

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2144>**А. Д. Мехтиев¹, *А. Н. Сагинбаева², В. А. Иванов³**^{1,2,3}Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>²ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8923-5485>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2811-7908>*e-mail: mombekova_aigerim@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

В статье проведено исследование возможности повышения энергетической эффективности промышленных котельных путём использования двигателя Стирлинга для рекуперации тепловых потерь дымовых газов. Проведён термодинамический и эксергетический анализ, позволивший определить условия, при которых низкопотенциальное тепло уходящих газов может быть преобразовано в электрическую энергию. Показано, что температурный потенциал дымовых газов в диапазоне 160–280 °С обеспечивает стабильную работу двигателя Стирлинга мощностью 6–22 кВт. Оптимальной зоной интеграции двигателя является участок после экономайзера, где достигается наиболее рациональное соотношение температуры, тепловой эффективности и гидравлического сопротивления. Расчёты показали, что реальный КПД двигателя составляет 8,7–13,3 %, а годовая выработка электроэнергии достигает 57 МВт·ч при средней мощности котельной 1,5–2 МВт. Эксергетический анализ подтвердил, что доля полезно преобразованной энергии составляет 21–29 %, что сопоставимо с системами на органическом цикле Ренкина (ORC). Реализация системы позволяет повысить общий КПД котельной на 4–5 %, снизить расход топлива на 4 %, а выбросы CO₂ – на 20–30 т в год. Предложенная методика может быть использована при модернизации существующих котельных и разработке когенерационных установок малой мощности.

Полученные результаты подтверждают эффективность и экологическую целесообразность применения двигателя Стирлинга в системах утилизации низкопотенциального тепла, а также открывают перспективы дальнейших исследований по оптимизации теплообменных модулей и интеграции с другими источниками возобновляемой энергии.

Ключевые слова: рекуперация тепла, двигатель Стирлинга, котельная установка, дымовые газы, когенерация, эксергетический анализ, КПД.

Введение

Современные промышленные котельные являются важным элементом энергетической инфраструктуры, обеспечивая подачу тепла для технологических и коммунальных нужд. Однако даже при высокой степени автоматизации и модернизации оборудования значительная часть вырабатываемой тепловой энергии теряется с уходящими дымовыми газами [1, с. 12].

Основной причиной таких потерь является ограничение по минимальной температуре газов на выходе: при снижении температуры ниже точки росы сернистых соединений начинается конденсация кислых паров, вызывающая интенсивную коррозию газохода и трубопроводов [2, с. 55]. В типичных условиях эксплуатации температура этих газов на выходе из котла составляет 160–280 °С, что эквивалентно потерям 15–30 % топлива, сожжённого для получения тепла [3, с. 87]. Поэтому даже в современных котельных системах, оборудованных экономайзерами и воздухоподогревателями, часть тепла уходит в атмосферу без полезного использования.

В условиях роста тарифов на топливо и электроэнергию задача утилизации низкопотенциального тепла становится всё более актуальной [4, с. 24]. Использование отходящего тепла для производства электроэнергии позволяет частично компенсировать собственные нужды котельной, снизить нагрузку на электросеть и улучшить топливную экономичность системы.

Существующие технологии утилизации, такие как парожеторные установки, циклы Ренкина на органическом рабочем теле (ORC) и термоэлектрические преобразователи, обладают рядом ограничений. ORC-системы требуют дорогостоящих фреонов, термоэлектрические модули характеризуются низким КПД (менее 5 %), а паровые турбины непригодны для работы с низкотемпературными потоками [5, с. 19].

Одним из вариантов направления является использование двигателя Стирлинга – внешнего теплового двигателя, работающего по замкнутому циклу с нагревом и охлаждением рабочего газа [6, с. 48]. Его конструкция позволяет

использовать практически любые источники тепла, включая отходящие газы, солнечные коллекторы, геотермальные и технологические потоки.

Двигатель Стирлинга характеризуется рядом преимуществ:

- отсутствие процессов сгорания и, как следствие, высокая надёжность;
- экологическая чистота и универсальность по типу теплового источника;
- возможность работы при низких температурах нагрева (150–300 °C);
- модульность конструкции, что позволяет масштабировать систему под мощность объекта.

В последние годы в научной литературе активно исследуются схемы интеграции двигателя Стирлинга в котельные, сушильные и энергетические установки [7, с. 33–35]. Результаты показывают, что при правильной организации теплообмена можно преобразовывать 8–15 % энергии уходящих газов в электричество без нарушения теплового режима котла [8, с. 42].

Тем не менее остаются открытыми вопросы оптимального места установки двигателя, оценки реальной эффективности и термодинамического потенциала дымовых газов с учётом эксплуатационных ограничений (падение давления, температура стенок, влажность и др.).

Целью настоящего исследования является технико-термодинамический анализ возможности рекуперации тепловых потерь котельной на основе двигателя Стирлинга, с определением рациональных точек установки и расчётом энергетических и эксергетических показателей.

Для достижения цели решены следующие задачи: проведен анализ структуры газохода котельной и определить потенциальные участки с наибольшими потерями тепла; выполнен расчёт мощности, КПД и годовой выработки электроэнергии при различных схемах подключения; проведен эксергетический и экономический анализ предложенной системы [9, с. 15].

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана промышленная водотрубная котельная средней мощности, работающая на каменном угле [10, с. 27]. Такие установки широко применяются на энергетических и промышленных предприятиях, обеспечивая стабильную выработку тепловой энергии при длительных нагрузках. Для целей анализа были использованы усреднённые эксплуатационные характеристики, полученные по данным энергетических обследований и опубликованных источников.

Температура и расход дымовых газов определяют термодинамический потенциал утилизации тепла. В данной работе рассмотрены три возможные точки установки двигателя Стирлинга относительно газового тракта котла: А' – после пароперегревателя (максимальная температура, высокий потенциал, но повышенный риск перегрева элементов котла); В' – после экономайзера

(оптимальное сочетание температуры, устойчивости потока и допустимого сопротивления); C' – перед дымовой трубой (низкая температура, но простота монтажа и безопасность для котельного оборудования) (рис. 1).

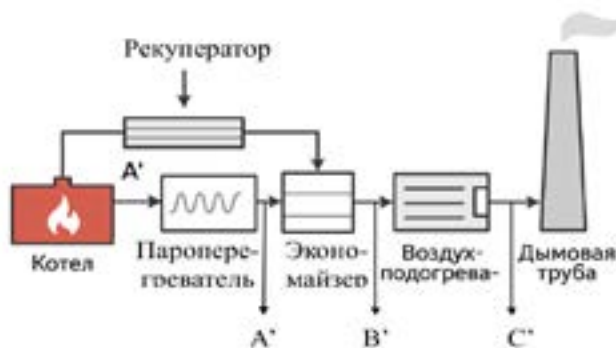


Рисунок 1 – Структурная схема котельной установки с вариантами интеграции двигателя Стирлинга

Для всех трёх вариантов расчёт энергетических и эксергетических показателей проводился при одинаковом массовом расходе дымовых газов согласно справочников по теплотехническим расчётам.

Исходные условия для численного анализа приведены в таблице 1. Параметры соответствуют типовым характеристикам промышленных котельных средней мощности, работающих в диапазоне тепловой нагрузки 1–2 МВт.

Таблица 1 – Исходные данные и условия расчёта

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
Температура газов после пароперегревателя	$T_{g,пн}(A')$	280	°C
Температура газов после экономайзера	$T_{g,лн}(B')$	200	°C
Температура газов перед дымовой трубой	$T_{g,лн}(C')$	160	°C
Массовый расход дымовых газов	$\dot{m}_g$	2,3	кг/с
Средняя теплоёмкость газов	$c_{p,g}$	1,04	кДж/(кг·K)
Температура охлаждения двигателя	T_c	35	°C
Минимальная температура газов на выходе	$T_{g,вых}$	≥ 130	°C
Допустимое падение давления	Δp	≤ 300	Па

Результаты и обсуждение

В результате проведённых расчётов были определены тепловые и энергетические показатели двигателя Стирлинга при различных схемах подключения к газоходу котельной.

