

УДК 621.564:621.785.92(575.2)(043.3)

Алимгазин Алтай Шурумбаевич¹,
Академик, доктор технических наук, профессор
Шопаева Айман Амановна¹,
PhD докторант
Абдуллаева Майрам Дукуевна²,
доктор технических наук, профессор
Сулейменов Канат Балтабаевич³,
инженер

**ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОГО ТЕПЛА ГРЭС В КОММУНАЛЬНУЮ
ИНФРАСТРУКТУРУ: КЕЙС ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ МИКРОРАЙОНА «УСОЛЬСКИЙ»
Г. ПАВЛОДАР С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ**

Алимгазин Алтай Шурумбаевич¹,
Академик, доктор технических наук, профессор
Шопаева Айман Амановна¹,
PhD докторант
Абдуллаева Майрам Дукуевна²,
доктор технических наук, профессор
Сулейменов Канат Балтабаевич³,
инженер

**ЖЫЛУУЛУК ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНЫН ЭКИНЧИ ДАРАЖАДАГЫ ЖЫЛУУЛУГУН
КОММУНАЛДЫК ИНФРАСТРУКТУРАГА ИНТЕГРАЦИЯЛОО: ПАВЛОДАР ШААРЫНДАГЫ
“УСОЛЬСКИЙ” МИКРОРАЙОНУНУН ЫСЫК СУУ МЕНЕН КАМСЫЗДОО МИСАЛЫ
(ЖЫЛУУЛУК НАСОСТОРУН КОЛДОНУУ АРКЫЛУУ)**

Alimgazin Altay Shurumbaev¹,
The Academician, Doctor of Technical Sciences, Professor
Shopaeva Aiman Amanovna¹,
PhD doctoral student
Abdullayeva Mairam Dukuyevna²,
Doctor of Technical Sciences, Professor
Kanat Baltabaevich Suleimenov³
Engineer

**INTEGRATION OF WASTE HEAT RECOVERY SYSTEMS OF THERMAL POWER PLANTS
INTO URBAN INFRASTRUCTURE: CASE STUDY OF HOT WATER SUPPLY F
OR THE “USOLSKY” DISTRICT OF PAVLODAR USING HEAT PUMPS**

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева (ЕНУ), Астана,
Республика Казахстан

²Институт природных ресурсов им. А.С. Джаманбаева ЮО НАН КР ПКР, Ош,
Кыргызская Республика

³ТОО «IT&HP-EcoQuat», Астана, Республика Казахстан

¹Л.Н. Гумилев ат. Евразия улуттук университети (ЕУУ), Астана, Казахстан Республикасы

²КРП КР УИА ТБнүн А.С. Джаманбаев ат. Жаратылыш байлыктары институту,
Ош, Кыргыз Республикасы

³«IT&HP-EcoQuat» ЖЧК, Астана, Казахстан Республикасы

¹*The Eurasian National University named after L.N. Gumilyov (ENU,
Astana, Republic of Kazakhstan*

²*The Institute of Natural Resources named after A.S. Dzhamanbaev of the SB NAN KR PKR,
Osh, Kyrgyz Republic*

³*LLP «IT&HP-EcoQuat», Astana, Republic of Kazakhstan*

Аннотация. Данное исследование посвящено анализу возможности использования низкопотенциальной теплоты охлаждающей воды Аксуской ГРЭС для обеспечения горячего водоснабжения (ГВС) микрорайона «Усольский» города Павлодар. В работе приведены результаты термодинамического и технико-экономического анализа системы на основе тепловых насосов типа «вода–вода» Mammoth MCRH-0140, использующих энергию сбросного тепла реки Иртыш. Показано, что применение ТН с коэффициентом преобразования $COP \approx 3,6$ позволяет существенно сократить удельное потребление топлива на выработку тепловой энергии и уменьшить выбросы углекислого газа более чем на 2500 т в год. Представлены основные параметры проектируемой теплонасосной станции (ТНС), расчетные данные по энергопотреблению, экономическому эффекту и сроку окупаемости (около 5,9 лет). Внедрение предложенной схемы демонстрирует высокий потенциал интеграции низкопотенциальных источников в городскую тепловую инфраструктуру и может служить пилотным примером перехода к теплоснабжению четвертого и пятого поколений (4GDH/5GDHC) в Казахстане.

