

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.1:620.9

doi: 10.30987/2782-5957-2026-3-36-44

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ

Максим Анатольевич Брянцев¹, Александр Анатольевич Данилейченко^{2✉}, Данил Михайлович Доценко³, Александр Сергеевич Ковтун⁴

^{1,2,3,4}Луганский государственный университет имени Владимира Даля, Луганск, ЛНР, Россия

¹bry_max@rambler.ru

²280376@rambler.ru; <https://orcid.org/0009-0008-6248-748X>

³danil-docenko@mail.ru

⁴revaron@mail.ru

Аннотация

Целью исследования является анализ существующих систем утилизации тепла (СУТ) энергетических установок, демонстрация возможностей эксергетического метода для их оценки и оптимизации, а также технико-экономическое обоснование их внедрения. Основная задача статьи заключается в применении термодинамического подхода, основанного на втором законе (эксергетический анализ), для выявления и минимизации необратимых потерь работоспособности энергии в СУТ, что позволяет перейти от количественной к качественной оценке их эффективности.

Методы и решения включают эксергетический метод, математическое моделирование и системный анализ. Рассматриваются конструктивно-технологические решения: модульные СУТ для ДВС с котлами-утилизаторами, комбинированные парогазовые циклы (ПГУ) и каскадные системы с органическим циклом Ренкина (ОРЦ). Новизна работы состоит в комплексном применении эксерге-

тического подхода для сравнительного анализа и оптимизации разнотипных СУТ, а также в обобщении данных по коммерчески доступному оборудованию в рамках термодинамического и технико-экономического обоснования. Основные результаты и выводы: Эксергетический анализ позволил локализовать ключевые источники необратимости – камеру сгорания и зоны высокотемпературного теплообмена. Показано, что внедрение СУТ, особенно в составе комбинированных циклов, повышает суммарный КПД установок до 80–90% при окупаемости 2–5 лет. Оптимизация по эксергетическим критериям ведет к снижению затрат топлива, выбросов и повышению индекса устойчивости. Перспективными направлениями признаны каскадное использование тепла, интеграция ОРЦ и интеллектуализация систем управления.

Ключевые слова: утилизация, тепло, энергоэффективность, анализ, энергия, установка, парогазовый цикл, КПД, оптимизация.

Ссылка для цитирования:

Брянцев М.А. Повышение энергетической эффективности теплосиловых установок на основе эксергетического анализа и оптимизации систем утилизации теплоты / М.А. Брянцев, А.А. Данилейченко, Д.М. Доценко, А.С. Ковтун // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 3. – С. 36-44. doi: 10.30987/2782-5957-2026-3-36-44.

Original article

Open Access Article

INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF THERMAL POWER PLANTS BASED ON EXERGETIC ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF HEAT RECOVERY SYSTEMS

Maksim Anatolyevich Bryantsev¹, Aleksandr Anatolyevich Danileychenko^{2✉}, Danil Mikhailovich Dotsenko³, Aleksandr Sergeevich Kovtun⁴

^{1,2,3,4}Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, LNR, Russia

¹ bry_max@rambler.ru

² 280376@rambler.ru; <https://orcid.org/0009-0008-6248-748X>

³ danil-docenko@mail.ru

⁴ revearon@mail.ru

Abstract

The study objective is to analyze existing heat recovery systems (HRS) of power plants, demonstrate the possibilities of exergic method for their evaluation and optimization, as well as feasibility study for their implementation. The main task is to apply a thermodynamic approach based on the second law (exergic analysis) to identify and minimize irreversible energy efficiency losses in HRS per day, which allows to move from a quantitative to a qualitative assessment of their effectiveness.

Methods and solutions include exergic method, mathematical modeling, and system analysis. Constructive and technological solutions are considered: modular HRS for internal combustion engines with recovery boilers, combined steam-to-gas cycle (SGC) and cascade systems with an organic Rankine cycle (ORC). The novelty of the work is in the integrated application of exergic approach for comparative analysis and opti-

mization of different types of HRS, as well as in the generalization of data on commercially available equipment for thermodynamic and feasibility studies. Main results and conclusions: Exergic analysis made it possible to localize the key sources of irreversibility – the combustion chamber and the zones of high-temperature heat exchange. It is shown that the HRS introduction especially in combined cycles increases the total efficiency of installations to 80-90% with a payback period of 2-5 years. Optimization according to exergic criteria leads to lower fuel costs, emissions and an increase in the sustainability index. Cascade heat utilization, ORC integration, and control system intellectualization are recognized as promising areas.

Keywords: utilization, heat, energy efficiency, analysis, energy, installation, combined cycle, efficiency, optimization.

Reference for citing:

Bryantsev MA, Danileychenko AA, Dotsenko DM, Kovtun AS. Increasing energy efficiency of thermal power plants based on exergic analysis and optimization of heat recovery systems. Transport Engineering. 2026;3:36-44. doi: 10.30987/2782-5957-2026-3-36-44.

Введение

В современных условиях растущей энергоёмкости промышленного производства и ужесточения экологических требований к энергетическим объектам особую актуальность приобретает задача повышения энергоэффективности теплосиловых установок. В России и мире широко эксплуатируются энергетические установки на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) – газопоршневых (ГПУ) и дизель-генераторных (ДГУ), а также газотурбинные установки (ГТУ). Их традиционный недостаток – низкий КПД (25...45%), означающий, что большая часть энергии топлива теряется, преимущественно с высокотемпературными выхлопными газами и через системы охлаждения [1, 5].

Утилизация тепла – ключевое направление повышения общей эффективности таких установок. Внедрение систем утилизации тепла (СУТ) позволяет преобразовывать вторичные энергетические ресурсы в полезную тепловую или электрическую энергию, доводя суммарный КПД установок до 80...90% [2, 4]. Это не только дает прямой экономический эффект за

счет снижения затрат на топливо, но и сокращает тепловое загрязнение окружающей среды и выбросы парниковых газов.

Энергетический (первый закон термодинамики) анализ, оценивающий лишь количественное сохранение энергии, оказывается недостаточным для оптимального проектирования СУТ. Он не учитывает качество теплоты – ее способность совершать работу, теряемую в процессах необратимого теплообмена и рассеяния. Более совершенным методом, основанным на втором законе термодинамики, является эксергетический анализ. Он оценивает термодинамическое совершенство систем, локализует и количественно определяет потери работоспособности энергии (эксергии) и позволяет находить оптимальные параметры процессов и оборудования.

Цель данной статьи – провести анализ существующих систем утилизации тепла энергетических установок, продемонстрировать возможности и методику эксергетического подхода для их оценки и оптимизации, а также представить результаты технико-экономического обоснования

внедрения таких систем. На основе обобщения данных по коммерчески доступному оборудованию и результатов научных исследований будут сделаны выводы о

Материалы и методы

Теоретические основы эксергетического метода. Эксергия – это максимально полезная работа, которую может совершить система при обратимом переходе из данного состояния в состояние равновесия с окружающей средой. В отличие от энергии, которая сохраняется, эксергия необратимо уничтожается в реальных процессах. Количество уничтоженной эксергии пропорционально энтропийному приращению, вызванному термодинамической необратимостью процессов (теплообмена при конечной разности температур, трения, химической реакции и т.д.) [3].

Эксергетический баланс для любой установки или ее элемента в стационарном режиме можно записать в следующем виде:

$$\sum E_{in} = \sum E_{out} + E_D + E_L,$$

где $\sum E_{in}$ и $\sum E_{out}$ – потоки эксергии на входе и выходе, E_D – мощность эксергетических потерь (деструкции) внутри системы, а E_L – потери эксергии с выбросами.

Для теплового потока Q при температуре T эксергия рассчитывается как:

$$E_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q,$$

где T_0 – температура окружающей среды.

Из формулы видно, что эксергетическая ценность тепла тем выше, чем выше его температура.

Результаты

Анализ существующих систем утилизации тепла теплосиловых установок. В теплосиловых установках на базе ДВС и ГТУ тепло теряется преимущественно по двум основным каналам:

1. Выхлопные газы. Температура газов на выходе из турбины или двигателя достигает 450...550 °С для ГПУ/ДГУ и может превышать 600 °С для ГТУ [1, 5]. Это высокопотенциальный источник тепла, обладающий значительной эксергией.

2. Система охлаждения двигателя. Антифриз (вода), отводящая тепло от бло-

наиболее эффективных путях развития технологий утилизации вторичных тепловых ресурсов.

Показатели эффективности на основе эксергии. Эксергетический анализ позволяет рассчитать ряд критериев, более точно отражающих эффективность, чем традиционные энергетические КПД.

Эксергетический КПД (коэффициент эффективности)

$$\eta_{ex} = \frac{E_{полезная}}{E_{затраченная}} = 1 - \frac{E_D + E_L}{E_{затраченная}}.$$

Этот показатель отражает термодинамическое совершенство процесса. Для идеального обратимого процесса $\eta_{ex} = 1$, для реальных – всегда меньше 1.

Коэффициент эксергетических потерь – доля потерянной эксергии в каждом аппарате; индекс устойчивости (*Sustainability Index, SI*) – показатель, связывающий эксергетическую эффективность с экологичностью системы: $SI = 1/(1 - \eta_{ex})$ [6]. Чем выше эксергетический КПД, тем выше индекс устойчивости, что свидетельствует о меньшем воздействии системы на окружающую среду. Эти показатели становятся основой для поиска оптимальных конструктивных и режимных параметров системы, позволяя минимизировать необратимые потери при заданных экономических ограничениях [3].

ка цилиндров, масляного радиатора и охладителя наддувочного воздуха, обычно имеет температуру 80...100 °С [4]. Это низкопотенциальное тепло, но его количество велико.

Соотношение между вырабатываемой электрической мощностью и утилизируемой тепловой мощностью может достигать 1:1.3–1.5 [4, 5]. Таким образом, с установки электрической мощностью 1 МВт потенциально можно получить дополнительно до 1.5 МВт тепловой энергии,

что кардинально меняет общую экономику ее эксплуатации.

Современные СУТ для ДГУ и ГПУ представляют собой модульные заводские решения, основными компонентами которых являются тепловые модули (табл.1) утилизации выхлопных газов (ТМВГ), утилизации антифриза (ТМВВ) и система управления.

В ТМВГ ключевой элемент – котел-утилизатор (утилизатор тепла газов, УТГ). Чаще всего выполняется по жаротрубной схеме для удобства очистки. Внутри него выхлопные газы отдают тепло рабочей среде (воде или пару), охлаждаясь с 450...520 °С до 120...180 °С для соответ-

ствия экологическим и техническим требованиям [1, 4].

ТМВВ включает утилизатор тепла антифриза (УТА), который представляет собой пластинчатый или кожухотрубный теплообменник. Он заменяет стандартный радиатор охлаждения двигателя, отводя тепло от антифриза ко второму контуру (воде систем отопления или ГВС).

Система управления и обвязка включает автоматический шкаф управления контролирующей температуры, переключает потоки, включает аварийные режимы. В состав также входят насосы, запорная арматура, байпасные линии для отвода газов и жидкости мимо утилизаторов при отсутствии потребности в тепле [5].

Таблица 1

Технические характеристики типовых тепловых модулей [1]

Table 1

Technical characteristics of typical thermal modules [1]

Параметр / Модель ТМ	ТММ-ТМ.1350 для ДГУ (Cummins KTA50-G3)	ТМ для ГПУ (Perkins 4008-30TRS2)
Эл. мощность установки, кВт	1000	526
Температура газов на входе, °С	520	485
Температура газов на выходе, °С	150	120
Отбор тепла от газов, кВт	733	338 (на 2 модуля)
Отбор тепла от антифриза, кВт	600	-
Суммарный теплосъем, кВт	1333	338

Два тепловых контура (газовый и жидкостный) могут быть скомбинированы по разным схемам: с последовательным проходом антифриза сначала через УТГ (рис. а), а затем через УТА (для дополнительного подогрева) или с параллельным независимым подключением (рис. б) [1]. Выбор схемы зависит от требуемых температур теплоносителя у потребителя.

Применение СУТ в комбинированных циклах (ГТУ). Для более крупных и высокотемпературных газотурбинных установок СУТ эволюционируют в сложные системы комбинированной выработки энергии. Тепло уходящих газов ГТУ (с температурой 500...650 °С) используется в паровом котле-утилизаторе (HRSG) для генерации пара высоких параметров, который вращает паровую турбину. Так формируется парогазовый цикл (ПГУ), КПД

которого достигает 58...63 % и более [3, 6].

Дальнейшее совершенствование направлено на каскадное использование тепла. После HRSG газы могут иметь температуру еще 150-200 °С. Для утилизации этого низкопотенциального тепла эффективно применяется органический цикл Ренкина (ОРЦ) [7–10], в котором в качестве рабочего тела используются органические жидкости с низкой температурой кипения (фреоны, углеводороды). Создание тройных циклов (Газ-Пар-ОРЦ) является перспективным направлением. Исследования показывают, что интеграция ОРЦ с парогазовой установкой может повысить ее общую мощность на 10...15 % [3].

Эксергетический анализ и оптимизация систем утилизации. Эксергетический анализ СУТ начинается с составления де-

тализированной математической модели системы, включающей уравнения баланса массы, энергии и эксергии для каждого

элемента (теплообменник, насос, дымосос и т.д.).

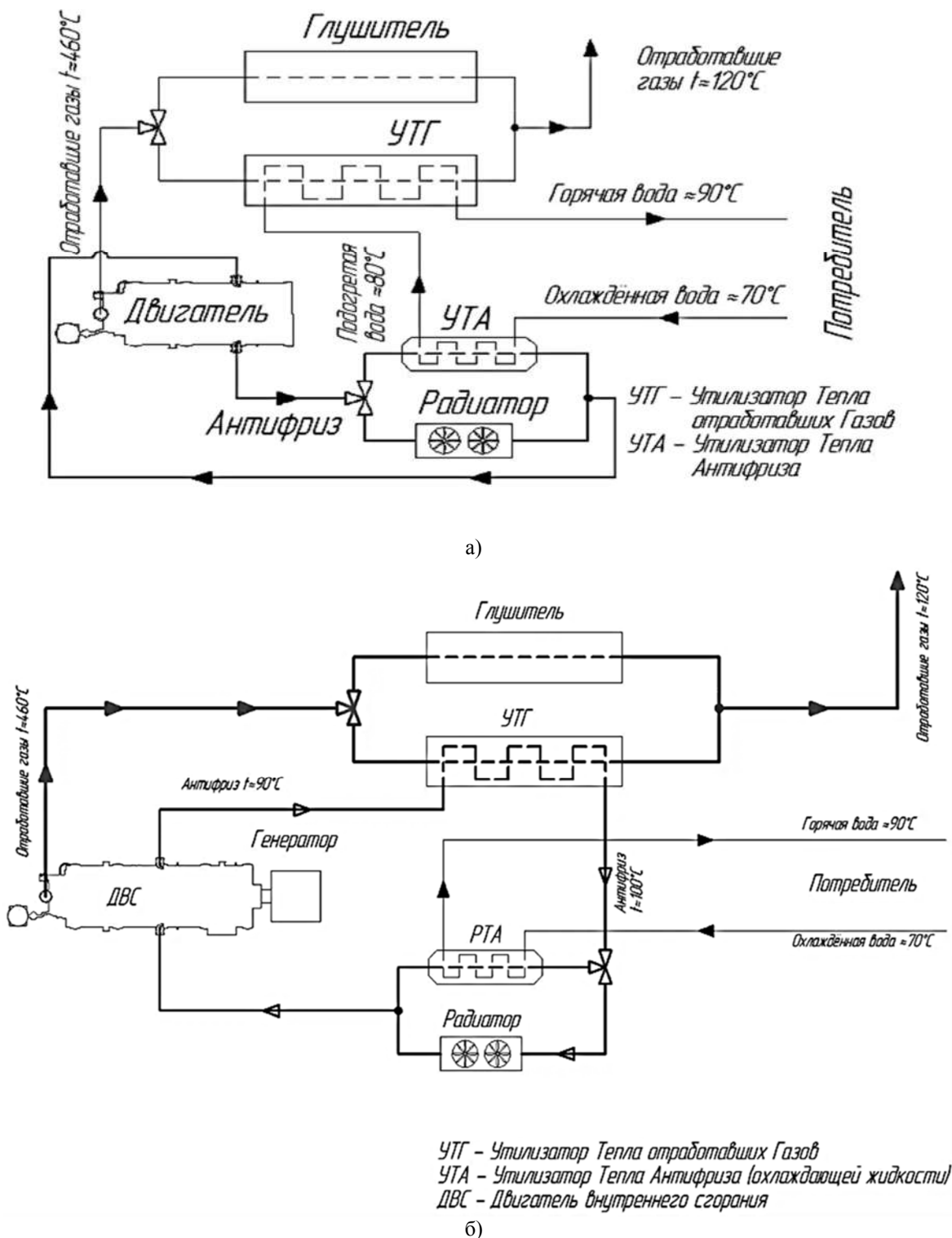


Рис. Тепловая схема утилизации с отдельными тепловыми модулями – а;
б – с последовательным проходом антифриза через ТМВГ и ТМВВ [1]
Fig. 1. Waste heat recovery thermal schemes: (a) with separate heat recovery modules;
(b) with sequential flow of engine coolant through the WHRU (exhaust) and the JWRU [1]

Моделирование часто выполняется в специализированном программном обеспечении (*EES, Aspen Plus, Thermoflex*) [3].

Последовательность анализа включает: расчет энергетических потоков на основе заданных параметров установки (расход топлива, мощность, температуры), определение эксергетических потоков для каждого узла с учетом давления, температуры и химического состава потоков, расчет эксергетических потерь $E_{D,k}$ для каждого k -го компонента системы, определение эксергетического КПД системы в целом и ее компонентов, локализацию узких мест – компонентов с наибольшей долей эксергетических потерь (наибольшей необратимостью).

Результаты эксергетического анализа и выявление потерь. Исследования, включая анализ парогазовой установки с дожиганием топлива, показывают, что наиболее значительные потери эксергии происходят в зонах с наибольшей необратимостью тепловых и химических процессов [3, 6].

Для котлов-утилизаторов (*HRSG* или УТГ) главные источники необратимости – теплообмен при большой разности температур. Максимальная деструкция эксергии, как правило, наблюдается в зоне высокотемпературного испарителя (*HP-EV*) и первого пароперегревателя, где горячие газы контактируют с кипящей водой или паром [6]. По мере движения газов по тракту разность температур уменьшается, и необратимость снижается.

Для камеры сгорания ДВС или ГТУ (абсолютный лидер по потерям эксергии во всей энергоустановке, которая может достигать 40...50 % от общей деструкции)

[3] потери вызваны необратимостью химической реакции горения и последующего смешения горячих продуктов сгорания с воздухом.

Исследования демонстрируют, что повышение температуры газов на входе в *HRSG* ведет к росту эксергетического КПД цикла, но лишь до определенного предела (около 650 °C), после которого прирост эффективности замедляется, а затраты на материалы резко возрастают [6].

На основе данных эксергетического анализа формулируется задача оптимизации, цель которой – найти такие конструктивные и режимные параметры, которые максимизируют эффективность (или минимизируют затраты) при заданных ограничениях. Целевыми функциями могут быть чаще всего это минимизация удельной эксергетической стоимости производимой энергии (электрической и тепловой) или максимизация эксергетического КПД системы.

К оптимизируемым параметрам (переменным) относят давление и температуру пара высокого и низкого давления в *HRSG*. Значение минимальной разности температур (пинч-точка) в различных элементах *HRSG* стремятся уменьшить, что снижает необратимость, но увеличивает площадь и стоимость теплообменной поверхности. Для ОРЦ – это температура на входе в турбину, тип и параметры органического рабочего тела, а также ограничения технические (прочностные, кинематические), эксплуатационные (минимальный допустимый вакуум в конденсаторе) и экономические (общий бюджет проекта).

Таблица 2

Сравнение показателей простого газотурбинного цикла (ГТЦ) и комбинированного цикла (ГТЦ+ПЦ+ОРЦ) по результатам эксергоэкономического исследования [3]

Table 2

Comparison of indicators of a simple gas turbine cycle (GTC) and a combined cycle (GTC+PC+ORC) based on the results of an exergic and economical study [3]

Показатель	Простой ГТЦ	Комбинированный цикл (GSO CC)	Прирост, %
Мощность, МВт	167.3	258.2	+54.3
Энергетический КПД, %	28.74	44.37	+54.4
Эксергетический КПД, %	27.75	42.84	+54.4
Удельная стоимость энергии, USD/МВт·ч	8.24	9.03	+9.6 (за счет инвестиций)

Из табл. 2 видно, что внедрение комбинированного цикла дает колоссальный прирост эффективности (более 50%), хотя и несколько увеличивает стоимость единицы вырабатываемой энергии. Однако, с учетом роста выработки, общая экономическая эффективность проекта значительно повышается.

Технико-экономическое и экологическое обоснование (ТЭО). Внедрение СУТ требует капитальных вложений, однако их окупаемость, как правило, составляет от 2 до 5 лет и зависит от типа установки, режима работы и стоимости замещаемого топлива [1]. В качестве примера рассмотрим ТЭО для ГПУ мощностью 1165 кВт [1]. Здесь устанавливается тепловой модуль стоимостью ~3,3 млн руб. со среднегодовой выработкой тепла $1010 \text{ кВт} \times 3000 \text{ ч/год} = 3030000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, стоимостью замещаемого тепла от котельной (на газе) в $0,56 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч}$, годовой экономией в $3030000 \times 0,56 = \sim 1,7 \text{ млн руб.}$ и сроком окупаемости в $3,3 / 1,7 \approx 1,9$ года. Для дизельных установок эффект еще выше,

Заключение и перспективные направления

Проведенный анализ демонстрирует, что системы утилизации тепла являются технически зрелым и экономически эффективным решением для кардинального повышения эффективности тепловых установок. Переход от энергетического к эксергетическому анализу позволяет перейти от количественной оценки к качественной, выявляя истинные источники термодинамических потерь и находя оптимальные параметры для их минимизации. Внедрение СУТ, особенно в составе комбинированных циклов, способно повысить общий КПД установок с 30...40 % до 80...90 %, обеспечивая быструю окупаемость инвестиций и значительный экологический эффект.

Ключевыми перспективными направлениями развития являются:

1. Каскадное и комплексное использование тепла. Интеграция высоко-, средне- и низкотемпературных контуров, включая паровые циклы, органические

так как стоимость тепла, производимого дизельной котельной, значительно выше газового. Срок окупаемости может сокращаться в 3...5 раз по сравнению с приведенным примером [1].

Экологические выгоды носят системный характер. Снижение расхода топлива на единицу полезной энергии (электричество + тепло) на 25...40 %. Пропорциональное сокращение выбросов CO_2 , оксидов азота (NO_x) и серы (SO_x). Для ГПУ уровень выбросов NO_x изначально примерно в 3 раза ниже, чем у дизельных аналогов [5]. Снижение теплового загрязнения окружающей среды, так как сброс высокотемпературных газов и охлаждающей жидкости в атмосферу минимизируется. Эксерго-экологический анализ позволяет количественно связать рост эксергетического КПД с индексом устойчивости (SI) и сокращением выбросов CO_2 . Оптимизация СУТ по эксергетическим критериям автоматически ведет к созданию более экологически чистой энергетической системы [6].

циклы Ренкина (ОРЦ) и абсорбционные холодильные машины (АБХМ) для тригенерации (производства электроэнергии, тепла и холода) [3, 5].

2. Расширение применения ОРЦ. Для утилизации низкопотенциального тепла ($90...150 \text{ }^\circ\text{C}$) от систем охлаждения ДВС, после *HRSG*, а также в распределенной энергетике.

3. Интеллектуализация и адаптивность. Развитие систем автоматического управления, способных оптимизировать работу СУТ в реальном времени в зависимости от текущей электрической и тепловой нагрузки, температуры наружного воздуха и тарифов на энергоносители.

4. Разработка новых материалов. Использование жаростойких сталей, алюминиевых сплавов и полимерных материалов для снижения стоимости, веса и коррозии теплообменных аппаратов, работающих в агрессивных средах.

5. Эксерго-экономическая оптимизация как стандарт проектирования. Внедрение методик комплексной оптимизации, учитывающих капитальные и эксплуатационные затраты, а также экологические издержки, на стадии разработки новых энергетических установок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аварьяскин К.Н., Молчанов Я.О. Эксергетический анализ и оптимизация теплообменных аппаратов систем утилизации тепла газопоршневых электростанций // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2020. Т. 23, № 2. С. 154-165.
2. Беспалов В.Н., Голубев А.Ю. Комбинированное производство энергии: когенерация и тригенерация на основе двигателей внутреннего сгорания. Москва: Издательский дом МЭИ, 2018. 320 с.
3. Михеев А.С., Румянцев А.А. Эксергоэкономическая оптимизация парогазовой установки с дожиганием топлива // Теплоэнергетика. 2021. № 5. С. 45-53.
4. Петин А.Н., Соколов Е.Я. Технико-экономическое обоснование внедрения систем утилизации тепла на дизельных электростанциях // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 4 (126). С. 34-39.
5. Сычев В.В. Сложные термодинамические системы. Эксергетический метод анализа и оп-

Таким образом, дальнейшее развитие технологий утилизации тепла, подкрепленное инструментами эксергетического анализа, является важнейшим путем повышения энергоэффективности, конкурентоспособности и экологической безопасности мировой и российской энергетики.

тимизации. 2-е изд. Москва: Издательство МЭИ, 2017. 288 с.

6. Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. Thermal Design and Optimization. New York: John Wiley & Sons, 1996. 560 p.
7. Dincer I., Rosen M.A. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. 3rd ed. Oxford: Elsevier, 2021. 552 p.
8. Karellas S., Braimakis K. Energy-exergy analysis and economic investigation of a cogeneration and trigeneration ORC-VCC hybrid system utilizing biomass fuel and solar power // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 107. P. 103-113. (Scopus, WoS).
9. Song J., Gu C.-W., Ren X. Parametric design and off-design analysis of organic Rankine cycle (ORC) system // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 112. P. 157-165. (Scopus, WoS).
10. Wang J., Yan Z., Zhao P., Dai Y. Exergoeconomic analysis and optimization of a combined cooling, heating and power system based on organic Rankine and vapor compression cycles // Energy. 2017. Vol. 141. P. 150-164. (Scopus, WoS).

REFERENCES

1. Avaryaskin KN, Molchanov YaO. Exergic analysis and optimization of heat exchangers for heat recovery systems of gas-piston power plants. Civil Aviation High Technologies. 2020;23(2):154-165.
2. Bepalov VN, Golubev AYu. Combined energy production: cogeneration and trigeneration based on internal combustion engines. Moscow: MEI Publishing House; 2018.
3. Mikheev AS, Rumyantsev AA. Exergic and economical optimization of a steam-gas plant with afterburning of fuel. Teploenergetika (Thermal Engineering). 2021;5:45-53.
4. Petin AN, Sokolov EYa. Feasibility study of introducing heat recovery systems at diesel power plants. // Energysaving and Watertreatment. 2019;4(126):34-39.
5. Sychev VV. Complex thermodynamic systems. Exergetic method of analysis and optimization. 2nd ed. Moscow: MEI Publishing House; 2017.

6. Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. Thermal design and optimization. New York: John Wiley and Sons; 1996.
7. Dincer I, Rosen MA. Exergy: energy, environment and sustainable development. 3rd ed. Oxford: Elsevier; 2021.
8. Karellas S, Braimakis K. Energy-exergy analysis and economic investigation of a cogeneration and trigeneration ORC-VCC hybrid system utilizing biomass fuel and solar power. Energy Conversion and Management. 2016;107:103-113.
9. Song J, Gu C-W, Ren X. Parametric design and off-design analysis of organic Rankine cycle (ORC) system. Energy Conversion and Management. 2016;112:157-165.
10. Wang J, Yan Z, Zhao P, Dai Y. Exergoeconomic analysis and optimization of a combined cooling, heating and power system based on organic Rankine and vapor compression cycles. Energy. 2017;141:150-164.

Информация об авторах:

Брянцев Максим Анатольевич – старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Института транспорта и логистики ФГБОУ ВО ЛГУ им. В. Даля, тел. +7(959)1010162.

Данилейченко Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» Института транспорта и логистики ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля», Author-ID-РИНЦ 1185129, SPIN-код 6030-1239, тел. +7(959)1403791.

Bryantsev Maksim Anatolyevich – Senior Lecturer of the Department of Internal Combustion Engines at the Institute of Transport and Logistics of Lugansk State University named after Vladimir Dahl, phone: +7(959)1010162.

Danileychenko Aleksandr Anatolyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Internal Combustion Engines at the Institute of Transport and Logistics of Lugansk State University named after Vladimir Dahl, phone: +7(959)1403791, Author-ID-RSCI

Доценко Данил Михайлович – старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Института транспорта и логистики ФГБОУ ВО ЛГУ им. В. Даля, тел. +7(959)1511944.

Ковтун Александр Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Института транспорта и логистики ФГБОУ ВО ЛГУ им. В. Даля, тел. +7(959)2352962.

1185129, SPIN code 6030-1239, phone: +7(959)1403791.

Dotsenko Danil Mikhailovich – Senior Lecturer of the Department of Internal Combustion Engines at the Institute of Transport and Logistics of Lugansk State University named after Vladimir Dahl, phone: +7(959)1511944.

Kovtun Aleksandr Sergeevich – Senior Lecturer of the Department of Internal Combustion Engines at the Institute of Transport and Logistics of Lugansk State University named after Vladimir Dahl, phone: +7(959)2352962.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026; одобрена после рецензирования 03.02.2026; принята к публикации 27.02.2026. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 15.01.2026; approved after review on 03.02.2026; accepted for publication on 27.02.2026. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.