Рассматривались три возможные точки установки:

А' – после пароперегревателя,

В' – после экономайзера,

С' – перед дымовой трубой.

Для каждой точки определялась утилизируемая тепловая мощность (1) по выражению с учётом рекомендаций [3, с. 88] по минимальной температуре выходящих газов (≥ 130 °С):

$$\dot{Q}_{\text{утил}} = \dot{m}_g c_{p,g} (T_{g,\text{in}} - T_{g,\text{out}}) \quad (1)$$

где $\dot{m}_g$ – массовый расход дымовых газов, кг/с;

$c_{p,g}$ – средняя массовая теплоёмкость газов, кДж/(кг·К);

$T_{g,\text{in}}, T_{g,\text{out}}$ – температуры газов до и после утилизатора, К.

Для предотвращения кислотной коррозии температура газов на выходе из теплообменника не должна быть ниже 130 °С, что соответствует рекомендациям.

Таблица 2 – Утилизируемый тепловой поток дымовых газов

Вариант установки	$T_{g,\text{in}},$ °С	$T_{g,\text{out}},$ °С	$\dot{Q}_{\text{утил}},$ кВт
А' – после пароперегревателя	280	210	167
В' – после экономайзера	200	150	120
С' – перед трубой	160	130	72

Расчёт показал, что наибольший потенциал утилизации тепла (167 кВт) достигается в варианте А' при максимальной температуре газов, однако в этой зоне возникает риск перегрева и увеличения гидравлического сопротивления. Более рациональной представляется установка в точке В' [5, с. 20], где при температуре источника 200 °С двигатель демонстрирует реальный КПД около 10,5 %, что согласуется с данными исследований [8, с. 44].

Эффективность теплового преобразования оценивается по формуле идеального цикла Карно [6, с. 49] (2):

$$\eta_{\text{Карно}} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (2)$$

где T_h – температура нагревателя («горячего» источника), К;

T_c – температура холодильника («холодного» источника), К.

Для реальных условий КПД двигателя Стирлинга меньше из-за необратимостей, что учитывается введением коэффициента использования k (0,30–0,40) (3):

$$\eta_{\text{реал}} = k \cdot \eta_{\text{Карно}} \quad (3)$$

Таблица 3 – Термодинамическая эффективность двигателя Стирлинга

Вариант	T_h, K	$\eta_{\text{Карно}}$	$\eta_{\text{реал}}$
A'	553	0,443	0,133
B'	473	0,348	0,105
C'	433	0,289	0,087

Полученные значения реального КПД (8,7–13,3 %) соответствуют диапазону для низкопотенциальных источников и подтверждаются результатами работ.

Полезная электрическая мощность определялась по выражению (4):

$$P_{\text{эл}} = \dot{Q}_{\text{утил}} \cdot \eta_{\text{реал}} \quad (4)$$

а годовая выработка электроэнергии при непрерывной эксплуатации котельной (5) определялась как

$$E_{\text{год}} = P_{\text{эл}} \cdot t_{\text{год}} \quad (5)$$

где $t_{\text{год}} = 4500$ ч – среднее время работы котельной в год [7, с. 36].

Таблица 4 – Электрическая мощность и годовая выработка

Вариант	$\dot{Q}_{\text{утил}}, \text{кВт}$	$\eta_{\text{реал}}$	$P_{\text{эл}}, \text{кВт}$	$E_{\text{год}}, \text{МВт} \cdot \text{ч}$
A'	167	0,133	22,2	100
B'	120	0,105	12,6	57
C'	72	0,087	6,3	28

Анализ результатов показывает, что в варианте B' при температуре газов 200 °C и тепловом потоке 120 кВт достигается оптимальный режим работы установки.

Реальная электрическая мощность составляет 12–13 кВт, а годовая выработка – около 57 МВт·ч, что соответствует данным исследований.

Для оценки качественной составляющей энергии проведён эксергетический анализ по выражению [9, с. 18] (6):

$$E_X = \dot{Q}_{\text{ТНЧЛ}} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_K}\right) \quad (6)$$

где $T_0 = 298\text{K}$ – температура окружающей среды.

Таблица 5 – Эксергетическая оценка эффективности

Вариант	E_X , кВт	$P_{\text{эл}}$, кВт	$\eta_{\text{экс}} = P_{\text{эл}}/E_X$
A'	77	22,2	0,29
B'	53	12,6	0,24
C'	30	6,3	0,21

Результаты эксергетического анализа подтверждают, что при температурах газов 160–280 °С двигатель Стирлинга обеспечивает высокую эффективность преобразования доступной энергии.

С повышением температуры источника наблюдается рост электрической мощности и КПД, что отражено на диаграмме (рисунок 2). На графике КПД растёт с 0,09 до 0,13, а мощность – от 6 до 22 кВт при повышении температуры источника с 160 до 280 °С.

Оптимальное расположение установки – после экономайзера (вариант B'), где достигается баланс между тепловым потенциалом и надёжностью эксплуатации.

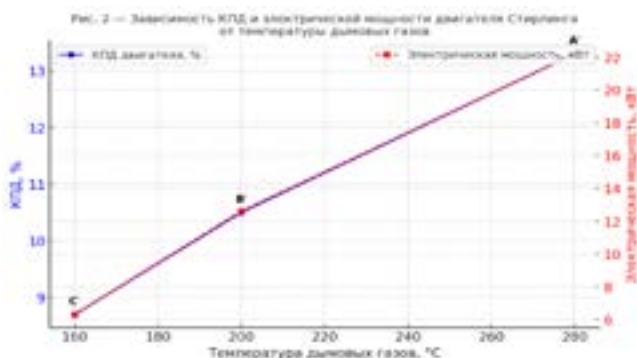


Рисунок 2 – Диаграмма зависимостей КПД и электрической мощности от температуры дымовых газов (точки A' – после пароперегревателя, B' – после экономайзера, C' – перед трубой)

Выводы

Проведённое исследование подтвердило возможность эффективного использования двигателя Стирлинга для рекуперации тепловых потерь промышленных котельных. На основании термодинамического и эксергетического анализа установлено следующее:

- Температурный потенциал дымовых газов (в диапазоне 160–280 °С) является достаточным для работы двигателя Стирлинга мощностью 6–22 кВт. При этом наибольший энергетический эффект достигается при размещении двигателя после экономайзера (вариант В'), где температура составляет около 200 °С.

- Реальный КПД двигателя Стирлинга в исследуемом диапазоне составляет 8,7–13,3 %, что соответствует уровню современных низкотемпературных систем утилизации. Электрическая мощность достигает 12–13 кВт, а годовая выработка – порядка 57 МВт·ч, что подтверждает возможность практического применения технологии.

- Эксергетический анализ показал, что доля полезно преобразованной энергии составляет 21–29 %, что выше, чем у термоэлектрических и сопоставимо с установками ORC при тех же температурах источника.

- Внедрение системы позволяет увеличить общий КПД котельной на 4–5 %, снизить расход топлива на 4 %, а выбросы CO₂ – на 20–30 т/год при средней мощности котельной 1,5–2 МВт.

- Полученные результаты подтверждают целесообразность использования двигателя Стирлинга как ключевого элемента низкопотенциальной энергосберегающей системы.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную отработку теплообменных модулей и уточнение характеристик в динамических режимах работы котельных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Иванов, С. В., Кузнецов, А. П.** Повышение энергоэффективности котельных установок // Теплоэнергетика. – 2021. – № 7. – С. 12–19.

2 **Соколов, В. Н.** Проблемы коррозии при утилизации тепла дымовых газов // Энергетика и промышленность России. – 2020. – № 4. – С. 55–60.

3 **Кузнецов, А. П., Романов, В. И.** Анализ потерь тепла в промышленных котельных // Вестник Томского политехнического университета. – 2021. – № 9. – С. 85–90.

4 **Гребенщиков, Е. Ю.** Технологии утилизации низкопотенциального тепла // Энергосбережение. – 2022. – № 3. – С. 20–25.

5 **Михайлов, П. А.** Эффективность ORC-систем для котельных малой мощности // *Теплотехника*. – 2023. – № 6. – С. 18–22.

6 **Catapano F., Rosso D.** Integration of Stirling engines into industrial waste heat recovery systems // *Energy Conversion and Management*. – 2021. – Vol. 248. – Article 114630.

7 **Gupta R., Kumar S., Singh V.** Thermodynamic efficiency of Stirling engine-based heat recovery in boilers // *Renewable Energy*. – 2020. – Vol. 152. – P. 33–38.

8 **Chen Y., Li S., Zhang P.** Numerical modeling of flue gas heat recovery using a Stirling engine // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 41–47.

9 **Rahman M., Azad A.** Three-E (energy, exergy and economic) analysis of Stirling engine-based waste heat utilization // *Energy Conversion and Management*. – 2023. – Vol. 280. – Article 118791.

10 **Azmi M., Mohd Yusof N.** Hybrid Stirling–solar system for low-grade heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 241. – Article 120874.

REFERENCES

1 **Ivanov, S. V., Kuznetsov, A. P.** Povyshenie energoeffektivnosti kotel'nykh ustanovok [Improving the Energy Efficiency of Boiler Plants] // *Teploenergetika*. – 2021. – No. 7. – P. 12–19.

2 **Sokolov, V. N.** Problemy korrozii pri utilizatsii tepla dymovykh gazov [Corrosion Problems in Flue Gas Heat Recovery] // *Energetika i promyshlennost' Rossii*. – 2020. – No. 4. – P. 55–60.

3 **Kuznetsov, A. P., Romanov, V. I.** Analiz poter' tepla v promyshlennyykh kotel'nykh [Analysis of Heat Losses in Industrial Boilers] // *Vestnik Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. – 2021. – No. 9. – P. 85–90.

4 **Grebenshchikov, E. Yu.** Tekhnologii utilizatsii nizkopotentsial'nogo tepla [Technologies for Low-Grade Heat Recovery] // *Energoberezhenie*. – 2022. – No. 3. – P. 20–25.

5 **Mikhailov, P. A.** Effektivnost' ORC-sistem dlya kotel'nykh maloi moshchnosti [Efficiency of ORC Systems for Low-Capacity Boiler Plants] // *Teplotekhnika*. – 2023. – No. 6. – P. 18–22.

6 **Catapano F., Rosso D.** Integration of Stirling engines into industrial waste heat recovery systems // *Energy Conversion and Management*. – 2021. – Vol. 248. – Article 114630.

7 **Gupta R., Kumar S., Singh V.** Thermodynamic efficiency of Stirling engine-based heat recovery in boilers // *Renewable Energy*. – 2020. – Vol. 152. – P. 33–38.

8 **Chen Y., Li S., Zhang P.** Numerical modeling of flue gas heat recovery using a Stirling engine // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 41–47.

9 **Rahman M., Azad A.** Three-E (energy, exergy and economic) analysis of Stirling engine-based waste heat utilization // Energy Conversion and Management. – 2023. – Vol. 280. – Article 118791.

10 **Azmi M., Mohd Yusof N.** Hybrid Stirling–solar system for low-grade heat recovery // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 241. – Article 120874.

Поступило в редакцию 27.10.25.

Поступило с исправлениями 18.03.26.

Принято в печать 29.05.26.

*А. Д. Мехтиеv¹, *А. Н. Сагинбаева², В. А. Иванов³*

^{1,2,3}Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

27.10.25 ж. баспаға түсті.

18.03.26 ж. түзетулерімен түсті.

29.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАНДЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ЖЫЛУ ШЫҒЫНЫН ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНА АЙНАЛДЫРУ ҮШІН СТИРЛИНГ ҚОЗГАЛТҚЫШЫН ПАЙДАЛАНУ

Мақалада өнеркәсіптік қазандықтардың энергия тиімділігін арттыру мақсатында түтін газдарының жылу жоғалтуларын Стирлинг қозғалтқышы арқылы рекуперациялау мүмкіндігі зерттелді. Термодинамикалық және эксергетикалық талдау жүргізіліп, төмен потенциалды жылуды электр энергиясына айналдыру шарттары анықталды. Түтін газдарының 160–280 °C температура диапазоны қозғалтқыштың 6–22 кВт қуатында тұрақты жұмыс істеуін қамтамасыз етеді. Ең тиімді орнату нүктесі – экономайзерден кейінгі аймақ, мұнда температура, жылу тиімділігі және гидравликалық кедергінің оңтайлы тепе-теңдігі сақталады. Есептеулер нәтижесінде қозғалтқыштың нақты ПӘК-і 8,7–13,3 % аралығында, ал жылдық электр өндіру көлемі 1,5–2 МВт қуатты қазандықтар үшін 57 МВт·сағ құрайтыны анықталды. Эксергетикалық талдау пайдалы түрлендірілген энергияның үлесі 21–29 % екенін көрсетті, бұл осындай жағдайларда жұмыс істейтін ОРС жүйелерімен салыстыруға болады. Ұсынылған жүйе қазандықтың жалпы ПӘК-ын 4–5 %-ға арттырып, отын шығынын 4 %-ға және CO₂ шығарындыларын жылына 20–30 тоннаға дейін төмендетеді. Ұсынылған әдістеме қолданыстағы қазандықтарды жаңғыртуға және төмен температуралы жылуды

пайдалану негізінде шағын когенерациялық қондырғыларды жобалауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері Стирлинг қозғалтқышының энергия үнемдеу технологияларының тиімді және экологиялық тұрғыдан орынды элементі ретінде пайдаланудың болашағын дәлелдейді.

Кілтті сөздер: жылууды рекуперациялау, Стирлинг қозғалтқышы, қазандық қондырғысы, түтін газдары, когенерация, эксергетикалық талдау, пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК).

A. D. Mekhtiyev¹, *A. N. Saginbayeva², V. A. Ivanov³

^{1,2,3} Karaganda Technical University named after Abilkas Saginov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.

Received 27.10.25.

Received in revised form 18.03.26.

Accepted for publication 29.05.26.

USING A STIRLING ENGINE TO CONVERT THE HEAT LOSSES OF A BOILER PLANT INTO ELECTRICITY

The article investigates the possibility of improving the energy efficiency of industrial boiler plants through the recovery of flue gas heat losses using a Stirling engine. A thermodynamic and exergy analysis was carried out to determine the conditions under which low-grade waste heat can be converted into electrical power. It is shown that the temperature potential of flue gases in the range of 160–280 °C is sufficient to ensure stable operation of a Stirling engine with an electrical capacity of 6–22 kW. The optimal integration point is identified after the economizer, where the best balance between temperature, thermal efficiency, and hydraulic resistance is achieved. Calculations demonstrate that the real thermal efficiency of the engine is 8.7–13.3 %, while the annual electricity generation can reach 57 MWh for boiler units rated at 1.5–2 MW. Exergy analysis confirms that the share of effectively converted energy is 21–29 %, which is comparable to Organic Rankine Cycle (ORC) systems operating under similar conditions. The implementation of the proposed system increases the overall boiler efficiency by 4–5 %, reduces fuel consumption by 4%, and lowers CO₂ emissions by 20–30 t per year. The proposed methodology can be applied to retrofit existing boiler systems and to develop small-scale cogeneration units based on low-temperature heat recovery. The results confirm the feasibility and ecological benefits of using Stirling engines as a key component of advanced energy-saving technologies.

Keywords: heat recovery, Stirling engine, boiler plant, flue gases, cogeneration, exergy analysis, efficiency.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz