

СТАТЬЯ

УДК 621.165



CC BY 4.0

**ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ ПАРОТУРБИНОЙ
УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛООВОГО НАСОСА
И ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА****Хвостиков А. С. ORCID ID 0000-0002-9097-4487,****Рой С. А.**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет», Комсомольск-на-Амуре,
Российская Федерация, e-mail: knastu@list.ru*

Целью исследования является повышение эффективности паросиловых турбинных установок с помощью применения тепловых насосов и органического цикла Ренкина. В ходе обзора литературных источников выявлено, что наибольшие потери, до половины энергии паротурбинных энергетических установок, составляют потери энергии на конденсацию. Существуют сложности в эффективности охлаждения конденсатора для поддержания вакуума в конденсаторе. В ходе расчета тепловых схем паротурбинных установок выявлено, что ограничением по применению тепловых насосов является график теплового потребления. Предложение для расширения технологических возможностей паротурбинных установок заключается в объединении теплового насоса и органического цикла Ренкина, разработаны схемы внедрения абсорбционного и компрессионного тепловых насосов в схему паротурбинных установок. Тепловой насос, используя низкопотенциальное тепло конденсатора, подогревает рабочее тело органического цикла Ренкина или сетевую воду в требуемых объемах. Тепловые насосы в системе теплоснабжения могут применяться не только в летний режим, но и в переходный (осенний/весенний), когда температура прямой сетевой воды не такая высокая, как в зимний отопительный период. В летние месяцы основное повышение эффективности достигается за счет увеличения вакуума конденсатора, в результате чего увеличивается теплоперепад и, следовательно, эффективность турбоагрегата. В результате численного исследования тепловых насосов в составе паротурбинных установок было выявлено, что применение абсорбционного теплового насоса повышает эффективность выработки тепловой и электрической энергии, эффективность применения компрессионных тепловых насосов зависит от режимных параметров. Использование теплового насоса для подогрева рабочего тела органического цикла Ренкина повышает общую энергетическую эффективность и маневренность турбоустановок.

Ключевые слова: паротурбинная установка, энергоэффективность, низкопотенциальное тепло, конденсатор, органический цикл Ренкина, тепловой насос

**INCREASING THE MANEUVERABILITY
OF A STEAM TURBINE UNIT USING A HEAT PUMP
AND AN ORGANIC RANKINE CYCLE****Khvostikov A. S. ORCID ID 0000-0002-9097-4487,****Roy S. A.**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Komsomolsk-on-Amur State University”, Komsomolsk-on-Amur,
Russian Federation, e-mail: knastu@list.ru*

The aim of the study is to increase the efficiency of steam-powered turbine installations by using heat pumps and the organic Rankine cycle. A review of the literature revealed that the greatest losses, up to half of the energy of steam turbine power plants, are energy losses due to condensation. There are difficulties in the cooling efficiency of the condenser to maintain the vacuum in the condenser. During the calculation of the thermal schemes of steam turbine installations, it was revealed that the limitation on the use of heat pumps is the schedule of heat consumption. The proposal to expand the technological capabilities of steam turbine plants is to combine a heat pump and an organic Rankine cycle, and schemes have been developed for the introduction of absorption and compression heat pumps into the scheme of steam turbine plants. The heat pump, using the low-potential heat of the condenser, heats the working fluid of the organic Rankine cycle or mains water in the required volumes. Heat pumps in the heat supply system can be used not only in the summer mode, but also in the transitional (autumn / spring), when the temperature of the direct mains water is not as high as in the winter heating period. In the summer months, the main increase in efficiency is achieved by increasing the vacuum of the condenser, which increases the heat transfer and, consequently, the efficiency of the turbine unit. As a result of a numerical study of heat pumps in steam turbine installations, it was found that the use of an absorption heat pump increases the efficiency of heat and electric energy generation, while the efficiency of compression heat pumps depends on operating parameters. The use of a heat pump to heat the working fluid of the organic Rankine cycle increases the overall energy efficiency and maneuverability of turbine installations.