Ключевые слова: сбросное тепло, тепловой насос, ГРЭС, ГВС, энергоэффективность.

Аннотация. Бул изилдөө Аксу жылуулук электр станциясынын муздаткыч суусунун төмөн потенциалдуу жылуулугун Павлодар шаарынын “Усольский” микрорайонунун ысык суу менен камсыздоосуна пайдалануу мүмкүнчүлүгүн талдоого арналган. Иште “суу–суу” тибиндеги Mammoth MCRH-0140 жылуулук насостору негизиндеги системанын термодинамикалык жана техникалык-экономикалык анализинин натыйжалары келтирилген. Изилдөө көрсөткөндөй, жылуулук насосторунун натыйжалуулук коэффициенти ($COP \approx 3,6$) жылуулук энергиясын өндүрүүдө отундун менчик сарпталышын кыйла кыскартууга жана көмүр кычкыл газынын жылдык бөлүнүп чыгышын 2500 тоннадан ашыкка азайтууга мүмкүндүк берет. Ошондой эле долбоорлонгон жылуулук насос станциясынын (ЖНС) негизги параметрлери, энергия керектөөсүнүн эсептик көрсөткүчтөрү, экономикалык натыйжа жана өзүн-өзү актоо мөөнөтү (болжол менен 5,9 жыл) көрсөтүлгөн. Сунушталган схема төмөн потенциалдуу булактарды шаардык жылуулук инфраструктурасына интеграциялоонун жогорку мүмкүнчүлүгүн көрсөтүп, Казакстанда төртүнчү жана бешинчи муундагы жылуулук менен камсыздоо системаларына (4GDH/5GDHC) өтүүнүн пилоттук үлгүсү боло алат.

Негизги сөздөр: экинчи даражадагы жылуулук, жылуулук насосу, ЖЭС, ысык суу менен камсыздоо, энергия натыйжалуулугу.

Abstract. This study analyzes the feasibility of utilizing the low-grade heat of cooling water from the Aksu Thermal Power Plant (TPP) to provide domestic hot water (DHW) for the “Usolsky” district of Pavlodar. The paper presents the results of thermodynamic and techno-economic analyses of a heat pump system of the *water-to-water* type (Mammoth MCRH-0140), which uses the waste heat of the Irtysh River. It is shown that the use of heat pumps with a coefficient of performance ($COP \approx 3.6$) significantly reduces the specific fuel consumption for thermal energy generation and decreases carbon dioxide emissions by more than 2,500 tons per year. The main design parameters of the projected heat pump station (HPS), calculated energy consumption, economic performance, and pay-back period (approximately 5.9 years) are presented. The implementation of the proposed scheme demonstrates a high potential for integrating low-grade heat sources into urban thermal infrastructure and can serve as a pilot model for the transition to fourth- and fifth-generation district heating systems (4GDH/5GDHC) in Kazakhstan.

Keywords: waste heat, heat pump, TPP, DHW, energy efficiency.

Введение

Переход к низкоуглеродному развитию энергетики требует активного внедрения технологий утилизации вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов. Одним из наиболее значимых резервов повышения энергоэффективности является использование сбросного тепла тепловых электростанций (ГРЭС и ТЭЦ), которое в настоящее время во многих странах рассеивается в окружающую среду, создавая тепловое загрязнение. Потенциал интеграции сбросного тепла в централизованные системы теплоснабжения (ЦТ) достигает до 25–30 % общего теплового потока, что открывает возможности для значительного сокращения топливных затрат и выбросов парниковых газов [1]. Системы теплоснабжения четвертого поколения (4GDH) способны эффективно использовать низкопотенциальное тепло промышленных предприятий, электростанций и сточных вод при температурных уровнях 30–60 °С [2]. Переход к 5GDH предполагает [3] децентрализацию теплосетей и использование возобновляемых источников в сочетании с крупными тепловыми насосами (ТН).

В условиях Казахстана вопрос повышения энергоэффективности имеет особую актуальность, поскольку свыше 70 % выработки электроэнергии и тепла осуществляется на угольных станциях. Потенциал использования сбросного тепла ГРЭС для нужд горячего водоснабжения (ГВС) остается значительным, особенно в северных регионах страны, где наблюдаются высокие тепловые потери в сетях и низкая температура наружного воздуха в течение большей части года. Применение крупных тепловых насосов типа «вода–вода» позволяет эффективно извлекать энергию из охлаждающей воды конденсаторов турбин электростанций [4, 5]. Анализ [6] подтверждает, что использование низкопотенциальных источников тепла может стать важным элементом перехода к низкоуглеродной экономике, особенно при модернизации существующих теплосетей.

Примером практической реализации подобных подходов в Казахстане является разработка проектов интеграции сбросного тепла на базе действующих ГРЭС в сочетании с тепловыми насосными станциями. Применение систем на основе ТН для теплоснабже-

ния городских районов в Казахстане может сократить углеродный след до 40 % [9]. При этом низкопотенциальные источники — такие как сбросное тепло конденсаторов и охлаждающих водоемов — представляют собой стабильный и возобновляемый ресурс, доступный круглый год.

Таким образом, использование сбросного тепла тепловых электростанций с применением тепловых насосов является одним из наиболее перспективных направлений развития энергоэффективных технологий теплоснабжения в Казахстане. Целью данного исследования является технико-экономическое обоснование интеграции тепловых насосов для горячего водоснабжения микрорайона «Усольский» города Павлодар с использованием низкопотенциального тепла Аксуской ГРЭС.

Методика исследования

Объектом исследования является система горячего водоснабжения (ГВС) микрорайона «Усольский» города Павлодар. Источником низкопотенциального тепла выбрана сбросная вода Аксуской ГРЭС, температура которой изменяется в диапазоне от 10 до 25 °С в зависимости от сезона. В основу проектных решений положен принцип утилизации сбросного тепла посредством тепловых насосов (ТН) типа «вода–вода» Mammoth MCRH-0140, предназначенных для нагрева сетевой воды до температуры 60 °С.

Схема установки тепловых насосов

В качестве источника теплоты рассматривается охлаждающая вода конденсаторов турбин Аксуской ГРЭС, сбрасываемая в реку Иртыш. Для ее отбора проектом предусмотрен береговой водозабор, оснащенный фильтрующими кожухами и насосной станцией (см. рис. 1).

Предлагаемая схема внедрения тепловых насосов предусматривает использование низкопотенциального тепла поверхностных вод реки Иртыш в районе впадения реки Усолка.

Водозабор осуществляется с правого берега реки Иртыш в устьевой зоне реки Усолка. По дну реки прокладывается напорный трубопровод соответствующего диаметра, выполненный из коррозионно-стойкого материала и снабженный теплоизоляцией для минимизации теплопотерь. Через систему

патрубков с фильтрующими кожухами, предотвращающими попадание механических примесей в оборудование, осуществляется отбор воды в объёме не менее 192–220 м³/ч. Необходимый расход и напор обеспечивают гидравлическими насосными агрегатами, работающими в непрерывном режиме.

Группа (батарея) тепловых насосов типа MCRH 0140 устанавливается на центральном тепловом пункте (ЦТП) микрорайона Усольский. Оборудование размещается в модуль-

ных контейнерах БМТУ, обеспечивающих защиту и удобство обслуживания. Электропитание агрегатов осуществляется от комплектной трансформаторной подстанции (КТП) с номинальным напряжением 0,4 кВ.

Полученная после тепловых насосов вода с температурой 55–60 °С направляется в существующую сеть централизованного теплоснабжения микрорайона Усольский через ЦТП, обеспечивая покрытие тепловых нагрузок отопления и горячего водоснабжения потребителей.

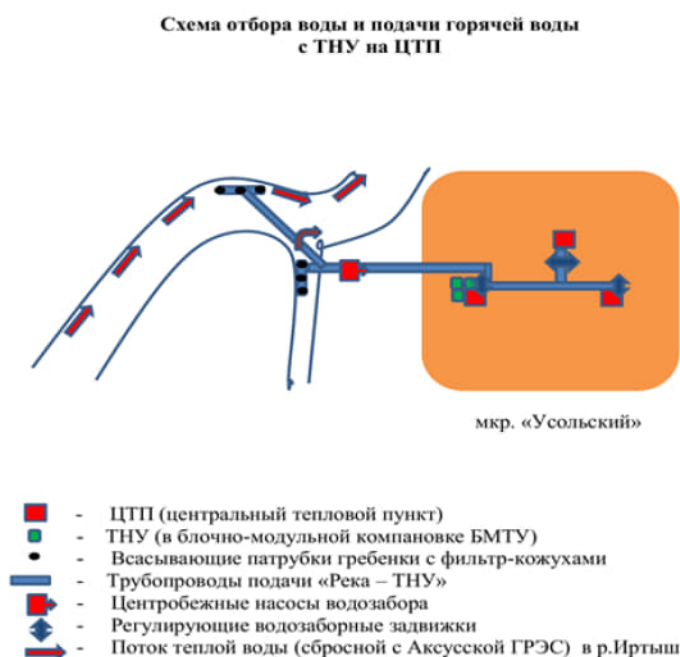


Рис. 1. Схема подключения тепловых насосов к ЦТП.

Расчет энергетической эффективности

Тепловые насосы работают по циклу Карно, обеспечивая перенос тепла от низкопотенциального источника к потребителю с минимальными энергетическими затратами. Энергетическая эффективность установки характеризуется коэффициентом преобразования (COP), определяемым выражением:

$$COP = \frac{Q_{\text{наг}}}{W_{\text{эл}}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{наг}}$ — тепловая мощность на выходе из конденсатора, кВт;

$W_{\text{эл}}$ — потребляемая электрическая мощность компрессора, кВт.

Для тепловых насосов «вода–вода» в диапазоне температур 10–25 °С на входе и 55–60 °С на выходе COP составляет 3,4–3,8 [7]. Это означает, что на каждый киловатт потребляемой электроэнергии установка вырабатывает около 3,6 кВт тепловой энергии.

Расчеты выполнены с использованием методик, представленных в [7], [8] и [9], с учетом климатических характеристик региона, температуры воды в реке Иртыш и тарифов ТОО «Павлодарские тепловые сети». Приняты следующие параметры:

- тепловая нагрузка системы ГВС — 1,5 Гкал/ч (≈ 1745 кВт);
- средняя продолжительность работы оборудования — 8760 ч/год;
- температура источника — 15 °C;
- температура нагрева — 60 °C;
- COP = 3,6;
- срок службы оборудования — 25 лет.

Энергоэкономическая эффективность системы оценивается по трем основным показателям:

Годовая выработка тепла ($Q_{\text{год}}$) — определяется выражением:

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{час}} \times 8760$$

(2)

где $Q_{\text{час}}$ — часовая тепловая нагрузка, Гкал/ч.

Годовой экономический эффект ($\mathcal{E}$) — разница между затратами на традиционное и альтернативное теплоснабжение:

$$\mathcal{E} = \mathcal{Z}_{\text{баз}} - \mathcal{Z}_{\text{ТН}}$$

(3)

где $\mathcal{Z}_{\text{баз}}$ — расходы при традиционном теплоснабжении;

$\mathcal{Z}_{\text{ТН}}$ — эксплуатационные затраты при использовании ТН.

Срок окупаемости (T) — определяется по формуле:

$$T = \frac{K}{\mathcal{E}}$$

(4)

где K — капитальные затраты на реализацию проекта, тг.

Для комплексной оценки эффективности дополнительно использована эксергетическая эффективность (η_{ex}), отражающая степень использования потенциала низко-температурного источника:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{COP_{\text{реал}}}{COP_{\text{Карно}}} \times 100\%$$

(5)

где $COP_{\text{Карно}} = \frac{T_{\text{г}}}{T_{\text{г}} - T_{\text{х}}}$, а температуры выражены в Кельвинах. При заданных параметрах $T_{\text{г}} = 333 \text{ K}$ и $T_{\text{х}} = 288 \text{ K}$, $COP_{\text{Карно}} = 7.4$,

следовательно $\eta_{\text{ex}} \approx 48\%$, что соответствует типичным показателям для систем данного класса [8].

Преимущества систем с использованием тепловых насосов Mammoth:

- система не требует обязательного отдельно стоящего здания или сооружения;
- система – реверсивная, что позволяет вырабатывать холодильную и тепловую энергию в зависимости от сезона года одним агрегатом;
- обладают высокой степенью энергосбережения, энергоэффективности, установки типа «вода-вода» на 1 кВт потреблённой электроэнергии вырабатывает более 5 кВт холодильной или тепловой энергии;
- может включать функцию рекуперации, когда при работе в режиме кондиционирования выполняется утилизация тепла на подогрев воды для ГВС и других целей;
- при абсолютной экологичности (нет шума, вибрации, запахов, открытого огня) обладает высокой степенью пожара-взрывобезопасности, т.к. нет процессов горения топлива и выбросов продуктов сгорания;
- не требует прокладки топливных (газовых) магистралей и систем дымоудаления и соответствующих затрат;
- имеет высокую надёжность (в основе работы лежит цикл холодильной машины и её характерные агрегаты), ресурс не менее 15-ти лет.

Результаты и анализ

Для покрытия тепловой нагрузки ГВС в 1,5 Гкал/ч (≈ 1745 кВт) выбраны три тепловых насоса Mammoth MCRH-0140, каждый из которых имеет номинальную тепловую мощность 600 кВт. Годовая выработка тепла при непрерывной эксплуатации составляет:

$$Q_{\text{год}} = 1.5 \times 8760 = 13\,140 \text{ Гкал/год}$$

(6)

Потребляемая электроэнергия, исходя из $\text{COP} = 3.6$, равна 485 кВт, что составляет 13–14% от традиционных энергозатрат на подогрев воды котельными установками.

Годовой экономический эффект рассчитывается как разница между эксплуатационными расходами традиционной системы и затратами при использовании ТН:

$$\mathcal{E} = 53\,478\,800 - 21\,024\,000 = 32\,454\,800 \text{ тт/год}$$

(7)

При капитальных вложениях 193 629 600 тг срок окупаемости проекта составил:

$$T = \frac{193\,629\,600}{32\,454\,800} = 5.9 \text{ лет}$$

(8)

Результаты анализа свидетельствуют о высокой энергетической и экономической эффективности предлагаемого решения. Применение тепловых насосов позволяет сократить потребление топлива на 30–35 %, а также уменьшить выбросы углекислого газа на 2500–3000 т/год. Это согласуется с результатами исследований [4] и [5], показавших аналогичный уровень сокращения выбросов при утилизации тепла конденсаторов на электростанциях Китая и Европы.

Дополнительно отмечено, что применение теплонаносных систем обеспечивает повышение устойчивости теплоснабжения, поскольку источником энергии выступает возобновляемый и практически неограниченный поток охлаждающей воды. Анализ чувствительности показал, что при росте тарифов на электроэнергию до 15 % эффективность проекта сохраняется, а срок окупаемости увеличивается не более чем на 0,6 года.

Результаты исследования подтверждают возможность масштабирования предложенной схемы для других городов Казахстана с аналогичными климатическими и инфраструктурными условиями. В частности, по данным [8], аналогичные системы успешно функционируют в Швеции, Дании и Германии, где доля утилизации низкопотенциального тепла в ЦТ достигает 15–25 %.

Таким образом, интеграция тепловых насосов на базе сбросного тепла ГРЭС обеспечи-

вает не только экономию энергетических ресурсов, но и формирует основу для перехода к низкоуглеродной модели теплоснабжения в соответствии с принципами 4GDH/5GDHC.

Обсуждение

Интеграция тепловых насосов в коммунальную инфраструктуру открывает новые возможности для перехода к системам теплоснабжения четвертого и пятого поколений (4GDH/5GDHC), основанных на низкотемпературных тепловых сетях, интеллектуальном управлении и гибридных схемах генерации [1]. Основная идея заключается в совместном использовании различных источников тепла — сбросного, геотермального, солнечного и промышленного — в единой цифровой управляемой системе, обеспечивающей минимальные потери и высокую надежность.

В условиях г. Павлодара применение сбросного тепла Аксуской ГРЭС демонстрирует техническую реализуемость концепции низкопотенциального теплоснабжения и ее высокую эффективность для существующей инфраструктуры. Сбросное тепло является стабильным источником энергии, который может использоваться в течение всего года, что особенно важно для регионов с резко континентальным климатом и продолжительным отопительным сезоном.

Результаты моделирования и расчетов показывают, что внедрение тепловых насосов позволяет снизить потребление угля и природного газа на тепловых электростанциях, а также сократить выбросы CO_2 на 20–30 % по сравнению с традиционными котельными установками. Подобные показатели соответствуют данным, полученным в исследованиях [1] и [8], где отмечено, что внедрение крупных тепловых насосов в систему ЦТ способствует значительному снижению углеродного следа.

Кроме того, применение тепловых насосов создает предпосылки для децентрализации системы теплоснабжения и интеграции в «умные» сети (smart grids), что повышает надежность и устойчивость энергоснабжения [2]. В странах Северной Европы — Дании, Швеции и Финляндии — подобные технологии уже широко используются и доказали свою эффективность с точки зрения экономии топлива, экологической устойчивости и управления нагрузками [8].

Таким образом, опыт Павлодара может служить пилотным примером для других регионов Казахстана, демонстрируя, что переход к низкопотенциальным системам теплоснабжения с тепловыми насосами возможен не только в странах с развитой инфраструктурой, но и в условиях постсоветских тепловых сетей при правильной инженерной интеграции и государственной поддержке [10].

Выводы

Проведенное исследование подтвердило техническую и экономическую целесообразность использования сбросного тепла Аксуской ГРЭС для нужд горячего водоснабжения микрорайона «Усольский» города Павлодар. Результаты расчетов и анализа показали, что применение тепловых насосов типа «вода–вода» (3×MCRH-0140) с коэффициентом преобразования COP $\approx 3,6$ обеспечивает устойчивое покрытие тепловой нагрузки при минимальном энергопотреблении. Годовая выработка тепла составляет около 13 140 Гкал, а срок окупаемости

проекта — порядка шести лет, что соответствует показателям энергоэффективных систем теплоснабжения четвертого поколения (4GDH).

Внедрение такой схемы позволяет снизить расход традиционного топлива на 30–35 %, уменьшить выбросы углекислого газа на 2500–3000 т в год и повысить надежность горячего водоснабжения потребителей за счет децентрализации теплогенерации. Полученные результаты подтверждают, что использование низкопотенциальных источников энергии — одно из наиболее перспективных направлений модернизации теплоснабжения в Казахстане.

Предложенный подход может быть масштабирован и адаптирован для других населенных пунктов страны, особенно в регионах с развитой энергетической инфраструктурой и доступом к сбросным тепловым потокам. Реализация подобных проектов будет способствовать достижению целей национальной стратегии [11] низкоуглеродного развития Республики Казахстан до 2060 года.

Список литературы:

1. Alimgazin A.S., Alimgazina S. G., Zhumagulov M. G. Heat pump in a new modular configuration to recover low-grade heat emissions at enterprises// E3S Web of Conferences 178, 01003 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801003> HSTED-2020.
2. Lund H., Østergaard P.A., Nielsen T.B., et al. Perspectives on Fourth and Fifth Generation District Heating. Energy, 2021;227:120520. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120520.
3. IEA. The Future of Heat Pumps. Paris: International Energy Agency, 2022. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>
4. 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;165:1097–1105. DOI: 10.1016/j.energy.2018.10.052.
5. Алимгазин А.Ш., Яворовский Ю.В., Султангузин И.А., Бартенев А.И., Прищепова С.А., Трушин Е.С. Повышение энергетической и экологической эффективности теплоэлектроцентрали на основе применения абсорбционных трансформаторов теплоты// Вестник МЭИ, 2020, №4, С.89-97.
6. Pakere I., Rochas C., Porubova J., et al. Valorisation of Waste Heat in Existing and Future District Heating Systems. Energies, 2023; 16(19):6796. DOI: 10.3390/en16196796.
7. Bühler F., et al. Spatiotemporal and economic analysis of industrial excess heat integration into district heating. Energy, 2018; 151:464–476. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.076.
8. Schmidt D., et al. Low temperature district heating for future energy systems. Energy Procedia, 2017;116:26–38. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.055.
9. Bartolini A., et al. Decarbonizing the heating supply of an urban district in Kazakhstan. E3S Web of Conferences, 2021. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/35/e3sconf_efe2021_01020/e3sconf_efe2021_01020.html.
10. Алимгазин А.Ш., Бергузинов А.Н., Султангузин И.А., Серкпаев М.О., Ахметова И.Г., Жакишев Б.А. Перспективы применения технологий трансформации теплоты для декарбонизации углеродной экономики Республики Казахстан. // Вестник НАО «Торайгыров Университета», серия «Энергетическая», №2, 2022 г., с.21-33
11. Министерство энергетики Республики Казахстан. Стратегия низкоуглеродного развития до 2060 года. Указ Президента РК №121, 2023.