Issiqlik elektr stansiyalarida tutun gazlari issiqligini utilizatsiya qilishning zamonaviy usullari tahlili

Saydulla M. Xujakulov[1,a], Temir A. Rustamov[1], Suhrob A. Rafiqov[2]

[1a] PhD, prof., Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, 180100, O‘zbekiston; saidbek1973@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6947-6750
[1] talaba, Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, 180100, O‘zbekiston; Temir.Rustamov@uzgtl.com, https://orcid.org/0009-0002-4044-7248
[2] talaba, Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, 180100, O‘zbekiston; 30suxrob01komolov1999@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-9655-8529

Dolzarbligi: ushbu tadqiqot issiqlik elektr stansiyalarida (IES) tutun gazlari issiqligini utilizatsiya qilishning zamonaviy usullarini tahlil qilishga bag‘ishlangan. Issiqlik elektr stansiyalarining foydali ish koeffitsiyentining pastligi, bugungi kunda jahon energetik tizimlarida bug‘ turbinali qurilmalardan kombinatsiyalashgan bug‘-gaz qurilmalariga o‘tish tendensiyasini boshlab bermoqda. Lekin amalda qo‘llanilib kelinayotgan bug‘ turbinali issiqlik elektr stansiyalarini modernizatsiyalash va renovatsiyasi uchun ilmiy tadqiqotlar olib borish hamda ularning foydali ish koeffitsiyentini oshirishga qaratilgan ilmiy izlanishlarni davom ettirish jahon energetikasi oldida turgan dolzarb masalalardan biri hisoblanadi.
Maqsad: bug‘ turbinali qurilmalarning tutun gazlari bilan issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirish usullarini aniqlash va issiqlik sxemalarini ishlab chiqish, samaradorligini baholashdan iborat.
Usullar: tadqiqot jarayonida dunyo bo‘yicha Scopus va Web of Science ma'lumotlar bazalarida 2010-2024-yillar oralig‘ida chop etilgan 30 dan ortiq ilmiy maqola ko‘rib chiqildi. Organik Renkin Tsikli (ORT), absorbtsion issiqlik nasosli tizimlari (AIN/OAIN), past bosimli ekonomayzerlar (PBE), issiqlik quvurlari asosidagi issiqlik almashtirgichlar (IQIA) va termoelektrik generatorlar (TEG) asosiy texnologiyalar sifatida tahlil qilindi.
Natijalar: tadqiqot qilish asosida OAIN tizimlari tutun gazidagi mavjud va yashirin issiqlikning 80-95% gacha qismini qayta tiklash imkonini beradi, ORT tizimi esa 8-12% issiqlik samaradorligi bilan 220 Vt dan 15 MVt gacha quvvat ishlab chiqarishi mumkin. O‘zbekistondagi yirik IES larda (Sirdaryo, Toshkent, Navoiy, Talimarjon) utilizatsiya qilinmagan issiqlik potensiali 120-250 MVt ni tashkil etishi aniqlandi. Absorbtsion issiqlik nasosli tizimlar uchun 1,4-2,5 yillik o‘z-o‘zini qoplash muddati bilan eng yuqori iqtisodiy ko‘rsatkich qayd etildi. Ushbu tadqiqot O‘zbekistonda energetik samaradorlikni oshirish va CO_2 tashlamalarini kamaytirish uchun tutun gazi issiqligini utilizatsiyalash texnologiyalarini joriy etishning ilmiy asoslarini taqdim etadi.
Kalit so‘zlar: tutun gazi; issiqlik utilizatsiyasi; organik Renkin tsikli; absorbtsion issiqlik nasosi; past bosimli ekonomayzer; termoelektrik generator; issiqlik elektr stansiyasi; energiya samaradorligi; CO_2 tashlamalari

For citation: Khuzhakulov S.M., Rustamov T.A., Rafiqov S.A. Analysis of modern methods of utilization of flue gas heat in thermal power plants. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 2, pp. 203-211.

https://doi.org/10.5281/zenodo.21206027

Received: 20.12.2025
Revised: 18.02.2026
Accepted: 15.06.2026
Published: 26.06.2026

Анализ современных методов использования тепла дымовых газов на тепловых электростанциях

Сайдулла М. Худжакулов[1,a], Темур А. Рустамов[1], Сухроб А. Рафиков[2]

[1a] PhD, проф., Каршиский государственный технический университет, Карши, 180100, Узбекистан; saidbek1973@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6947-6750
[1] студент, Каршиский государственный технический университет, Карши, 180100, Узбекистан; Temir.Rustamov@uzgtl.com, https://orcid.org/0009-0002-4044-7248
[2] студент, Каршиский государственный технический университет, Карши, 180100, Узбекистан; 30suxrob01komolov1999@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-9655-8529

Актуальность: данное исследование посвящено анализу современных методов использования тепла дымовых газов на тепловых электростанциях (ТЭС). Низкая эффективность тепловых электростанций в настоящее время приводит к тенденции в мировых энергетических системах к переходу от паротурбинных установок к парогазовым установкам. Однако одной из актуальных проблем, стоящих перед мировым энергетическим сектором, является продолжение научных исследований, направленных на модернизацию и обновление существующих паротурбинных тепловых электростанций и повышение их эффективности.
Цель: выявить методы снижения теплопотерь с дымовыми газами паротурбинных установок, разработать тепловые схемы и оценить их эффективность.
Методы: в ходе исследования было проанализировано более 30 научных статей, опубликованных в базах данных Scopus и Web of Science по всему миру в период с 2010 по 2024 год. В качестве основных технологий были проанализированы органический цикл Ренкина (ОЦР), абсорбционные тепловые насосные системы (АТН/ОТН), экономайзеры низкого давления (ЭНД), теплообменники с тепловыми трубами (ТТТ) и термоэлектрические генераторы (ТЭГ).
Результаты: на основе проведенного исследования установлено, что системы ОТН позволяют рекуперировать до 80-95% доступного и скрытого тепла дымовых газов, а система ОЦР может генерировать мощность от 220 Вт до 15 МВт с тепловым КПД 8-12%. Было определено, что неиспользованный тепловой потенциал на крупных тепловых электростанциях Узбекистана (Сырдарья, Ташкент, Навои, Талимарджан) составляет 120-250 МВт. Наивысшие экономические показатели были зафиксированы для абсорбционных тепловых насосов со сроком окупаемости 1,4-2,5 года. Данное

исследование предоставляет научную основу для внедрения технологий использования тепла дымовых газов с целью повышения энергоэффективности и сокращения выбросов CO_2 в Узбекистане.
Ключевые слова: дымовые газы; использование тепла; органический цикл Ренкина; абсорбционный тепловой насос; экономайзер низкого давления; термоэлектрический генератор; тепловая электростанция; энергоэффективность; выбросы CO_2.

Analysis of modern methods of utilization of flue gas heat in thermal power plants

Saydulla M. Khuzhakulov[1,a], Temur A. Rustamov[1], Suhrob A. Rafiqov[2]

[1a)] PhD, prof., Karshi State Technical University, Karshi, 180100, Uzbekistan; saidbek1973@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6947-6750
[1)] student, Karshi State Technical University, Karshi, 180100, Uzbekistan; Temir.Rustamov@uzgtl.com, https://orcid.org/0009-0002-4044-7248
[2)] student, Karshi State Technical University, Karshi, 180100, Uzbekistan; 30suxrob01komolov1999@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-9655-8529

Relevance: this study is devoted to the analysis of modern methods of utilization of flue gas heat in thermal power plants (TPPs). The low efficiency of thermal power plants is currently leading to a trend in the world energy systems to switch from steam turbine plants to combined steam-gas plants. However, one of the pressing issues facing the world energy sector is to continue scientific research aimed at modernizing and renovating existing steam turbine thermal power plants and increasing their efficiency.
Aim: to identify methods for reducing heat losses with flue gases of steam turbine plants, develop thermal schemes, and evaluate their effectiveness.
Methods: during the research, more than 30 scientific articles published in the Scopus and Web of Science databases worldwide between 2010 and 2024 were reviewed. Organic Rankine Cycle (ORC), absorption heat pump systems (AHP/OAHP), low-pressure economizers (LPE), heat pipe heat exchangers (HPHE), and thermoelectric generators (TEG) were analyzed as the main technologies.
Results: based on the research, OAIN systems allow recovering up to 80-95% of the available and latent heat in flue gas, while the ORT system can generate power from 220 W to 15 MW with a thermal efficiency of 8-12%. It was determined that the unused heat potential in large thermal power plants in Uzbekistan (Syrdarya, Tashkent, Navoi, Talimarjon) is 120-250 MW. The highest economic performance was recorded for absorption heat pump systems with a payback period of 1.4-2.5 years. This study provides a scientific basis for the introduction of flue gas heat utilization technologies to increase energy efficiency and reduce CO_2 emissions in Uzbekistan.
Keywords: flue gas; heat utilization; organic Rankine cycle; absorption heat pump; low-pressure economizer; thermoelectric generator; thermal power plant; energy efficiency; CO_2 emissions.

1. Kirish (Introduction)

Jahon energetikasi oldidagi eng dolzarb muammolardan biri boʻlgan energiya samaradorligini oshirish va issiqxona gazlari chiqindilarini kamaytirish masalasi bugungi kunda katta ahamiyat kasb etmoqda. Issiqlik elektr stansiyalari (IES) elektr energiyasiga boʻlgan talabning taxminan 38-40% ini ta'minlasa-da, ularning issiqlik samaradorligi odatda 30-42% ni tashkil etadi, ya'ni yoqilgʻi energiyasining katta qismi atrof-muhitga yoʻqotiladi [1,4]. Ushbu yoʻqotishlar ichida tutun gazlari orqali issiqlik yoʻqotilishi - qozon qurilmasidagi issiqlik yoʻqotishlarining eng muhim ahamiyatga ega tarkibiy qismi hisoblanib, yoqilgʻi energiyasining 4-8% ini tashkil etadi [2,9].

Tutun gazi harorati, masalan koʻmirli qozonlarda havo qizdirgichidan chiqayotgan paytda taxminan 150°C ga yetadi [2]. Har 10-15°C harorat kotarilishi bilan qozon samaradorligi 1% ga pasayadi va elektr stansiyadagi koʻmir sarfi 3-4 g/(kVt*s) ga oshadi [4]. Shu sababli, tutun gazi issiqligini utilizatsiya qilish eng samarali energiya tejash va karbonatli chiqindilarini kamaytirish usullaridan biriga aylangan [3, 6].

Oʻzbekistonda 2023-yilda IESlar tomonidan jami 60,75 mlrd. kVt*soat elektr energiyasi ishlab chiqarildi. 2030-yilga borib elektr energiyasiga boʻlgan talab 2 barobarga ortishi kutilmoqda. Bu esa mavjud IES larning samaradorligini keskin oshirish zaruriyatini keltirib chiqarmoqda. Oʻzbekiston Respublikasining amaldagi energiya samaradorligi dasturiy hujjatlari doirasida IES larda zamonaviy issiqlikni utilizatsiyalash texnologiyalarini joriy etish strategik ahamiyat kasb etadi.

Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi Scopus va Web of Science ma'lumotlar bazalaridagi soʻnggi ilmiy ishlarga asoslanib, tutun gazi issiqligini utilizatsiya qilishning zamonaviy texnologiyalarini tizimli tahlil qilish, ularning samaradorligi va iqtisodiy koʻrsatkichlarini baholash, hamda Oʻzbekiston IES lari uchun eng maqbul texnologik yechimlarni tavsiya etishdan iborat [5,7,8].

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

2.1. Adabiyotlar tahlili metodologiyasi

Ushbu tadqiqot 2010-2024-yillar davomida Scopus va Web of Science (WoS) ma'lumotlar bazalarida indekslangan ilmiy maqolalarni tizimli koʻrib chiqish asosida amalga oshirildi. Qidiruv soʻzlari sifatida quyidagilar qoʻllanildi: "flue gas waste heat recovery", "thermal power plant heat utilization", "organic Rankine cycle boiler", "absorption heat pump flue gas", "low-pressure economizer", "thermoelectric generator exhaust heat". Jami 400 dan ortiq maqola dastlabki bosqichda aniqlandi. PRISMA metodologiyasiga muvofiq, empirik natijalar yoki texnik-iqtisodiy tahlilni oʻz ichiga olgan 30 ta asosiy maqola tanlab olindi [8].

2.2. Texnologiyalarni baholash metodikasi

Har bir texnologiyani baholashda quyidagi koʻrsatkichlar qoʻllanildi: (1) qayta tiklanadigan issiqlik quvvati (MVt); (2) issiqlik samaradorligi (%); (3) kapital xarajatlar ($/kVt); (4) kapital xarajatlarning oʻz-oʻzini qoplash muddati (yil); (5) CO_2 tashlamalarini kamaytirish salohiyati. Iqtisodiy tahlillar uchun termodinamik va eksergetik tahlil usullari qoʻllanildi [12]. Hisob-kitoblarda Oʻzbekistondagi yirik IES lar - Sirdaryo, Toshkent, Navoiy va Talimarjon stansiyalarining texnik koʻrsatkichlari asos sifatida qabul qilindi.

2.3. Termodinamik hisoblash asoslari

Tutun gazidagi issiqlik potensialini baholash uchun energetik balans tenglamasi tuzib chiqildi:

$$Q_{tg} = m_{tg} * c_p * \left(T_{kir} - T_{chiq}\right) + m_b * r\,; \qquad (1)$$

bu yerda: Q_{tg} – tutun gazidan ajraladigan issiqlik quvvati (kVt); m_{tg} – tutun gazining massaviy sarfi (kg/s); c_p – issiqlik sigimi (kJ/(kg*K)); T_{kir} va T_{chiq} – kirish va chiqish haroratlari (°C); m_b – bugʻ oqimi (kg/s); r – bugʻning solishtirma bugʻlanish issiqligi (kJ/kg) [14, 21].

Eksergetik samaradorlik uchun:

$$\eta_{ex} = \frac{W_{f.q}}{\left[Q_{tg} * \left(1 - \frac{T_{t.h}}{T_{tg}}\right)\right]}\,; \qquad (2)$$

bu yerda: $W_{f.q}$ – foydali quvvat (kVt); $T_{t.h}$ – atrof-muhit harorati (K); T_{tg} – tutun gazi harorati (K) [12,14].

3. Natijalar (Results)

3.1. Asosiy texnologiyalarning tavsifi

Koʻrib chiqilgan adabiyotlar asosida tutun gazi issiqligini utilizatsiya qilishning quyidagi asosiy usullari aniqlandi (1-rasm) [1,2,6,9]:

1. Past bosimli ekonomayzerlar (PBE). Wang va boshq. [9] ning 1000 MVt quvvatli qattiq yoqilgʻili issiqlik elektr stansiyasida oʻtkazilgan tadqiqotida PBE ning yillik sof foydasi 2,6 mln. AQSh dollarini tashkil etib, kapital xarajatlar 1,5 yil ichida qoplanishi ta’kidlangan. Xu va boshq. [14] ning texnik-iqtisodiy tahlili shuni koʻrsatdiki, PBE yordamida tutun gazi harorati 5 °C ga pasaytirilsa, qozon qurilmasining samaradorlik koeffitsiyenti 1% ga ortadi.

2. Organik Renkin Tsikli (ORT). Kim va boshq. [3] laboratoriya miqyosida ORT tizimini sinab koʻrib, 140 °C li tutun gazidan 220 Vt qoʻshimcha elektr quvvati ishlab chiqarishga erishdi, issiqlik samaradorligi 9,4% ni tashkil etadi. Manente va boshq. [10] ORT ni termokimyoviy sorbtsion issiqlik transformatori bilan integratsiyalashtirib, bitta ORT ga nisbatan quvvat unumdorligini 12-18% ga oshirishga muvaffaq boʻldi.

3. Absorbtsion issiqlik nasosli tizimlar (AIN/OAIN). Zhang va boshq. [1] yangi ochiq absorbtsion issiqlik nasosi (OAIN) tizimini optimizatsiya qilib, yoqilgʻi sarfini 0,5-2,2% ga kamaytirdi. Li va boshq. [2] tomonidan ishlab chiqilgan nol-energiya iste'moliga ega absorbtsion issiqlik nasosli (NEAIN) tizimi yiliga 17 218 tonna shartli yoqilgʻiga ekvivalent issiqlikni tejaydi va 39 451 tonna CO_2 tashlamalarni kamaytiradi. Shahzad va boshq. [17] ikki pogʻonali OAIN ning gigroskopik FIK 1,64 ni tashkil etishini koʻrsatadi.

4. Issiqlik quvuri asosidagi issiqlik almashtirgich (IQIA). Kang va boshq. [16] tadqiqotida IQIA ning issiqlik uzatish zichligi qovurgʻalangan quvurli issiqlik almashtirgich (QQIA) ga nisbatan hajm birligi uchun 3,24 barobar yuqori ekanligi isbotlandi. IQIA issiqlikdan foydalanish darajasini 11,0% ga oshirishi, ta’minot suvi haroratini 6,9 °C ga koʻtarishi va qozon qurilmasining FIKni taxminan 1,28% ga yaxshilashi aniqlandi [16].

5. Termoelektrik generatorlar (TEG). Qozogʻiston olimlaridan iborat guruh – Kubenova va boshq. [28] – raqamli modellashtirish asosida TEG uchun uch xil qanotlar konstruksiyasini taqqosladi. "Devordan-devorgacha" qanotlar konstruksiyasi 13 590,53 Vt issiqlikdan 161 Vt elektr quvvati ishlab chiqarishda eng samarali boʻlganligi aniqlandi. Olabi va boshq. [30] TEG ning sanoat va transport sohasida chiqindi issiqlik utilizatsiyasidagi keng qoʻllanish imkoniyatlarini koʻrsatdi.

6. Keramik membrana kondensatorlari. Liang va boshq. [22] koʻmir kuli asosidagi, gʻovak oʻlchami 20 nm boʻlgan quvurli keramik membranalarini sinab koʻrildi. Membrana kondensatorlari tutun gazidan ham issiqlik, ham suv bugʻini bir vaqtning oʻzida regeneratsiyalash imkonini beradi [25]. Yang va boshq. [24] IAIN tizimida 14,18-38,9 t/soat va FIAIN tizimida 362 t/soat suv tiklanishini qayd etdi.

3.2. Texnologiyalarning qiyosiy tahlili

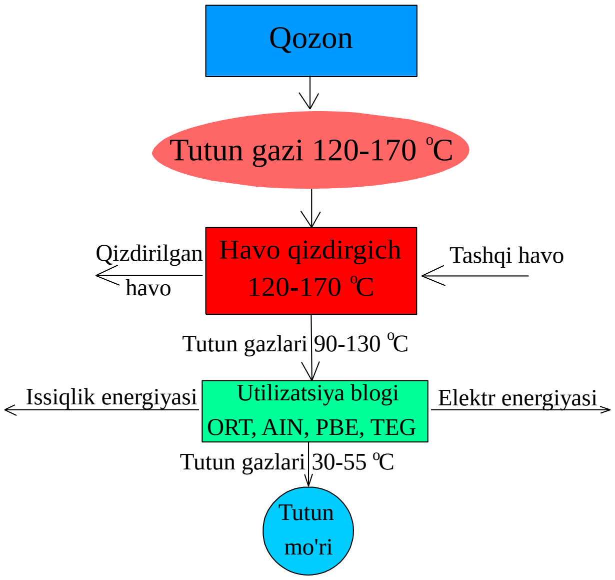
Issiqlik elektr stansiyalarida organik yoqilgʻilar yoqilishi natijasida hosil boʻladigan tutun gazlarining issiqligidan samarali foydalanish boʻyicha koʻplab tadqiqotlar oʻtkazilgan. Asosan bu tadqiqotlarda taklif qilingan texnologiyalarda talab qilinadigan parametrlarga – texnologiya samara beradigan issiqlik quvvati, erishiladigan maksimal samaradorlik, kapital xarajatlar hamda texnologiyaning oʻzini-oʻzi qoplash muddatlari kabilar kiritilgan. Tasnifiy belgilashlarga e'tibor qaratilmaganligi esa texnologiyalarning issiqlik elektr stansiyasidagi issiqlik tashlamalaridan ikkilamchi foydalanishga qaratilgan texnologiyalar hisoblanishi bilan izohlanadi.

Taklif etilgan zamonaviy texnologiyalarni bir-biriga qiyosiy tahlil qilish orqali samaradorlik koʻrsatkichlarini baholash va tanlash imkoniyatiga ega boʻlishimiz mumkin. Quyidagi 1-jadvalda tutun gazi issiqligini utilizatsiya qilishning asosiy texnologiyalari qiyosiy tahlili keltirilgan. Koʻrib chiqilgan adabiyotlar asosida toʻplangan ma'lumotlar shuni koʻrsatadiki, OAIN va AIN tizimlari eng yuqori issiqlik samaradorligini ta'minlaydi (80-95%), eng qisqa oʻzini qoplash muddatini esa toʻla ochiq absorbtsion issiqlik nasosi ta'minlaydi - 1,4 yilgacha [1,5,7].

1-jadval. IESlarida tutun gazlari issiqligini utilizatsiya qilish texnologiyalarining qiyosiy tahlili
Table 1. Comparative analysis of flue gas heat utilization technologies at TPP

Texnologiya turi	Issiqlik quvvati (MVt)	Samaradorlik (%)	Kapital xarajat ($/kVt)	Oʻz-oʻzini qoplash muddati (yil)	Manba
Past bosimli ekonomayzer (PBE)	5-25	72-85	120-180	2-4	[2, 9, 14]
Organik Renkin Tsikli (ORT)	2-15	8-12	800-1500	5-8	[3, 10, 13]
Absorbtsion issiqlik nasosi (AIN)	10-50	80-95	200-400	1.4-3	[5, 7, 11]
Issiqlik quvuri iss. almashtirgich (IQIA)	3-18	70-83	300-600	3-5	[16, 20]
Termoelektrik generator (TEG)	0,5-5	3-7	1000-3000	7-12	[28, 30]
Keramik membrana kondensatori	2-8	60-75	400-700	3-6	[22, 25]
Toʻla ochiq absorbtsion iss. nasosi (OAIN)	15-65	85-95	180-350	1,4-2,5	[1, 5, 17]

3.3. Tutun gazi issiqligini utilizatsiya qilish sxemasi



1-rasm. Issiqlik elektr stansiyasida tutun gazi issiqligini utilizatsiya qilish sxemasi
Fig 1. Scheme of flue gas heat utilization at a thermal power plant

3.4. O'zbekiston IES larida utilizatsiya potensiali

O'zbekistondagi yirik IES larni texnik tahlil qilish natijasida (2-jadval) ularning tutun gazi harorati 100-170 °C oralig'ida ekanligini aniqlandi. Sirdaryo IES kabi 3000 MVt quvvatli stansiyada 180-250 MVt issiqlik potensiali utilizatsiya qilinmasdan tashlab yuboriladi. Toshkent IES da modernizatsiya loyihalari doirasida Italiya va Xitoy sheriklarining ishtiroki bilan IES quvvati 990 MVt ga oshirilishi rejalashtirilgan bo'lib, bu yangi utilizatsiya imkoniyatlarini yaratadi.

2-jadval. O'zbekistondagi yirik IESlarning asosiy ko'rsatkichlari va tutun gazi issiqligini utilizatsiya qilish potensiali

Table 2. Main indicators of large TPPs in Uzbekistan and the potential for utilization of flue gas heat

IES nomi	Quvvat (MVt)	Yoqilg'i	Tutun gazi, T (°C)	Utilizatsiya potensiali (MVt)
Sirdaryo IES	3000	Tabiiy gaz	120-150	180-250
Toshkent IES	1860	Tabiiy gaz	130-155	110-160
Navoiy IES	2151	Tabiiy gaz	125-145	130-190
Talimarjon IES	3200	Tabiiy gaz	100-130	120-200
Angren IES	286	Ko'mir	140-170	20-35

3.5. ORT tizimida ishchi suyuqliklari tahlili

Organik Renkin Tsikli uchun ishchi jismlarni tanlash tizim samaradorligiga bevosita ta'sir qiladigan omil hisoblanadi [3,10,13]. 3-jadvalda asosiy ishchi jismlar tavsifi keltirilgan. R245fa va n-pentan qattiq yoqilg'ili IESlarda tutun gazi harorati (90-150 °C) uchun eng mos ish jismi hisoblanadi. Ekologik jihatdan R1234yf va R1234ze eng maqbul variant bo'lib, ularning global isish potensiali (GIP) ga ta'siri minimal darajada deb qaraladi [13].

3-jadval. ORC tizimida qo'llaniladigan asosiy ish jismlarining issiqlik fizik va ekologik xususiyatlari

Table 3. Thermal physical and environmental properties of the main working fluids used in the ORC system

Ishchi suyuqligi	Qaynash har-ti, T (°C)	Kritik harorat, T (°C)	OPP	GIP (100 yil)	Manba
R245fa	15.1	154.0	0	1030	[13, 29]
R134a	-26.4	101.1	0	1430	[3, 13]
R1234yf	-29.4	94.7	0	4	[13, 10]
R1234ze	-19.0	109.4	0	6	[13]
n-Pentan	36.1	196.5	0	~0	[29]

Izoh: OPP - ozon parchalash potensiali; GIP - global isish potensiali (CO_2 ga nisbatan, 100 yil uchun)

4. Muhokama (Discussion)

4.1. Texnologiyalar samaradorligini taqqoslash

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, tutun gazi issiqligini utilizatsiya qilishning turli texnologiyalari har xil sharoitlar uchun turlicha afzalliklarga ega [6,8]. Yang va boshq. [24] tomonidan taklif etilgan FIAIN (flash-issiqlik almashtirgich-issiqlik nasosi) va IAIN (issiqlik almashtirgich-issiqlik nasosi) tizimlari tahlili shuni ko'rsatdiki, IAIN tizimi FIAIN tizimiga nisbatan 16,15-25,75 MVt ko'proq past haroratli issiqlik tashlamalarini rekuperatsiyalash, 2,37 yillik o'z-o'zini qoplash muddati bilan iqtisodiy ustunlikka ega. Tizimga qozon va issiqlik almashtirgich integratsiyalashuvi eksergetik samaradorlikni 40% ga oshiradi.

Tutun gazidan issiqlik va suvni bir vaqtning o'zida utilizatsiya qilish konsepsiyasi alohida ahamiyat kasb etmoqda. 600 MVt quvvatli elektr stansiyasida 16% hajmdagi suv bug'ini o'z ichiga olgan 150 °C haroratli tutun gazini qayta ishlash orqali 4-6 MVt elektr energiyasi va 50% suv olishga erishiladi [4]. Bu esa suv resurslarining tejami jihatidan, jumladan cho'llashgan mintaqalarda joylashgan O'zbekiston IES lari uchun, alohida ahamiyatga ega.

Nyakuma [8] Scopus ma'lumotlar bazasida 2010-2022-yillar davomidagi 123 ta maqolaning bibliometrik tahlilida uch asosiy ilmiy klasterni aniqladi: (1) issiqlik energiyasidan foydalanish va boshqarish; (2) integrallashgan energiya va resurs tiklash; (3) tizimli tahlil va optimizatsiya. Bugungi kunda, Xitoy olimlarining ilmiy tadqiqotlari global miqyosda yetakchi o'rinni egallasa-da, MDH va Markaziy Osiyo mamlakatlari olimlari ham bu sohada muhim hissa qo'shmoqdalar.

4.2. Iqtisodiy va ekologik samaradorlik

Li va boshq. [2] tahlilida nol energiya sarfili absorbsion issiqlik nasos (NEAIN) tizimining dastlabki investitsiya qiymati 15,21 mln. yuan yoki 26,8 mlrd so'm bo'lganda, yillik ko'mir tejalishi, taqriban 31 mlrd so'mni tashkil etadi. Yillik 67 136 tonna suv rasurslarini tejash va 39 451 tonna CO_2 tashlamalarini qisqartirishga erishiladi. Yang va boshq. [24] tadqiqotida OAIN tizimi orqali ko'mir sarfini 36-49% ga kamaytirishga erishilgan. O‘zbekiston Sirdaryo IES kabi 3000 MVt quvvatli stansiyada bu ko‘rsatkichlarni tatbiq etish yiliga 200-350 mln. AQSh dollariga teng iqtisodiy foyda keltirishi mumkin.

Jouhara va boshq. [6] chiqindi issiqlik tiklanish texnologiyalarining keng qamrovli sharhida shuni ko‘rsatdiki, har 5 °C da qozon chiqish gazi haroratining pasayishi qozon samaradorligini 1% ga oshiradi, bu esa yoqilg‘i sarfini 5-10% ga kamaytirish imkonini beradi va qaytim muddati 2 yildan kam bo‘ladi. Shu asosda O‘zbekistondagi barcha yirik IES larida PBE o‘rnatish birgalikda yiliga 540-635 MVt issiqlik va ma’lum miqdordagi CO_2 tashlamalari tejalishiga erishish imkonini beradi.

4.3. Mamlakatimizdagi strategik yo‘nalishlar

O‘zbekiston IES larining texnik ko‘rsatkichlari (tabiiy gaz asosidagi yoqilg‘i, 100-170 °C li tutun gazi harorati) hisobga olinib, quyidagi texnologiyalar eng istiqbolli deb topildi: (1) OAIN/AIN tizimlari – eng qisqa o‘zini qoplash muddati (1,4-2,5 yil) va eng yuqori issiqlik samaradorligi (85-95%) bilan; (2) PBE - nisbatan past kapital xarajatlar (120-180 $/kVt) va ishonchli ekspluatatsiya tajribasi bilan; (3) ORT - qo‘shimcha elektr quvvati ishlab chiqarish uchun, ayniqsa 100-150 °C diapazonidagi tutun gazi uchun xos hisoblanadi.

Yangi turdagi texnologiyani tanlashda hal qiluvchi omil sifatida shudring nuqtasi haroratini hisobga olishga alohida e’tibor qaratiladi [10]. O‘zbekiston IES larida tabiiy gaz asosiy yoqilg‘i bo‘lganligi sababli, kislotali kondensatsiya xavfi nisbatan past bo‘lib, bu holatda tutun gazi haroratini (35-45 °C gacha) pasaytirish mumkin va issiqlikning katta qismini regenerasiyalash imkoni tug‘iladi.

5. Xulosa (Conclusion)

1. Absorbtsion issiqlik nasosin tizimlari (OAIN, AIN, NEAIN) tutun gazi issiqligini utilizatsiya qilishning eng samarali usuli bo‘lib, 80-95% issiqlik regeneratsiyasini va 1,4-2,5 yillik o‘zini qoplash muddatini ta'minlaydi [1,2,5,7].

2. ORT texnologiyasi tutun gazidan qo‘shimcha quvvat ishlab chiqarish uchun istiqbolli hisoblanadi, texnologiya 8-12% issiqlik samaradorligi bilan 90-150 °C oralig‘idagi past haroratli tutun gazi uchun ayniqsa mos keladi [3,10,13,29].

3. O‘zbekistondagi yirik IES larida (Sirdaryo, Toshkent, Navoiy, Talimarjon) utilizatsiya qilinmagan tutun gazlarining issiqlik potensiali 120-250 MWt ni tashkil etib, zamonaviy texnologiyalarni joriy etish yiliga sezilarli energiya va iqtisodiy foyda keltirishi mumkin.

4. Tutun gazidan issiqlik tashlamalari va suvni rekuperatsiyalash (ITSR) tizimlari O‘zbekistondek cho‘llashgan mintaqada suv tejamkorligini ta’minlash nuqtai nazaridan alohida ahamiyatga ega [4].

5. Kelajakda tadqiqotlar zanjir bo‘yicha issiqlikni rekuperatsiyalash, sun'iy intellekt asosidagi boshqaruv tizimlari va muqobil energiya manbalari bilan integratsiya yo‘nalishlarida olib borilishi maqsadga muvofiq [8,11].

ADABIYOT

1. Zhang H., Dong Y., Lai Y., Zhang H., Zhang X. Waste heat recovery from coal-fired boiler flue gas: Performance optimization of a new open absorption heat pump. //Applied Thermal Engineering. - 2021. - Vol. 183. - P. 116111. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116111 .
2. Li Z., Xue S., Hu D., Teng D., Zhang S., Shen G. Performance Analysis of an Absorption Heat Pump System for Waste Heat and Moisture Cascade Recovery from Flue Gas. // ACS Omega. - 2022. - Vol. 7. - P. 24596-24605. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02407 .
3. Kim Y.-M., Negash A., Shamsi S.S.M., Shin D.-G., Cho G. Experimental Study of a Lab-Scale Organic Rankine Cycle System for Heat and Water Recovery from Flue Gas in Thermal Power Plants. //Energies (MDPI). - 2021. - Vol. 14, No. 14. - P. 4328. https://doi.org/10.3390/en14144328 .
4. Song S., Bhattacharya R., Zhu P. Waste Heat and Water Recovery System Optimization for Flue Gas in Thermal Power Plants. //Sustainability (MDPI). - 2019. - Vol. 11, No. 7. - P. 1881. https://doi.org/10.3390/su11071881 .
5. Wang X., Zhuo J., Liu J., Li S. Thermo-economic analyses of the waste heat and water recovery system from flue gas by heat pump integrated with different heat utilization ways in coal-fired power plant. //Energy. - 2020. - Vol. 197. - P. 117253. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117253 .
6. Jouhara H., Khordehgah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S.A. Waste heat recovery technologies and applications. // Thermal Science and Engineering Progress. - 2018. - Vol. 6. - P. 268-289. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017 .
7. Teng D., Chen O., Lu G., Bi D., Zhang Q., Li L. Research on Thermodynamic Characteristics of the Saturated Flue Gas Waste Heat Recovery to Reduce Turbine Extraction Steam. // ACS Omega. - 2023. - Vol. 8, No. 49. - P. 47183-47196. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07437 .
8. Nyakuma B.B. Recovery and utilisation of waste heat from flue/exhaust gases: a bibliometric analysis (2010-2022). // Energy Reports. - 2023. - Vol. 9. - P. 5058-5070. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.032 .
9. Yang H., Li D., Li K., Wu W., Ren J. Design on a novel waste heat recovery system integrated with

the bypass flue and outside primary air preheater for bitumite-fired power plants. // Energy. - 2024. - Vol. 289. - P. 129955. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.001129 .

10. Manente G., Ding Y., Sciacovelli A. Organic Rankine cycles combined with thermochemical sorption heat transformers to enhance the power output from waste heat. // Applied Energy. - 2021. - Vol. 304. - P. 117912. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117912 .

11. Song J., Zhang H., Zhang Y., Ma Z., He M. Research progress on industrial waste heat recycling and seasonal energy storage. // AIMS Energy. - 2025. - Vol. 13, No. 1. - P. 147-187. https://doi.org/10.3934/energy.2025006 .

12. Men Y., Liu X., Zhang T. A review of boiler waste heat recovery technologies in the medium-low temperature range. //Energy. - 2021. - Vol. 237. - P. 121560. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121560 .

13. Tan Z., Feng X., Wang Y. Performance comparison of different heat pumps in low-temperature waste heat recovery. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2021. - Vol. 152. - P. 111634. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111634 .

14. Xu G., Huang S., Yang Y., Wu Y., Zhang K., Xu C. Techno-economic analysis and optimization of the heat recovery of utility boiler flue gas. // Applied Energy. - 2013. - Vol. 112. - P. 907-917. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.048 .

15. Stevanovic V.D., Maslovaric B., Prica S. Transient phenomena in steam accumulator charging and discharging processes. // Journal of Cleaner Production. - 2021. - Vol. 281. - P. 124372. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124372 .

16. Kang S., Kim K., Seo J.H., Lee J. Effective Waste Heat Recovery of Boiler Flue Gas Using a Heat Pipe Heat Exchanger: A Performance Comparison With Finned-Tube Economizer. // International Journal of Energy Research. - 2025. - Vol. 2025. - Article 8781810. https://doi.org/10.1155/er/8781810.

17. Ye B., Ding Y., Wang Z., Chen G. Experimental evaluation of a variable-stage open absorption heat pump system utilizing aqueous KCOOH solution as absorbent. // International Journal of Refrigeration. - 2023. - Vol. 148. - P. 83-95. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.12.029 .

18. Kashif Shahzad M., Ding Y., Xuan Y., Gao N., Chen G. Performance Analysis of a Novel Double Stage Multifunctional Open Absorption Heat Pump System. // Energy Conversion and Management. - 2022. - Vol. 254. - P. 115224. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115224 .

19. Bai T., Yao H., Hu B., Feng J., Jin Z. Thermodynamic analysis of exhaust waste heat recovery in a compound open absorption heat pump system. // Applied Thermal Engineering. - 2024. - Vol. 257. - P. 124387. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124387 .

20. Chen O., Lu G., Bi D., Li L. Performance Analysis of a Compound Absorption Heat Pump System for Waste Heat and Moisture Recovery from Flue Gas. // ACS Omega. - 2025. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06350 .

21. Xue Y., Zhao B., Wang S., Yin P., Wang H. Performance analysis of an open absorption heat pump and thermal desalination system for heat and water recovery of coal-fired flue gas based on zero liquid discharge. // Energy Conversion and Management. - 2022. - Vol. 273. - P. 116379. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116379 .

22. Liang D., Huang J., Zhang Y., Zhang Z., Chen H., Zhang H. Influence of dextrin content and sintering temperature on the properties of coal fly ash-based tubular ceramic membrane for flue gas moisture recovery. // Journal of the European Ceramic Society. - 2021. - Vol. 41. - P. 5696-5710. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.055 .

23. Xu Z.Y., Mao H.C., Liu D.S., Wang R.Z. Waste heat recovery of power plant with large scale serial absorption heat pumps. // Energy. - 2018. - Vol. 165. - P. 1097-1105. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.052 .

24. Yang B., Yuan W., Hou J., Zheng T. Flash-heat pump-heat exchanger (FHH) and heat exchanger-heat pump (HH) systems for flue gas heat recovery in coal-fired power plants. // Energy. - 2024. - Vol. 289. - P. 130011. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130011 .

25. Li Y., Yan M., Zhang L., Chen G., Cui L., Song Z., Chang J., Ma C. Method of flash evaporation and condensation for deep cooling of coal-fired power plant flue gas: Latent heat and water recovery. // Applied Energy. - 2016. - Vol. 172. - P. 107-117. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.017 .

26. Wei M., Zhao X., Fu L., Zhang S. Performance study and application of new coal-fired boiler flue gas heat recovery system. // Applied Energy. - 2017. - Vol. 188. - P. 121-129. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.132 .

27. Cui Z., Du Q., Gao J., Bie R. Optimum Design of a Deep Cooling Tower for Waste Heat and Water Recovery from Humid Flue Gas. // Case Studies in Thermal Engineering. - 2023. - Vol. 49. - P. 103317. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103317 .

28. Kubenova M., Kuterbekov K., Bekmyrza K., Kabyshev A., Kabdrakhimova G., Atamurotov F., Ibrahim W. Exhaust waste heat recovery system using thermoelectric generator: a prospective of novel simulation technique toward low-carbon technology. // International Journal of Low-Carbon Technologies. - 2025. - Vol. 20. - ctae249. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctae249 .

29. Guo C., Du X., Yang L., Yang Y. Organic Rankine cycle for power recovery of exhaust flue gas. //Applied Thermal Engineering. - 2015. - Vol. 75. - P. 135-144. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.042 .
30. Olabi A.G., Al-Murisi M., Maghrabie H.M., Yousef B.A.A., Sayed E.T., Alami A.H., Abdelkareem M.A. Potential applications of thermoelectric generators (TEGs) in various waste heat recovery systems. // International Journal of Thermofluids. - 2022. - Vol. 16. - P. 100249. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100249.

REFERENCES

1. Zhang H., Dong Y., Lai Y., Zhang H., Zhang X. Waste heat recovery from coal-fired boiler flue gas: Performance optimization of a new open absorption heat pump. //Applied Thermal Engineering. - 2021. - Vol. 183. - P. 116111. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116111 .

2. Li Z., Xue S., Hu D., Teng D., Zhang S., Shen G. Performance Analysis of an Absorption Heat Pump System for Waste Heat and Moisture Cascade Recovery from Flue Gas. // ACS Omega. - 2022. - Vol. 7. - P. 24596-24605. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02407 .

3. Kim Y.-M., Negash A., Shamsi S.S.M., Shin D.-G., Cho G. Experimental Study of a Lab-Scale Organic Rankine Cycle System for Heat and Water Recovery from Flue Gas in Thermal Power Plants. //Energies (MDPI). - 2021. - Vol. 14, No. 14. - P. 4328. https://doi.org/10.3390/en14144328 .

4. Song S., Bhattacharya R., Zhu P. Waste Heat and Water Recovery System Optimization for Flue Gas in Thermal Power Plants. //Sustainability (MDPI). - 2019. - Vol. 11, No. 7. - P. 1881. https://doi.org/10.3390/su11071881 .

5. Wang X., Zhuo J., Liu J., Li S. Thermo-economic analyses of the waste heat and water recovery system from flue gas by heat pump integrated with different heat utilization ways in coal-fired power plant. //Energy. - 2020. - Vol. 197. - P. 117253. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117253 .

6. Jouhara H., Khordehgah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S.A. Waste heat recovery technologies and applications. // Thermal Science and Engineering Progress. - 2018. - Vol. 6. - P. 268-289. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017 .

7. Teng D., Chen O., Lu G., Bi D., Zhang Q., Li L. Research on Thermodynamic Characteristics of the Saturated Flue Gas Waste Heat Recovery to Reduce Turbine Extraction Steam. // ACS Omega. - 2023. - Vol. 8, No. 49. - P. 47183-47196. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07437 .

8. Nyakuma B.B. Recovery and utilisation of waste heat from flue/exhaust gases: a bibliometric analysis (2010-2022). // Energy Reports. - 2023. - Vol. 9. - P. 5058-5070. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.032 .

9. Yang H., Li D., Li K., Wu W., Ren J. Design on a novel waste heat recovery system integrated with the bypass flue and outside primary air preheater for bitumite-fired power plants. // Energy. - 2024. - Vol. 289. - P. 129955. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.001129 .

10. Manente G., Ding Y., Sciacovelli A. Organic Rankine cycles combined with thermochemical sorption heat transformers to enhance the power output from waste heat. // Applied Energy. - 2021. - Vol. 304. - P. 117912. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117912 .

11. Song J., Zhang H., Zhang Y., Ma Z., He M. Research progress on industrial waste heat recycling and seasonal energy storage. // AIMS Energy. - 2025. - Vol. 13, No. 1. - P. 147-187. https://doi.org/10.3934/energy.2025006 .

12. Men Y., Liu X., Zhang T. A review of boiler waste heat recovery technologies in the medium-low temperature range. //Energy. - 2021. - Vol. 237. - P. 121560. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121560 .

13. Tan Z., Feng X., Wang Y. Performance comparison of different heat pumps in low-temperature waste heat recovery. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2021. - Vol. 152. - P. 111634. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111634 .

14. Xu G., Huang S., Yang Y., Wu Y., Zhang K., Xu C. Techno-economic analysis and optimization of the heat recovery of utility boiler flue gas. // Applied Energy. - 2013. - Vol. 112. - P. 907-917. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.048 .

15. Stevanovic V.D., Maslovaric B., Prica S. Transient phenomena in steam accumulator charging and discharging processes. // Journal of Cleaner Production. - 2021. - Vol. 281. - P. 124372. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124372 .

16. Kang S., Kim K., Seo J.H., Lee J. Effective Waste Heat Recovery of Boiler Flue Gas Using a Heat Pipe Heat Exchanger: A Performance Comparison With Finned-Tube Economizer. // International Journal of Energy Research. - 2025. - Vol. 2025. - Article 8781810. https://doi.org/10.1155/er/8781810.

17. Ye B., Ding Y., Wang Z., Chen G. Experimental evaluation of a variable-stage open absorption heat pump system utilizing aqueous KCOOH solution as absorbent. // International Journal of Refrigeration. - 2023. - Vol. 148. - P. 83-95. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.12.029 .

18. Kashif Shahzad M., Ding Y., Xuan Y., Gao N., Chen G. Performance Analysis of a Novel Double Stage Multifunctional Open Absorption Heat Pump System. // Energy Conversion and Management.

- 2022. - Vol. 254. - P. 115224. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115224 .

19. Bai T., Yao H., Hu B., Feng J., Jin Z. Thermodynamic analysis of exhaust waste heat recovery in a compound open absorption heat pump system. // Applied Thermal Engineering. - 2024. - Vol. 257. - P. 124387. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124387 .

20. Chen O., Lu G., Bi D., Li L. Performance Analysis of a Compound Absorption Heat Pump System for Waste Heat and Moisture Recovery from Flue Gas. // ACS Omega. - 2025. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06350 .

21. Xue Y., Zhao B., Wang S., Yin P., Wang H. Performance analysis of an open absorption heat pump and thermal desalination system for heat and water recovery of coal-fired flue gas based on zero liquid discharge. // Energy Conversion and Management. - 2022. - Vol. 273. - P. 116379. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116379 .

22. Liang D., Huang J., Zhang Y., Zhang Z., Chen H., Zhang H. Influence of dextrin content and sintering temperature on the properties of coal fly ash-based tubular ceramic membrane for flue gas moisture recovery. // Journal of the European Ceramic Society. - 2021. - Vol. 41. - P. 5696-5710. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.055 .

23. Xu Z.Y., Mao H.C., Liu D.S., Wang R.Z. Waste heat recovery of power plant with large scale serial absorption heat pumps. // Energy. - 2018. - Vol. 165. - P. 1097-1105. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.052 .

24. Yang B., Yuan W., Hou J., Zheng T. Flash-heat pump-heat exchanger (FHH) and heat exchanger-heat pump (HH) systems for flue gas heat recovery in coal-fired power plants. // Energy. - 2024. - Vol. 289. - P. 130011. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130011 .

25. Li Y., Yan M., Zhang L., Chen G., Cui L., Song Z., Chang J., Ma C. Method of flash evaporation and condensation for deep cooling of coal-fired power plant flue gas: Latent heat and water recovery. // Applied Energy. - 2016. - Vol. 172. - P. 107-117. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.017 .

26. Wei M., Zhao X., Fu L., Zhang S. Performance study and application of new coal-fired boiler flue gas heat recovery system. // Applied Energy. - 2017. - Vol. 188. - P. 121-129. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.132 .

27. Cui Z., Du Q., Gao J., Bie R. Optimum Design of a Deep Cooling Tower for Waste Heat and Water Recovery from Humid Flue Gas. // Case Studies in Thermal Engineering. - 2023. - Vol. 49. - P. 103317. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103317.

28. Kubenova M., Kuterbekov K., Bekmyrza K., Kabyshev A., Kabdrakhimova G., Atamurotov F., Ibrahim W. Exhaust waste heat recovery system using thermoelectric generator: a prospective of novel simulation technique toward low-carbon technology. // International Journal of Low-Carbon Technologies. - 2025. - Vol. 20. - ctae249. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctae249,

29. Guo C., Du X., Yang L., Yang Y. Organic Rankine cycle for power recovery of exhaust flue gas. //Applied Thermal Engineering. - 2015. - Vol. 75. - P. 135-144. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.042.

30. Olabi A.G., Al-Murisi M., Maghrabie H.M., Yousef B.A.A., Sayed E.T., Alami A.H., Abdelkareem M.A. Potential applications of thermoelectric generators (TEGs) in various waste heat recovery systems. // International Journal of Thermofluids. - 2022. - Vol. 16. - P. 100249. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100249 .