводы об эффективности и оптимизации рассматриваемой парогазовой установки:

1. Традиционный энергетический баланс позволяет получить агрегированные показатели эффективности ПГУ-84 (КПД 46,7 %), однако он не учитывает разницу между количеством и качеством энергии, что не позволяет определить источники тепловых потерь, а также приоритетные направления модернизации.

2. Эксергетический анализ ПГУ-84 показал, что КПД установки составляет 44,9 %, а основная деструкция эксергии (57,8 %) находится в камерах

сгорания газовых турбин *MS5002E*. Последующими источниками тепловых потерь в дубль-блочной парогазовой установки по значимости являются паровая турбина (19,8 %) и котлы-утилизаторы (13,9 %).

3. Сравнительный анализ показал, что оптимизация ПГУ-84 на основе эксергетического метода позволяет не только оценить текущую эффективность, но и дать конкретные рекомендации по модернизации наиболее проблемных элементов дубль-блочной парогазовой установки.

4. Практическое применение эксергетического метода является актуальным решением для сложных теплоэнергетических установок, где классические методы расчета не способны выявить неполноту процесса преобразования энергии.

Таким образом, интеграция эксергетического анализа в процесс оптимизации параметров ПГУ представляет значительный потенциал для повышения общей энергетической эффективности предприятий и реализации современных требований к энергоэффективности и экологической безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Azubiike U. G., Njoku H. O., Eke M. N., Ekechukwu O. V.* Уточненный эксергетический анализ и классификация компонентов парогазовой установки по их эффективности // Теплоэнергетика. 2025. № 1. С. 23—39. DOI: 10.56304/S0040363624700565.
2. *Галимова Л. В., Байрамов Д. З.* Термодинамический анализ работы парогазовой установки в составе энергосберегающей системы на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины // Омский науч. вестн. Сер. : Авиац.-ракет. и энергет. машиностроение. 2020. Т. 4. № 4. С. 57—65. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-57-65.
3. Эксергетический анализ новых термодинамических циклов с улавливанием диоксида углерода / А. С. Косой, А. А. Косой, О. С. Попель и др. // Теплоэнергетика. 2023. № 7. С. 29—50. DOI: 10.56304/S0040363623070032.
4. *Wang T., Liu X., Zhang Y., Zhang H.* Thermodynamic and emission characteristics of a hydrogen-enriched natural gas-fired boiler integrated with external flue gas recirculation and waste heat recovery // Applied Energy. 2024. Vol. 358. Art. 122614. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122614>.
5. Thermodynamic analysis of a combined cooling and power system driven by waste exhaust heat from industrial boilers in the energy and climatic context of the city of Douala, Cameroon / J. Ntonda, N. N. Lekané, O. Boupda, A. Kamhoua, F. Lontsi // International Journal of Thermofluids. 2025. Vol. 26. Art. 101150. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101150>.
6. *Кульбякина А. В., Озеров Н. А., Савельева А. И., Морозов Н. А.* Аспекты применения термодинамического анализа для оценки эффективности топливных систем предприятий переработки углеводородного сырья // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса : материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф., г. Саратов, 11—13 окт. 2022. Вып. 11. Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю. А., 2022. С. 274—286.
7. *Дрозд М. С., Кича Г. П.* Эксергетический метод анализа термодинамического совершенства судовой энергетической установки // Вестн. Морского гос. ун-та. 2023. № 92. С. 22—26.
8. *Бибиков Д. Р., Полей А. К., Кулик А. В.* Эксергетический анализ когенерационных энергоисточников // Журн. Сибир. федер. ун-та. Сер. : Техника и технологии. 2020. Т. 13. № 6. С. 690—701. DOI: 10.17516/1999-494X-0257.
9. *Иванов А. П., Жалсанова Н. А., Тыскинеева И. Е.* Энергетический и эксергетический анализ теплоэлектроцентрали // Новое в российской электроэнергетике. 2025. № 1. С. 21—30.
10. *Иванов А. П., Жалсанова Н. А.* Эксергетический анализ функционирования комбинированного теплоснабжения // Новое в российской электроэнергетике. 2024. № 12. С. 19—26.
11. *Култышев А. Ю., Голоушова В. Н., Алешина А. С.* Парогазовые установки и особенности паровых турбин для ПГУ. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 163 с.
12. *Юшкова Е. А., Лебедев В. А.* Определение эксергии в теплотехнических системах // Наука. Исследования. Практика : сб. избр. ст. по материалам Междунар. науч. конф., г. Санкт-Петербург, 25 дек. 2019. Ч. 2. СПб. : ГНИИ НАЦРАЗВИТИЕ, 2020. С. 184—186.

13. Research on the synergistic guarantee of operating characteristics of building heating system by solar energy — Waste heat — Biogas boiler / Changyu Liu, Zhiyang Xu, Ji Bian et al. // *Renewable Energy*. 2025. Vol. 255. Art. 123742. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123742>.
14. Черняева И. И. Эксергия, зачем ее придумали // *Энергия-2022*. Теплоэнергетика: Семнадцатая всерос. (девятая междунар.) науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Иваново, 11—13 мая 2022 : в 6 т. Т. 1. Иваново : ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2022. С. 103.
15. Analysis of 5E (energy, exergy, energy level, exergoeconomics, and exergetic sustainability) for a transcritical CO₂ energy storage system integrated with ORC and solar energy / Zhongyan Liu, Ziqiang Xu, Xu Jin et al. // *Energy*. 2025. Vol. 339. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139030>.
16. Energy, exergy, environment, and economic (4E) analysis and multi-objective genetic algorithm optimization of an energy-saving and carbon-reducing electrification ethylene glycol multiple-effect distillation process / Zi H. Zhu, Wen J. Xia, Shun B. Su et al. // *Energy*. 2025. Vol. 341. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139475>.
17. Runke Xiao, Cheng Yang, Hanjie Qi, Xiaoqian Ma. Synergetic performance of gas turbine combined cycle unit with inlet cooled by quasi-isobaric ACAES exhaust // *Applied Energy*. 2023. Vol. 352. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122019>.
18. Dolganov I., Epifanov A., Patsurkovskiy P., Lychko B. An improved methodology for thermal calculation and design optimization of a thermosiphon waste heat boiler for CCGT / *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. Vol. 58. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104402>.
19. Failure mechanism of superheater tubes of waste heat boiler for waste incineration in complex environment / Zhenrong Yan, Li Wang, Xiaocheng Li, Jingtao Wei, Cenfan Liu, Yaodong Da // *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 139. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106457>.

© Легкий А. Д., Ковалев К. А., Жупанов А. И., Обиднов И. А., 2026

Поступила в редакцию
12.02.2026

Ссылка для цитирования:

Легкий А. Д., Ковалев К. А., Жупанов А. И., Обиднов И. А. Применение эксергетического анализа для модернизации и оптимизации параметров ПГУ // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2026. Вып. 1(102). С. 225—233. DOI: 10.35211/18154360_2026_1_225.

Об авторах:

Легкий Александр Дмитриевич — старший преподаватель каф. энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; alegkii@mail.ru

Ковалев Кирилл Александрович — студент, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Жупанов Александр Игоревич — магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Обиднов Илья Андреевич — магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Aleksandr D. Legky, Kirill A. Kovelev, Aleksandr I. Zhupanov, Ilya A. Obidnov

Volgograd State Technical University

APPLICATION OF ENERGY ANALYSIS FOR MODERNIZATION AND OPTIMIZATION OF CCGT UNIT PARAMETERS

This article presents the results of a study on the energy efficiency of a double-block combined-cycle gas turbine unit (CCGT-84) operating in an industrial facility. A comparative analysis of the traditional energy approach and the exergy method for assessing the unit's operating efficiency is

conducted. Based on the equipment's technical characteristics, calculations of the exergy destruction of the CCGT-84's main components are performed. The obtained results can be used in developing energy conservation programs and modernizing combined-cycle gas turbine units of this type.

Key words: combined cycle power plant, exergy analysis, energy balance, exergy destruction, energy saving.

For citation:

Legky A. D., Kovelev K. A., Zhupanov A. I., Obidnov I. A. [Application of energy analysis for modernization and optimization of CCGT unit parameters]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 1, pp. 225—233. DOI: 10.35211/18154360_2026_1_225.

About authors:

Aleksandr D. Legky — Senior Lecturer, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; alegkii@mail.ru

Kirill A. Kovelev — Student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Aleksandr I. Zhupanov — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Ilya A. Obidnov — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation