Оригинальная статья

УДК 622.277 © Р.В. Клюев✉, 2026

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»,
107023, г. Москва, Россия
✉ e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Original Paper

UDC 622.277 © R.V. Klyuev✉, 2026

Moscow Polytechnic University,
Moscow, 107023, Russian Federation
✉ e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Повышение энергоэффективности угольных теплоэлектроцентралей за счет интеграции тепловых насосов в систему вакуумной деаэрации

Improving the energy efficiency of coal-fired combined heat and power plants by integrating heat pumps into a vacuum deaeration system

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-1-17-20

Статья посвящена актуальной проблеме повышения энергетической и экономической эффективности угольных теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), которые составляют основу энергокомплекса многих регионов России. Высокая доля топливной составляющей в себестоимости энергии, а также растущие экологические требования делают внедрение энергосберегающих технологий ключевым фактором развития угольной генерации. В качестве решения предложена и обоснована новая технологическая схема с интеграцией теплового насоса. Приводятся результаты расчета энергетической эффективности, показывающие, что применение разработанного решения для ТЭЦ с расходом подпиточной воды 1000 м³/ч позволяет достичь годовой экономии условного топлива около 6960 т. Срок окупаемости проекта составляет 7 месяцев. Делается вывод о высокой эффективности и целесообразности широкого внедрения предложенной технологии на угольных ТЭЦ и в крупных котельных для снижения расхода топлива, выбросов парниковых газов и повышения экономической устойчивости.

Ключевые слова: *угольные ТЭЦ, энергоэффективность, тепловой насос, вакуумная деаэрация, подпиточная вода, греющий агент, экономия топлива, снижение выбросов, угольная генерация.*

Для цитирования: Клюев Р.В. Повышение энергоэффективности угольных теплоэлектроцентралей за счет интеграции тепловых насосов в систему вакуумной деаэрации // Уголь. 2026;(1):17-20. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-1-17-20.

Abstract

The article is devoted to the urgent problem of increasing the energy and economic efficiency of coal-fired combined heat and power plants (HPP), which form the basis of the energy complex of many regions of Russia. The high share of the fuel component in the cost of energy, as well as growing environmental requirements, make the introduction of energy-saving technologies a key factor in the development of coal generation. As a solution, a new process flow diagram with the integration

КЛЮЕВ Р.В.
Доктор техн. наук, профессор кафедры «Автоматика и управление», ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 107023, г. Москва, Россия, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

of a heat pump is proposed and substantiated. The results of energy efficiency calculations are presented, showing that the use of the developed solution for a HPP with a make-up water flow rate of 1000 m³/h allows achieving annual savings of about 6960 tons of equivalent fuel. The payback period of the project is 7 months. The conclusion is made about the high efficiency and feasibility of the widespread implementation of the proposed technology at coal-fired thermal power plants and large boiler houses to reduce fuel consumption, greenhouse gas emissions and increase economic sustainability.

Keywords

Coal fired power plants, energy efficiency, heat pump, vacuum deaeration, make-up water, heating agent, fuel economy, emission reduction, coal generation.

For citation

Klyuev R.V. Improving the energy efficiency of coal-fired combined heat and power plants by integrating heat pumps into a vacuum deaeration system. *Ugol'*. 2026;(1):17-20. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-1-17-20.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности применения топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) является одной из ключевых задач в энергетике. Особую важность это приобретает для угольных теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), где оптимизация расхода угля как основного топлива напрямую влияет на экономические показатели [1, 2]. Снижение издержек на производство энергии позволяет не только усилить конкурентоспособность промышленных районов России за счет уменьшения затрат энергоемких предприятий, но и приводит к снижению тарифов на коммунальные услуги, такие как водоснабжение [3]. Поскольку угольные ТЭС составляют энергетическую основу многих регионов России, решение этой проблемы для них особенно значимо. Рентабельность их работы сильно зависит от стоимости топлива, а ужесточение экологических стандартов вынуждает искать новые пути развития [4, 5]. Таким образом, внедрение энергосберегающих технологий становится ключевым способом повысить одновременно и экономическую, и экологическую эффективность. Существующие стратегии повышения экономической эффективности применения ТЭР, как правило, фокусируются на одном из трех направлений: оптимизация сырья через механохимическую активацию [6], цифровая трансформация энергетических процессов [7] или замещение традиционных источников альтернативными (к примеру, метаном) [8]. Высокий КПД демонстрирует метод интеграции в работу ТЭЦ тепловых насосов (*рис. 1*).

АНАЛИЗ РАБОТЫ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

На представленной схеме (*см. рис. 1*) обозначены следующие ключевые элементы системы теплового насоса: узел сжатия и циркуляции: позиция *1* – компрессор; контуры теплообмена: низкотемпературный контур (источник): позиция *2* – источник низкопотенциального тепла (ИНТ), в низкотемпературном контуре элемент под номером *6* представляет собой теплообменник. Высокотемпературный контур, обслуживающий потребителей, включает: элемент *5* – приемник тепловой энергии (ПТЭ) и элемент *8* – теплообменник высокотемпературного контура. Основные компоненты цикла: позиция *3* – испаритель, позиция *4* – конденсатор; элемент регулирования: позиция *7* – дросселирующее устройство (регулятор потока хладагента).

В основе действия теплового насоса лежит процесс переноса тепла от источника с низкой температурой к потребителю с высокой температурой. Испаритель аккумулирует тепловую энергию из обратного трубопровода системы теплоснабжения, а конденсатор передает ее в контур греющего агента. Важнейшим параметром, характеризующим эффективность работы теплонасосной системы, является энергетический коэффициент преобразования, определяемый как отношение полезной тепловой мощности, вырабатываемой установкой, к электрической мощности, потребляемой приводом компрессора:

$$\mu = \frac{Q_2}{L}, \quad (1)$$

где Q_2 – количество производимой установкой тепловой энергии; L – энергия, потребляемая компрессором. Диапазон коэффициента эффективности для современных ТНУ при различных режимах работы составляет от 3 до 7.

На ТЭЦ вакуумная деаэрация подпиточной воды тепловой сети рассматривается как метод повышения энергоэффективности. Однако на значительном количестве энергетических объектов практическое применение вакуумных деаэрационных установок не приводит к ожидаемому энергосберегающему эффекту. Основным сдерживающим фактором выступает использование для термической подготовки воды высокопараметрического пара, отбираемого из технологических отборов турбоагрегатов, что полностью компенсирует возможный экономический эффект от внедрения данной технологии. Многие современные

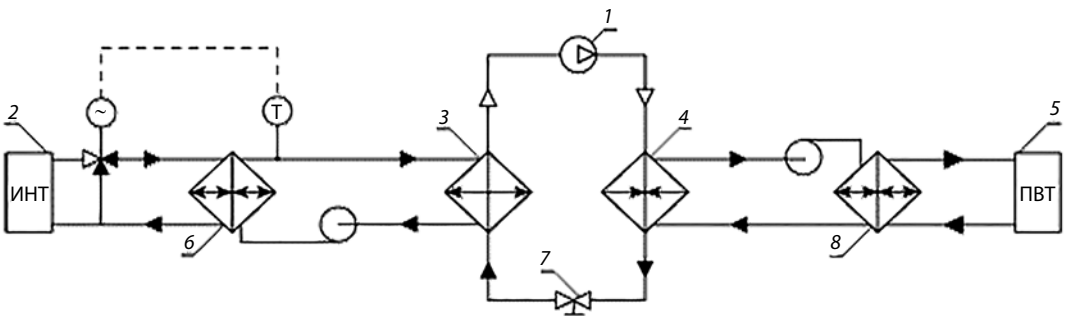

Рис. 1. Схема циркуляции жидкостей в тепловом насосе

Fig. 1. Scheme of liquid circulation in a heat pump

энергосберегающие технологии на ТЭЦ не реализуют свой потенциал из-за конфликта с существующими технологическими процессами. В частности, применение устаревших схем тепловой подготовки теплоносителей с использованием первичных энергоресурсов высокой потенциальной энергии сводит на нет экономию от внедрения даже самых прогрессивных энергоэффективных решений.

Температура теплоносителя, поступающего в тепловую сеть, слишком низка для его применения в качестве греющей среды. Подача теплоносителя организуется после прохождения нижнего сетевого подогревателя (НСП), при этом поток жидкости перенаправляется по байпасной линии в обход верхнего сетевого подогревателя (ВСП). Аналогичным образом в системах теплоподготовки часто применяется схема с разделением потоков: основной поток сетевой воды направляется через последовательную цепь теплообменников, в то время как часть жидкости может подаваться через перепускные линии для оптимизации температурного графика и снижения гидравлического сопротивления системы.

В такой конфигурации ВСП используется исключительно для подготовки греющего агента, поступающего в вакуумный деаэратор. Главный минус данной схемы *(см. рис. 1)* заключается в том, что для нагрева греющего агента до требуемых технологических значений (около 100°С) необходимо повышать параметры пара в верхнем отопительном отборе турбины.

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ УГОЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Дальнейшего повышения энергетической эффективности ТЭЦ при комбинированной выработке тепла и электроэнергии можно достичь, модернизировав схему подогрева греющего агента. Суть предложенной технологии состоит в том, что обратная сетевая вода охлаждается в испарителе теплового насоса до ее поступления в нижний сетевой подогреватель. Параллельно часть сетевой воды направляется через конденсатор теплового насоса, где происходит ее нагрев с последующей подачей в деаэратор для использования в качестве греющей среды. Принципиальная схема тепловой электростанции, реализующей данный технологический процесс, представлена на *рис. 2*.

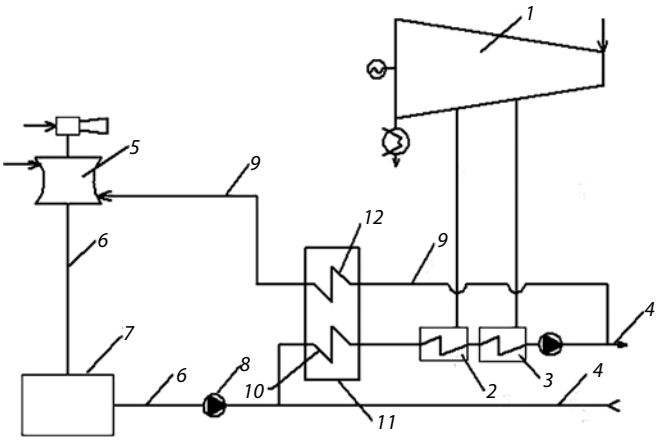

Рис. 2. Конструктивная компоновка модернизированного комплекса вакуумного удаления газов из подпиточной воды на энергетических объектах

Fig. 2. Structural layout of a modernized complex for vacuum removal of gases from make-up water at power facilities

Аналогичный подход может быть применен и в других системах тепловой подготовки теплоносителей, где требуется утилизация низкопотенциального тепла, например в системах подогрева сырой воды или в технологических процессах, связанных с рекуперацией тепловой энергии.

Технологическая схема модернизированной системы вакуумной деаэрации включает следующие основные компоненты: теплофикационную турбину (*1*); сетевые подогреватели: нижний НСП (*2*) и верхний ВСП (*3*); трубопроводные системы: магистраль сетевой воды (*4*), линия греющего агента (*9*); деаэрационный узел: деаэратор (*5*), баковый аккумулятор (*7*), насос подпитки (*8*); теплонасосный контур: тепловой насос (*11*), испаритель (*10*), конденсатор (*12*).

Данная схема реализует принцип двухконтурной организации процесса, где нагрев греющего агента осуществляется за счет утилизации тепловой энергии обратного сетевого потока, что позволяет исключить использование пара из отборов турбины. Работа предложенной системы организована следующим образом. Питательная вода подается в деаэрационную колонну (*5*), тогда как часть теплоносителя из подающей магистрали (*4*) отводится для использования в качестве греющей среды и транспортируется по линии (*9*). Предварительный нагрев теплоносителя до требуемых параметров осуществляется в конденсаторном блоке (*12*) теплонасосной установки (*11*). Источником низкопотенциальной тепловой энергии служит обратный поток сетевой воды из магистрали (*4*), тепло которого аккумулируется испарительным модулем (*10*) до поступления жидкости в подогревательные устройства (*2*) и (*3*). Аналогичный принцип может быть применен в других системах тепловой подготовки жидкостей, где требуется утилизация сбросного тепла. Например, в системах рекуперации тепловой энергии технологических процессов часть потока теплоносителя может направляться через теплообменные аппараты для последующего использования в качестве промежуточного теплоносителя в различных стадиях производственного цикла. Это позволяет снизить энергопотребление основного оборудования и повысить общую эффективность технологического процесса. Использование теплонасосной технологии дает возможность обеспечить требуемые температурные параметры греющей среды без необходимости повышения давления в отопительных отборах турбоагрегата (*1*), понизить температуру обратного теплоносителя перед сетевыми подогревательными устройствами (*2*) и (*3*), а также увеличить выработку электроэнергии на теплофикационном цикле турбины (*1*).

В рамках исследования выполнена технико-экономическая оценка эффективности инновационного метода подготовки подпиточной воды в режиме нормальной эксплуатации теплоэлектроцентрали. Рентабельность внедрения разработанной технологии обоснована расчетом потенциального сокращения годового потребления условного топлива при переходе от классической системы водоподготовки к системе с утилизацией тепловой энергии обрат-

ного сетевого потока. В качестве референсного варианта использована типовая для отечественных ТЭЦ схема, в которой термическая подготовка сетевой воды до необходимых технологических кондиций производится в верхнем сетевом подогревателе турбоагрегата типа Т-100-130.

Аналогичный подход к оценке эффективности может быть применен и для других энергосберегающих технологий в энергетике, например при внедрении систем рекуперации тепла уходящих газов или модернизации систем теплоснабжения с использованием низкопотенциальных источников тепловой энергии. В таких случаях также проводится сравнительный анализ расхода топлива между базовым и модернизированным вариантами, что позволяет количественно оценить потенциальный экономический эффект от внедрения инновационных решений в рамках действующих энергетических объектов.

Представленная технология является эффективным средством для увеличения конкурентоспособности и улучшения экологических показателей объектов угольной энергетики [9, 10]. Ее масштабная реализация на российских угольных ТЭЦ и в крупных котельных установках даст возможность существенно уменьшить потребление топлива, снизить объем выбросов парниковых газов и повысить финансовую стабильность компаний в угольной отрасли [11, 12].

В итоге установлено, что экономия условного топлива при внедрении предложенной технологии составит 13,9 млн руб., а срок окупаемости составит 7 месяцев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ подтвердил, что традиционная схема вакуумной деаэрации на угольных ТЭЦ не позволяет в полной мере реализовать потенциал энергосбережения из-за использования высокопотенциального пара для подогрева греющего агента. Разработана и научно обоснована новая технологическая схема, в которой для подогрева греющего агента используется тепловой насос, утилизирующий низкопотенциальное тепло обратной сетевой воды. Это позволяет отказаться от использования пара верхнего отопительного отбора турбины. Внедрение предложенного решения обеспечивает значительный энергетический и экономический эффект. Годовая экономия условного топлива для станции с расходом подпиточной воды 1000 м^3/ч составляет около 6960 т, а срок окупаемости капитальных затрат не превышает 7 месяцев.

Список литературы • References

1. Xu Q., Wang Sh., Luo K., Fan J. Energy-saving retrofit and thermal economy optimization of peak-shaving for coal-fired power plants utilizing molten salt thermal storage. *Applied Thermal Engineering*. 2025:128229. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128229.
2. Xie L., Wang Ch., Liu Z., Liu M., Yan J. Improving the load ramp-up capacity and efficiency of coal-fired power plants by optimizing the pulverizing system control strategy. *Energy*. 2025;(334):137499. DOI: 10.1016/j.energy.2025.137499.
3. Kapanski A.A., Hruntovich N.V., Klyuev R.V., Brigida V.S. Identification of easily accessible urban water consumption factors for energy-efficient management of pumping stations. *Water Conservation Science and Engineering*. 2025;10(2):46. DOI: 10.1007/s41101-025-00372-1.
4. Xie Sh., Qin P., Zhang M., Xu J., Quyang T. A high-efficiency and eco-friendly design for coal-fired power plants: Combined waste heat recovery and electron beam irradiation. *Energy*. 2022;(258):124884. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124884.
5. Kumawat R., Gidwani L., Rana K.B. Comparative analysis of life cycle assessment of biogas-powered and coal-powered power plant for optimized environmental operation. *Heliyon*. 2024;10(20):e39155. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e39155.
6. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020;(5):47-54. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/047.
7. Brigida V.S., Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z. Ensuring stability of undermining inclined drainage holes during intensive development of multiple gas-bearing coal layers. *Journal of Mining Institute*. 2019;239(5):497-501. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.497.
8. Клюев Р.В. Повышение энергоэффективности получения тепла при утилизации шахтного метана в газопоршневых электростанциях // Уголь. 2025;(1):105-108. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-105-108.

   Klyuev R.V. Improving the energy efficiency of heat production during the utilization of coal mine methane in gas piston power plants. *Ugol'*. 2025;(1):105-108. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-105-108.
9. Filonchyk M., Peterson M.P., Yan H., Gusev A., Zhang L., He Y., Yang Sh. Greenhouse gas emissions and reduction strategies for the world's largest greenhouse gas emitters. *Science of The Total Environment*. 2024;(944):173895. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173895.
10. Kulikova E.Yu., Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Geoecological monitoring during mining operations. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(2):580-588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.
11. Куликова А.А. Новый подход к оценке выбросов от горных предприятий с учетом углеродного следа // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 4. С. 825-832. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-825-832.

    Kulikova A.A. A new approach to estimating emissions from mining enterprises, taking into account the carbon footprint. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(4):825-832. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-825-832.
12. Kongar-Syuryun C., Klyuev R., Golik V., Oganesyan A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D. Principles of Sustainable Development of Georesources as a Way to Reduce Urban Vulnerability. Urban Sci. 2024;(8):44. DOI: 10.3390/urbansci8020044.

Authors Information
Klyuev R.V. – Doctor of Engineering Sciences,
Professor of the Department of Automation and Control,
Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023,
Russian Federation, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 1.10.2025
Поступила после рецензирования: 17.12.2025
Принята к публикации: 29.12.2025

Paper info
Received October 1, 2025
Reviewed December 17, 2025
Accepted December 29, 2025