Keywords: steam turbine installation, energy efficiency, low-potential heat, condenser, organic Rankine cycle, heat pump

Введение

Повышение эффективности работы энергетического оборудования является важной задачей в формировании цен на отпуск энергии потребителям. Уровень себестоимости тепловой и электрической энергии влияет на тарифы для населения и на издержки промышленных предприятий, что, в свою очередь, определяет себестоимость выпускаемой ими продукции. Поэтому поиск и реализация способов повышения энергетической эффективности энергоустановок является важной задачей, влияющей на формирование тарифов на энергию для потребителей.

Наиболее массовым видом энергетического оборудования остаются в нашей стране паротурбинные установки. Активно применяются также газотурбинные установки. Коэффициент полезного действия паротурбинных установок конденсационного типа достигает 37%, теплофикационного типа – 55%, эффективность газотурбинных установок достигает 45%, эффективность комбинированного парогазового цикла может достигать 65%.

Для выявления путей повышения эффективности паротурбинных установок произведем анализ энергетических потерь паротурбинных установок. Наиболее популярные решения при повышении эффективности паротурбинных установок – повышение начальных параметров пара. Однако этот метод требует значительного изменения конструкции энергоблока и применения дорогостоящих материалов [1]. Наибольшие потери, до половины энергии паротурбинных энергетических установок, составляют потери энергии на конденсацию. Следующие по величине потери с уходящими газами, около 10%. Трудность использования этих потерь состоит в их низком потенциале. Температура технической воды после охлаждения конденсатора не превышает 40 °С. Температура уходящих газов достигает 150 °С, но они содержат водяные пары и оксиды серы, которые при охлаждении образуют серную кислоту, разрушающую оборудование.

Рассмотрим пути возврата низкопотенциальной теплоты и использование ее для производства полезной энергии. Утилизацию низкопотенциальной теплоты выполняют с помощью тепловых насосов [2] и органического цикла Ренкина [3]. Использование тепловых насосов позволяет найти пути использования низкопотенциального тепла при затрате меньшего количества высокопотенциальной энергии [4]. Ограничением по применению тепло-

вых насосов является график теплового потребления. При отсутствии теплового потребления эффективность использования паротурбинных установок снижается. С помощью органического цикла Ренкина возможно производство электрической энергии с использованием низкопотенциального источника тепла. Существуют проекты по использованию производственных и теплофикационных отборов для подогрева органического рабочего тела, что снизит отбор пара в конденсатор и повысит эффективность паротурбинной установки [5]. Рассмотрим эффективность работы этих способов утилизации теплоты.

Выброс тепловой энергии в атмосферу вызывает тепловое загрязнение [6]. При этом охлаждение конденсатора требует значительных объемов воды. Существуют сложности в эффективности охлаждения конденсатора для поддержания вакуума в конденсаторе. Ограничение использования технической воды для охлаждения конденсатора существует не только в городской среде, но и в отдаленных заповедных территориях [7].

Цель исследования – повышение эффективности паросиловых турбинных установок с помощью применения тепловых насосов и органического цикла Ренкина. Тепловые насосы позволяют использовать низкопотенциальное тепло конденсатора паротурбинной установки для подогрева сетевой воды и органического цикла Ренкина. Использование органического цикла Ренкина позволяет исключить работу паровой турбины в области влажного пара.

Материалы и методы исследования

Работа основана на анализе и теоретических исследованиях. Теоретические расчеты выполнены с помощью решения балансовых уравнений тепловых схем паросиловых турбинных установок с тепловыми насосами. Тепловые насосы утилизируют низкопотенциальное тепло конденсатора и нагревают сетевую воду и рабочее тело органического цикла Ренкина.

Результаты исследования и их обсуждение

Тепловые насосы подразделяются на компрессионные и абсорбционные. Принцип действия компрессионных тепловых насосов заключается в реализации обратного цикла Карно. В теплообменнике происходит подогрев рабочего тела с помощью низкопотенциального источника тепла. В качестве низкопотенциального тепла выбрано тепло конденсатора, удаляемого в атмосферу. В результате подогрева рабо-

чее тело – хладагент испаряется при низком давлении. После чего с помощью компрессора газообразное рабочее тело сжимается, в результате чего его температура увеличивается, и в теплообменнике отдают высокопотенциальное тепло. После расширения в дроссельном устройстве рабочее тело возвращается в цикл [8]. В абсорбционном тепловом насосе используется тепловая энергия вместо механической, используемой в компрессионном. Подвод теплоты осуществляется в два этапа: низкопотенциального в испаритель и греющего в генератор. Полезное тепло забирается последовательно сначала через абсорбер и после в конденсаторе [9].

Повышение эффективности компрессионного теплового насоса возможно с помощью применения промежуточного теплообменника, использующего производимое тепло для начального подогрева теплоносителя [10]. Применение компрессионного теплового насоса позволяет экономить энергию, затрачиваемую на производство тепловой энергии. Однако исследователи, выполняя расчеты, выполняют оценку эффективности работы насоса отдельно от энергетической установки. Электрическая энергия, используемая для привода компрессора, обладает большей эксергией, чем производимое ей тепло. При расчете эффективности энергоустановки увеличение показателей эффективности получается только при значительном увеличении теплового потребления и увеличении доли низкопотенциального теплового потребления, что требует изменения устройства конденсатора [7].

Работа абсорбционного теплового насоса основана на тепловом потреблении. В качестве источника теплового потребления могут использоваться теплофикационные отборы пара, и при изменении схемы работы вызывает уменьшение расхода пара на турбоустановку и общее повышение эффективности работы, даже при малом теплофикационном потреблении. Абсорбционные тепловые насосы более сложны и требуют агрегатов больших размеров.

Применение тепловых насосов наиболее целесообразно в летние месяцы. Из-за сложности охлаждения конденсатора требуется дополнительное охлаждение, определенную нагрузку может взять на себя тепловой насос. Однако в летние месяцы потребление тепловой энергии незначительно и требуются другие тепловые потребители [11]. Для организации дополнительного охлаждения применяют системы с дополнительным охлаждением [12].

Принцип работы энергетической установки на органическом цикле Ренкина аналогичен паротурбинному циклу, за исключением того, что в качестве рабочего тела используются жидкости с более низкими температурами кипения. Эффективный минимум использования органического цикла Ренкина начинается со 100 °С, и такие турбоустановки используют в основном на геотермальных электростанциях [13]. Эффективность турбоустановки зависит от величины теплоперепада. Для увеличения теплоперепада и, следовательно, повышения эффективности необходимо повысить начальные параметры или снизить конечные параметры. Значение конечных параметров ограничено температурой охлаждающей среды. Для снижения температуры применяют охлаждение холодным воздухом в зимнее время года. Повышение температуры возможно с помощью дополнительного подогрева [14].

Предложение для расширения технологических возможностей паротурбинных установок заключается в объединении теплового насоса и органического цикла Ренкина. Тепловой насос, используя низкопотенциальное тепло конденсатора, подогревает рабочее тело органического цикла Ренкина или сетевую воду в требуемых объемах, позволяя использовать низкопотенциальное тепло конденсатора и уменьшая тепловое загрязнение.

Суть предлагаемых усовершенствований поясняется на рис. 1. Пароводяной цикл повторяет стандартную теплофикационную паротурбинную установку, за исключением того, что теплофикация осуществляется не с помощью сетевых подогревателей, а с помощью абсорбционного теплового насоса. Часть тепла отбирается из конденсатора, а часть тепла из теплофикационных отборов. Тем самым уменьшается величина отборов пара на конденсацию при сохранении величины теплофикации. Также для устранения тепловых потерь и снижения отборов на конденсатор теплофикационные отборы подогревают органический цикл Ренкина.

Для определения технико-экономических показателей предлагаемого внедрения был выполнен предварительный расчет установки. Для этого приняты следующие характеристики: тепловая мощность теплового насоса – 25 МВт; температура охлаждающей воды – 30 °С; температура охлажденной воды 25 °С; давление греющего пара – 0,25 МПа; температура конденсации – 70 °С; температура слабого раствора на выходе из абсорбера – 60 °С; высшая температура кипения раствора в генераторе – 115 °С.

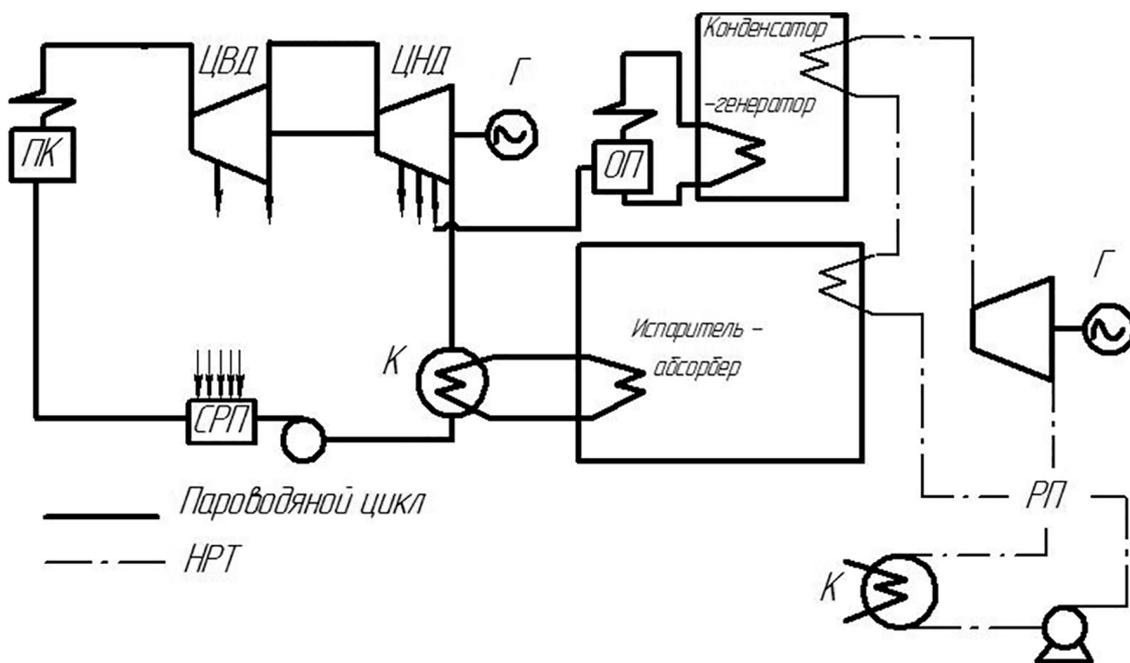


Рис. 1. Схема подогрева рабочего тела органического цикла Ренкина при помощи абсорбционного теплового насоса: ПК – паровой котел, СРП – система регенеративного подогрева, ЦВД и ЦНД – цилиндры высокого и низкого давления, К – конденсатор, РП – регенеративный подогреватель ОЦР, ОП – подогреватель теплового насоса органического цикла
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В результате расчета абсорбционного бромисто-литиевого теплового насоса на подогрев сетевой воды и рабочего тела (аммиак) органического цикла Ренкина до температуры $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ были получены показатели и расходы рабочего тела абсорбционного теплового насоса. Тепловой коэффициент машины составил 1,77. Соотношение подведенной теплоты к общей тепловой нагрузке на машину составило 56 % что позволяет значительно экономить энергию топлива на теплофикацию.

Как известно, эффективность энергоустановки зависит от режимных параметров. Экономия тепловой энергии на теплофикацию вызывает увеличение отборов в конденсатор, и эффективность выработки электрической энергии снижается. Общие энергетические показатели, такие как коэффициент использования топлива, расход тепла, пара и топлива, при этом снижаются. Дальнейшее увеличение эффективности происходит при увеличении отборов на теплофикацию. Однако соотношение тепловой и электрической энергии задается оператором и, особенно в летние месяцы, не может обеспечить требуемых отборов. Повышение эффективности возможно использованием теплового насоса для подогрева рабочего тела органического цикла Ренкина.

Тепловые насосы в системе теплоснабжения ТЭЦ могут применяться не только в летний режим, но и в переходный (осенний/весенний), когда температура прямой сетевой воды не такая высокая, как в зимний отопительный период. В зимние месяцы и переходные осенние и весенние эффективность достигается увеличенным количеством тепловых насосов и снижением пара на тепловое потребление за счет используемой сбросной теплоты конденсатора в соотношении 56 % к 44 %. В летние месяцы основное повышение эффективности достигается за счет увеличения вакуума конденсатора, в результате чего увеличивается теплоперепад и, следовательно, эффективность турбоагрегата (рис. 2).

На летнем режиме замещение сетевого подогревателя тепловым насосом дает прирост КПД по производству электроэнергии 1,7 %, прирост электрической мощности 0,293 МВт, уменьшение удельного расхода условного топлива на $8,41\text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ и удельного расхода пара на $0,08\text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, циркуляционная вода охлаждается на $0,51\text{ }^{\circ}\text{C}$ (число мало из-за больших объемов воды – 18600 т/ч), а также улучшается вакуум в конденсаторе на 0,25 кПа.

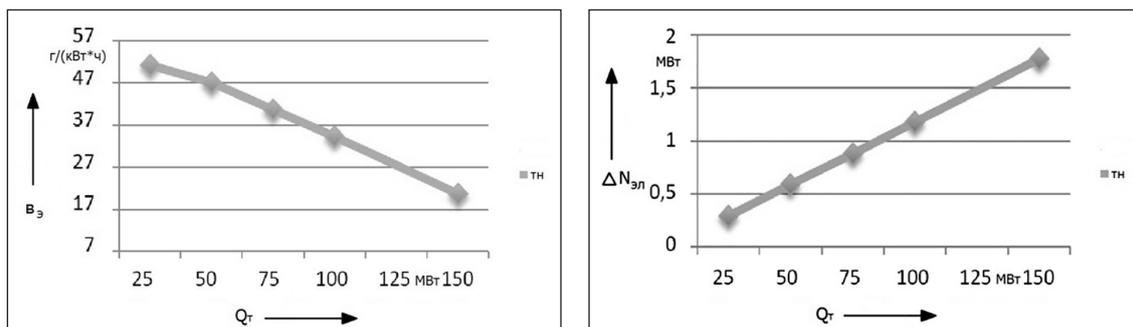


Рис. 2. Снижение удельного расхода условного топлива а) и прироста выработки электрической мощности б) в зависимости от тепловой нагрузки

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

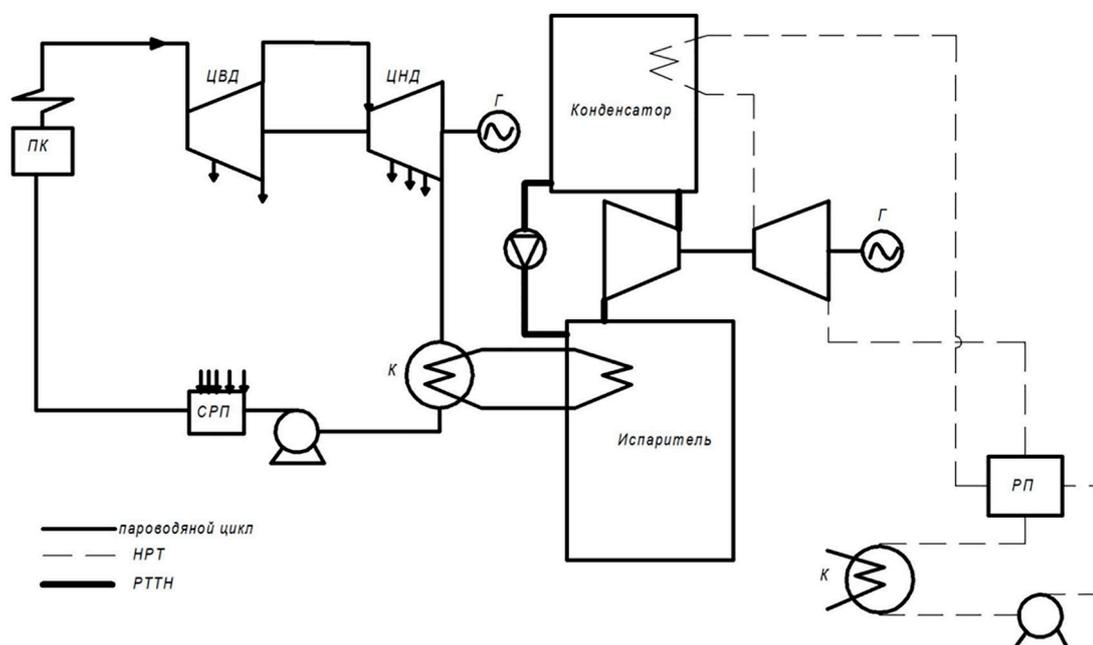


Рис. 3. Схема утилизации тепла в конденсаторе при помощи парокомпрессионного теплового насоса: ПК – паровой котел, СРП – система регенеративного подогрева, ЦВД и ЦНД – цилиндры высокого и низкого давления, К – конденсатор, РП – регенеративный подогреватель ОЦР

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Дальнейшее повышение эффективности в летние месяцы возможно за счет использования тепловых насосов для подогрева рабочего тела органического цикла Ренкина. Перевод выработки электрической энергии с парового цикла на органический исключает работу турбины на влажном паре и повышает ее эффективность.

Производство электроэнергии на утилизации тепловой энергии возможно и для парокомпрессионного теплового насоса. Тепловая схема предлагаемой работы представлена на рис. 3. Рабочий агент парокомпрессионного теплового насоса, получив теплоту от конденсатора, сжимается ком-

прессором и подается в конденсатор теплового насоса с высокими показателями температуры и давления. Отдавая теплоту, низкикипящее рабочее тело проходит органический цикл Ренкина, аналогичный предыдущей схеме. Энергия на компрессор может отбираться напрямую от турбины. Часть энергии, выработанной в турбине НРТ, уходит в компрессор теплового насоса.

Согласно расчетам работа турбины на органическом цикле Ренкина имеет более высокий коэффициент полезного действия, благодаря работе в области сухого пара. Сжатие пара требует меньшего количества энергии по сравнению с непосредственным

подогревом. Однако расчет общей тепловой схемы дает обобщенные показатели с меньшими значениями расхода пара и коэффициента использования топлива. Только в определенные режимы с большим потреблением тепловой энергии можно получить незначительное повышение эффективности. Поэтому применение парокompрессионного теплового насоса для выработки тепла и электрической энергии с помощью органического цикла Ренкина нецелесообразно. Снижение эффективности можно объяснить использованием электрической энергии, с более высокими показателями эксергии, для выработки тепловой энергии, с более низкими показателями эксергии [15].

Заключение

В результате численного исследования тепловых насосов в составе паротурбинных установок было выявлено, что применение абсорбционного теплового насоса повышает эффективность выработки тепловой и электрической энергии, эффективность применения компрессионных тепловых насосов зависит от режимных параметров. Использование теплового насоса для подогрева рабочего тела органического цикла Ренкина повышает общую энергетическую эффективность и маневренность турбоустановок.

Список литературы

1. Шаломов В. И. Оценка эффективности применения повышенных докритических начальных параметров пара для теплофикационного энергоблока мощностью 200–250 МВт // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 5 (45). С. 4–11. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44051401> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.17084/20764359_2020_49_4.
2. Курнакова Н. Ю., Нуждин А. В., Волхонский А. А. О возможности повышения энергоэффективности тепловой схемы ТЭС с применением теплового насоса // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7 (138). С. 114–122. URL: https://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2018/07/articles/09 (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-114-122.
3. Карабарин Д. И. Оценка влияния изменения режимных параметров органического цикла Ренкина при изменении внешних // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 17. № 8. С. 1019–1027. URL: <http://journal.sfu-kras.ru/number/154301> (дата обращения: 13.01.2025).
4. Романюк В. Н., Бобич А. А. Время применения абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов на ТЭЦ Беларуси // Энергия и менеджмент. 2017. № 2 (95). С. 2–5. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48214814> (дата обращения: 13.01.2025).
5. Карабарин Д. И., Михайленко С. А. Использование низкопотенциальных источников энергии на основе органического цикла Ренкина // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 11. № 7. С. 867–876. URL: <http://journal.sfu-kras.ru/number/109144> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.17516/1999-494X-0101. EDN: YPMTCP.
6. Аковецкий В. Г. Геоэкологические проблемы изменения климата: причины и следствие // Научный журнал Российского газового общества. 2022. № 2 (34). С. 14–31. URL: <https://gazo.ru/ru/media/publications/nauchnyy-zhurnal-rgo-2-2022/> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.55557/2412-6497-2022-2-14-30. EDN: JQMNQO.
7. Шаломов В. И. Предварительный анализ эксплуатационных показателей паротурбинных установок новой Советско-Гаванской теплоэлектроцентрали // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 3 (67). С. 28–34. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53971266> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.17084/20764359-2023-67-28. EDN: IJCPFH.
8. Хвостиков А. С., Дыкер Д. К. Утилизация низкопотенциального тепла на тепловых электростанциях // Энергосбережение и водоподготовка. 2021. № 3 (131). С. 37–41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46168940> (дата обращения: 13.01.2025).
9. Нечаев А. В., Гришкова А. В. Применение абсорбционных тепловых насосов на паротурбинных ТЭЦ // Молодежный научный вестник. 2018. № 6 (31). С. 119–127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=uvpgrg> (дата обращения: 13.01.2025).
10. Абилюдинова С. К., Мусабеков Р. А., Расмухаметова А. С., Чичерин С. В. Оценка энергетической эффективности цикла теплового насоса со ступенчатым сжатием // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 3. С. 293–302. URL: <https://energy.bntu.by/jour/article/view/1671> (дата обращения: 13.01.2025).
11. Маслов В. И., Куделько А. Р. Разработка направлений повышения эффективности инновационной деятельности по энергетическому обеспечению социальной сферы Хабаровского края // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2024. № 1 (73). С. 75–81. URL: <https://www.uzknastu.ru/archiv/2024/73> (дата обращения: 13.01.2025).
12. Шадек Е. Г., Маршак Б. И., Крыкин И. Н., Блинов А. Н. Тригенерационный энергокомплекс на низкокипящих теплоносителях // Энергосбережение. 2015. № 5. С. 58–72. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23769760> (дата обращения: 13.01.2025).
13. Голубева Л. Ф., Григорьева О. К., Францева А. А. Применение фреоновых технологий на тепловых электрических станциях // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 4 (65). С. 164–174. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28152101> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-164-174.
14. Щинников П. А., Францева А. А., Садкин И. С. По агрегатная оценка капиталовложений в энергоблоки электростанций с использованием параметрической степенной функции // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 2–3 (79). С. 123–138. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44228017> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-123-138.
15. Романюк В. Н., Бобич А. А., Рыжова Т. В. и др. Оценка термодинамической эффективности Объединенной энергетической системы Беларуси. Ч. 2 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66. № 2. С. 141–157. URL: <https://energy.bntu.by/jour/article/view/2254> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.21122/1029-7448-2023-66-2-141-157.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.