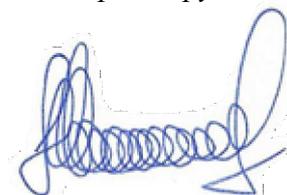




На правах рукописи



КОНДРАШОВ Алексей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ С ЕДИНЫМ КОНТУРОМ
ТЕПЛОВЫХ МАШИН**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Тринченко Алексей Александрович

Официальные
оппоненты: **Кзаков Владимир Григорьевич** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Института энергетики и автоматизации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», г. Санкт-Петербург

Яворовский Юрий Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленных теплоэнергетических систем института энергоэффективности и водородных технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»), г. Казань.

Защита состоится «25» марта 2025 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета У.2.4.6.41 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ) по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ГК-2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «10» февраля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.2.4.6.41
доктор технических наук,
старший научный сотрудник



Куколев Максим Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена неполнотой использования теплоты конденсации рабочего агента тепловых (холодильных) машин в инженерных и промышленных системах (в частности – на спортивных объектах, имеющих ледовые арены), в результате чего снижается энергетическая эффективность работы технологического оборудования. Этот фактор лишает возможности получения экономического эффекта в виде сокращения коммунальных затрат путем отказа от использования сторонних источников тепла в пользу применения бросовой теплоты конденсации, которая может быть полезно использована для различных целей: воздушное отопление, подогрев грунта от замерзания, догрев воды для ямы таяния снежной крошки и т.п. Использование бросовой теплоты конденсации рабочего агента позволяет снизить зависимость предприятия от сторонних источников теплоснабжения, а также увеличить автономность за счет использования собственных технологических систем.

Эффективное использование топливно-энергетических ресурсов является одной из важнейших задач, стоящих перед экономикой Российской Федерации, в соответствии с федеральным законом № 261ФЗ от 23.11.2009 (ред. от 11.06.2021) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». В связи с этим задачи по определению потенциала энергосбережения на предприятиях рассматриваются как одни из приоритетных. Цель этих задач – определить возможность сокращения затрат на энергоресурсы при производстве товаров и услуг без сокращения их производства.

Степень разработанности темы.

Изучению проблем сокращения затрат и повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках, термодинамических процессов и циклов применительно к установкам производства, преобразования и потребления энергии (холодильным машинам), а так же оптимизации схем теплоэнергетических установок и систем для генерации и трансформации энергоносителей (в том числе, основанных на принципах их комбинированного производства), посвящены труды Кокорина О.Я., Баженова А.И., Агабабова В.С. Клименко А.В., Григорьева А.В., Ометовой М.Ю., Петрова Е.Т., Сапожникова В.Б., Казакова В.Г., Яворовского Ю.В., Муминова А.М., Короткого И.А., Мереуца Е.В., Сухих А.А., Жерлыкиной М.Н., Низамова Ж., Кафарова В.В., Смирнова Д.А., Рахманова Ю.А., Закирова С.Г. и др. Результаты работ этих исследователей позволили выполнить поиск энергетически эффективных схем и методов оптимизации потребления электрической и тепловой энергии путем применения системы утилизации

теплоты конденсации, что позволяет сократить использование сторонних источников и направить полученное тепло в другие инженерные системы (отопление, ГВС, вентиляция и кондиционирование воздуха и т.п.), получить экономический эффект от сокращения затрат на электрическую и тепловую энергию, при возможности относительно простого (и доступного с финансовой точки зрения) внедрения таких систем, в том числе, на действующих предприятиях.

Объектом исследования является система воздушного отопления ледовых арен.

Предметом исследования являются потоки тепла как побочного продукта и пути их дальнейшего полезного использования объектом исследования.

Целью диссертационной работы явилось повышение эффективности использования энергетических ресурсов инженерными системами с единым контуром тепловых машин.

Для достижения цели работы потребовалось решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ существующих и новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок, рассмотреть пути использования бросового тепла на предприятиях, в составе которых имеются инженерные системы с единым контуром тепловых (холодильных) машин.

2. На основе анализа работы действующих инженерных систем и технологического оборудования в Санкт-Петербургском государственном бюджетном учреждении Спортивная школа олимпийского резерва по фигурному катанию на коньках (СПб ГБУ СШОР), где для намораживания ледового покрытия используются компрессорно-испарительные агрегаты с конденсаторами воздушного охлаждения (через которые теплота конденсации выбрасывается в атмосферу и полезно не используется), оптимизировать схему утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин путем организации воздушного отопления, выполнить технико-экономическое обоснование предлагаемых решений, определить срок окупаемости.

3. Выполнить экстракцию тепловых потоков ледовых арен СПб ГБУ СШОР для моделирования теплообменных процессов и синтеза теплообменной сети с одновременным анализом экстрагированных потоков по пинч-технологии. Составить математическую модель интеграции тепловых процессов для назначения теплообменных связей.

4. На действующем оборудовании реализовать усовершенствованную схему утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин, позволяющую сократить использование тепла, поставляемого теплоснабжающей организацией. Сокращение количества стороннего тепла подтвердить результатами анализа фактических затрат до и после внедрения усовершенствованной системы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- на основе линейного программирования создана математическая модель выбора теплообменных связей действующей системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин СПб ГБУ СШОР, позволяющая получить схемное решение для регенерации теплоты внутри системы;
- с использованием результатов моделирования теплообменных процессов и синтеза теплообменной сети, с одновременным анализом экстрагированных потоков по пинч-технологии, разработана новая схема утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин в системе воздушного отопления;
- с измерительного стенда, установленного применительно к реализованному схемному решению регенерации теплоты внутри системы, получен объем данных (за период более года), позволивший провести сравнительный анализ фактических затрат до и после внедрения усовершенствованной системы утилизации тепла;
- получены новые экспериментальные данные о работе системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента для воздушного отопления при различных режимных параметрах.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется тем, что:

- на действующем оборудовании внедрена эффективная технологическая схема системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин, позволяющая использовать бросовое тепло в системе воздушного отопления;
- определена структура теплообменных связей для ледовых арен СПб ГБУ СШОР, практическая реализация которых позволила снизить потребление тепловой энергии в процессе работы на 487,79 кВт.;
- разработанные подходы к выбору теплообменных связей, позволяют расширить область применения предложенной модели для схемных решений регенерации бросового тепла на аналогичных предприятиях, в составе которых имеются инженерные системы с единым контуром тепловых (холодильных) машин;
- реализованные технические решения могут быть использованы при проектировании и новом строительстве объектов с постоянной работой холодильных машин, а также для модернизации существующего технологического оборудования без существенных капитальных затрат и длительного срока простоя оборудования.

Методология и методы исследования: моделирование теплообменных процессов, синтез теплообменной сети, анализ экстрагированных потоков с ис-

пользованием пинч-технологии, натурные замеры технико-экономических показателей работы усовершенствованной системы утилизации тепла, сравнительный анализ величины коммунальных затрат и их составляющих после внедрения предложенной схемы, с величиной коммунальных затрат до использования бросового тепла для нужд предприятия.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований путей повышения эффективности использования энергетических ресурсов инженерными системами с единым контуром тепловых машин;

2. Модель выбора теплообменных связей системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента, схемные решения регенерации теплоты внутри системы;

3. Технологическая схема системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин, позволяющая использовать бросовое тепло в системе воздушного отопления;

4. Результаты анализа экспериментальных данных и их обработки для обоснования снижения доли стороннего тепла предприятия и сокращения коммунальных затрат.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность результатов работы подтверждается использованием современных методов и подходов, использованием современных измерительных приборов и аппаратуры, прошедших метрологическую аттестацию. Обработка опытных данных проводилась с использованием устойчивых методов статистического анализа и показала хорошее совпадение результатов тестовых опытов с результатами работы внедренной системы.

Автор защищает: результаты теоретических и экспериментальных исследований системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин.

Личный вклад автора заключается: в постановке задач исследования, их планировании и организации; в обобщении и анализе теоретических и экспериментальных данных по использованию бросового тепла; создании математической модели выбора теплообменных связей, позволившей получить схемное решение и реализовать его внедрение в систему утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин; планировании и проведении пусконаладочных работ и режимно-наладочных испытаний, выполнении технико-экономических расчетов, определении срока окупаемости проекта, что, в итоге, позволило сократить долю тепла для отопления СПб ГБУ СШОР, поставляемого теплоснабжающей организацией, и определило величину экономического эффекта в размере более 2,6 млн. рублей в год при сроке окупаемости менее года.

Публикации. Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях различного уровня, включая международные, в том числе: международной конференции «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE)» 2019 (Санкт-Петербург); международной конференции «5th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control» 2019, (Новосибирск); международной конференции «International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)» 2020, (Владивосток); международной конференции «The 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (IEEE 4th REEPE) 2022 (Москва), международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» 2022 (Москва); международной научно-практической конференции «Современные технологии и экономика в энергетике» 2022 (Санкт-Петербург) и др.

Результатам исследования присуждены призовые места в следующих научных конкурсах: на лучшие проекты фундаментальных научных исследований (Грант РФФИ № 20-38-90119\20 от 03.09.2020 года); грантов Комитета по науке и высшей школе правительства Санкт-Петербурга для аспирантов (Санкт-Петербург, 2021, 2022); Всероссийском инженерном конкурсе (ВИК), 2021 (Москва); Всероссийском конкурсе «Цифровая трансформация в энергетике и в промышленности» (ФГБУ «РЭА» Минэнерго РФ, 2022) и др.

По результатам исследования опубликовано 10 работ, в т.ч. 3 – в изданиях перечня ВАК, 4 – в изданиях, индексируемых международными наукометрическими базами Scopus и WoS, 3 – в других изданиях (РИНЦ).

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы (91 источник); изложена на 107 страницах, включает 32 иллюстрации, 11 таблиц и 1 приложение (положительный отзыв о работе системы).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант РФФИ № 20-38-90119\20 от 03.09.2020).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и основные задачи, отражены научная новизна и практическая ценность, а также подтверждены достоверность и обоснованность результатов работы.

В первой главе рассматриваются перспективные пути энергосбережения при работе тепловых машин, рассмотрены их типы и принципы работы. Проведен анализ результатов применения энергоэффективных технологий при работе

тепловых машин, выявлены основные преимущества и недостатки использования различных энергоэффективных схем, таких как: схема утилизации теплоты с использованием теплового насоса; схема холодильной машины с утилизацией теплоты конденсации рабочего агента; повышение экономичности холодильной системы применением частотно-регулируемого привода компрессора и электронного терморегулирующего вентиля; регулирование производительности конденсаторов воздушного охлаждения и др.

Проанализирована возможность использования фторконденсаторов в системах утилизации теплоты конденсации. Проведен анализ возможностей энергосбережения на крытых ледовых аренах с использованием бросового тепла. Выполнен анализ современного состояния вопроса о применении систем с единым контуром тепловых машин.

Во второй главе приведены показатели, характеризующие объект исследования. Выполнен анализ работы действующих инженерных систем и технологического оборудования в СПб ГБУ СШОР по фигурному катанию на коньках на предмет эффективности их работы, а также выявления систем, работающих неэффективно. По результатам анализа получено, что в существующей системе частичной утилизации теплоты конденсации, горячие пары холодильного агента после процесса сжатия в компрессоре холодильной машины, перед тем как попасть в воздушные конденсаторы, проходят через фторконденсатор, где часть тепла передается циркулирующему во втором контуре теплоносителю (воде), который, в свою очередь, за счет циркуляционного насоса, поступает только во второй контур нагрева воздушных кондиционеров ледовых арен, расположенный после контура первого нагрева (теплом теплоснабжающей организации – рисунок 1). Далее нагретый воздух из системы кондиционирования поступает в верхнюю часть ледовой арены под кровлю.

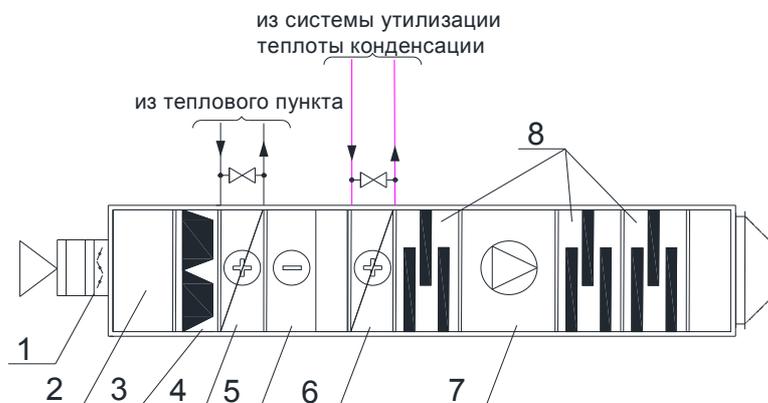


Рисунок 1 – Кондиционер ледовой арены:

- 1 –воздушный клапан; 2 – секция смешения уличного и внутреннего воздуха;
- 3 – фильтр ячеистый карманный; 4 – секция первого нагрева от системы отопления;
- 5 – секция осушки; 6 – секция второго нагрева от системы утилизации теплоты конденсации;
- 7 – приточный вентилятор; 8 – секции шумоглушения

Для увеличения полноты использования бросового тепла предложена модернизация существующей в СПб ГБУ СШОР системы частичной утилизации теплоты конденсации с целью использования низкопотенциального тепла в системе воздушного отопления ледовых арен, элементами которой являются тепловентиляторы. Источником тепла в тепловентиляторах являются два источника тепловой энергии (в зависимости от отопительного периода): в межотопительный период – тепловой насос, в отопительный – тепло, поставляемое теплоснабжающей организацией. В модернизированной системе в качестве источника тепла в тепловентиляторах, предлагается круглогодичное использование собственного тепла системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин.

Моделирование работы предлагаемой системы утилизации теплоты выполнено с использованием разработанной математической модели регенерации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин в системе намораживания ледовой поверхности СПб ГБУ СШОР при условии удовлетворения энергетических потоков, необходимых для функционирования ледовых арен СПб ГБУ СШОР (таблица 1).

Таблица 1 – Потоки теплоты необходимые для ледовых арен

Название потока	Температура на входе, °С	Температура на выходе, °С	Тепловой поток, кВт
Ледовые арены	-13	-9	-242,9
Яма снеготаяния	0	+15	54,0
Подогрев грунта	+11	+14	33,8
Отопление трибун	+13	+27	400,0

Исключением удовлетворенного потока тепла для ледовых арен, получены потоки тепла для моделирования системы и расчета (таблица 2).

Таблица 2 – Потоки теплоты для моделирования системы и расчёта

Название потока	Температура на входе, °С	Температура на выходе, °С	Тепловой поток, кВт
Теплота сброса	78	35	1530,0
Яма снеготаяния	0	15	54,0
Подогрев грунта	11	14	33,8
Отопление трибун	13	27	400,0

Произведена экстракция тепловых потоков с ледовых арен для дальнейшего моделирования теплообменных процессов (с использованием матриц горячих (холодных потоков) и температурного базиса).

Работа теплообменных аппаратов обеспечивается наличием необходимой (гарантированной) разностью температур (не менее температуры пинча), оптимальное значение которой находилось из зависимости:

$$\Delta T_{\text{онт}}^{\text{пинч}} = \sqrt{\frac{c_s (Q_{\text{гор}} - Q_{\text{n min}}) (T_{\text{гор. max}} - T_{\text{хол. min}})}{k (c_n Q_{\text{n max}} + c_x Q_{\text{0 max}})}}, \quad (1)$$

где c_s – стоимость единицы теплообменной поверхности оборудования, руб./м²; c_n – стоимость единицы подводимой теплоты, руб./Дж; c_x – стоимость единицы отводимой теплоты, руб./Дж; Q_n – поток теплоты подводимой к системе, Дж; Q_x – поток теплоты отводимой от системы, Дж; k – коэффициент теплопередачи теплообменников аппаратов, Вт/(м²·К).

По результатам определения матриц сдвинутых потоков горячих и холодных источников, построены горячая и холодная композитные кривые (рисунок 2), который подтверждает, что задача интеграции тепловых потоков с целью энергосбережения для ледовых арен СПб ГБУ СШОР сводится к пороговой и целиком располагается ниже пинча (таблице 3).

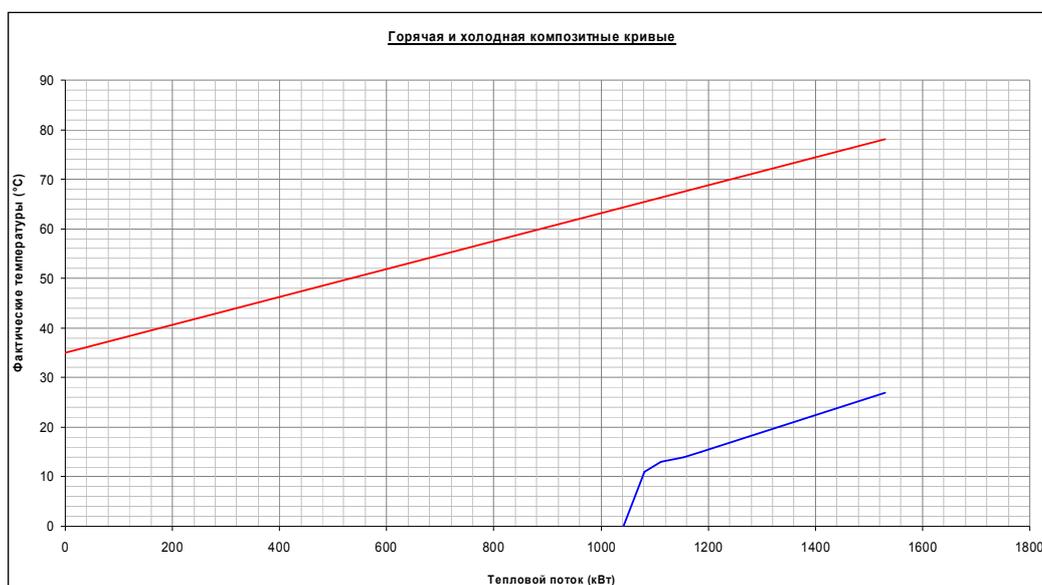


Рисунок 2 – Горячие и холодные композитные кривые для потоков ледовых арен СПб ГБУ СШОР

Таблица 3 – Результаты пинч-анализа

Наименование	Величина
Горячий пинч	78 °С (351 К)
Холодный пинч	68 °С (341 К)
Минимальные горячие утилиты	0
Минимальные холодные утилиты	1042,21 кВт
Общая теплота горячих потоков	1530 кВт
Общая теплота холодных потоков	487,79 кВт
Степень интеграции	1
Теплота регенерации выше пинча	0
Теплота регенерации ниже пинча	487,79 кВт
Общая теплота регенерации	487,79 кВт

Результатами пинч-анализа установлено, что возможно регенерировать до 488 кВт теплоты.

Составлена система уравнений, являющаяся моделью интеграции тепловых процессов и позволяющая назначить соответствующие теплообменные связи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{i=n} Q_{гор i} - Q_{рег} = \sum_{j=1}^{j=m} U_{хол}; i \in Z \{1, 2, \dots, n\} j \in Z \{1, 2, \dots, m\} \\ \sum_{j=1}^{j=m} Q_{хол j} - Q_{рег} = \sum_{i=1}^{i=n} U_{гор}; i \in Z \{1, 2, \dots, n\} j \in Z \{1, 2, \dots, m\} \\ \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} Q_{гор i-j} = Q_{рег} \quad | T_{гор рег к i} - T_{хол рег к j} \geq \Delta T_{пинч}; i \in Z \{1, 2, \dots, n\}; j \in Z \{1, 2, \dots, m\} \\ \forall Q_{рег i-j} \leq Q_{i-j max} \end{array} \right. , (2)$$

где n – число горячих потоков (в рассматриваемом случае $n = 1$); m – число холодных потоков (в рассматриваемом случае $m = 3$); $Q_{рег}$ – общая теплота регенерации ($Q_{рег} = 487,79$ кВт); $Q_{рег i-j}$ – теплота регенерации, передаваемая от i -го горячего потока j -му холодному потоку, кВт; $U_{хол}$ – общая теплота холодных утилит ($U_{хол} = 1042,21$ кВт); $U_{гор}$ – общая теплота горячих утилит ($U_{гор} = 0$); $Q_{i-j max}$ – максимально возможная теплоты, которую может передавать i -ый горячий потока j -му холодному потоку, кВт.

Решением системы уравнений (2) является совокупность параметров $Q_{рег i-j}$ (таблицы 4, 5).

Таблица 4 – Определение типа потока

Название потока	Температура на входе, °С	Температура на выходе, °С	Теплоёмкость потока, кВт/К	Тепловой поток, кВт	Тип потока
Теплота сброса	78	35	35,6	1530	Горячий
Яма снеготаяния	0	15	3,6	54	Холодный
Подогрев грунта	11	14	11,3	33,8	Холодный
Отопление трибун	13	27	28,6	400	Холодный

Таблица 5 – Определение теплообменных связей

Температура на входе горячей стороны, °С	Температура на выходе горячей стороны, °С	Название горячего потока	Тепловой поток, кВт	Название холодного потока	Температура на входе холодной стороны, °С	Температура на выходе холодной стороны, °С
Выше пинча						
Ниже пинча						
78	66,8	Теплота сброса	400	Отопление трибун	13	27
66,8	65,3	Теплота сброса	54	Яма снеготаяния	0	15
65,2	64,3	Теплота сброса	33,8	Подогрев грунта	11	14
64,3	35	Теплота сброса	1042,2	Холодные утилиты		

Синтезом теплообменной сети (с использованием программы «Пинч анализ и теплообменная сеть» и данных таблицы 5) установлено, что для обеспечения максимально возможной теплоты регенерации, необходимо установить три рекуперативных теплообменных аппарата (мощностью 400, 54 и 34 кВт) с

одновременным сбросом в окружающую среду 1042 кВт тепла (через конденсатор используемой холодильной машины).

В третьей главе представлены результаты технико-экономического обоснования и внедрения усовершенствованной системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента тепловых машин в СПб ГБУ СШОР.

Технико-экономическое обоснование показало следующее:

- реализация системы утилизации теплоты конденсации позволит на ~ 70 % сократить долю сторонних источников тепла;
- увеличение энергетической эффективности собственных инженерных систем возможно достичь без существенных капитальных затрат при минимальных сроках внедрения и сокращении простоя оборудования;
- эксплуатационные затраты на отопление и электроэнергию от сторонних поставщиков возможно снизить более чем на 2,6 млн. рублей в год, а прямое тепловое загрязнение окружающей природной среды не менее чем на 1,4 ГВт в год.

После технико-экономического обоснования модернизации системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента, выполнено её внедрение (рисунки 3, 4) в систему вентиляции и кондиционирования воздуха СПб ГБУ СШОР.



Рисунок 3 – Врезка в систему утилизации теплоты конденсации рабочего агента и гидравлическую систему циркуляции теплоносителя тепловентиляторов ледовых арен: а) – врезка задвижки в трубопровод системы утилизации (поз.10 рис.3); б) – врезка задвижки в обратный трубопровод системы утилизации (поз.7 рис.3); в) – врезка в трубопровод подачи теплоносителя на тепловентиляторы (поз.13 рис.3); г) – врезка в обратный трубопровод теплоносителя от тепловентиляторов (поз.12 рис.3)

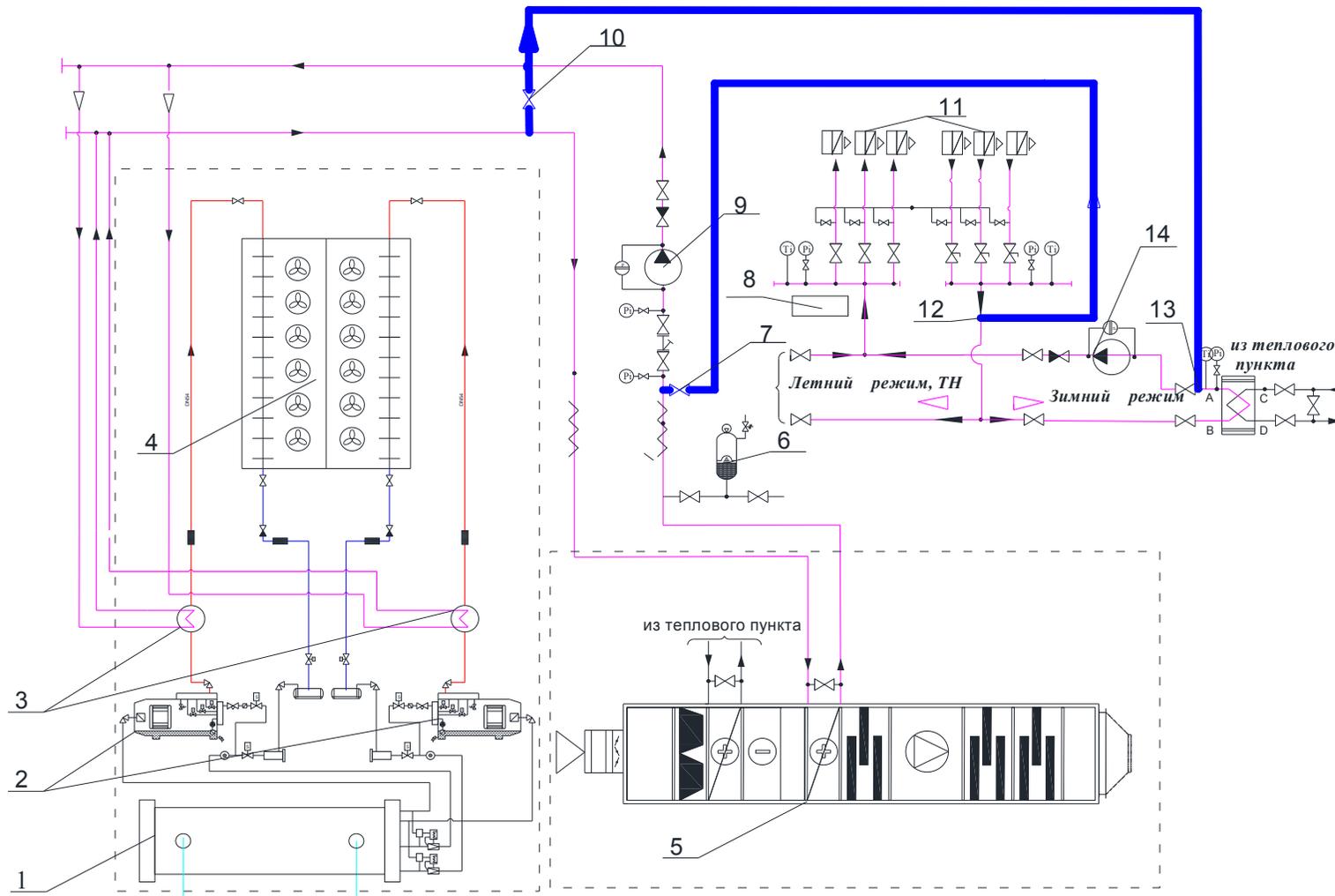


Рисунок 4 – Гидравлическая схема системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин СПб ГБУ СШОР после модернизации:

1 – испарительно-компрессорный агрегат BE/SMED-BT 2402 (Climaveneta, Италия); 2 – полугерметичные винтовые компрессоры CSH8573-140Y-40D (Bitzer, Германия); 3 – форконденсаторы CPS/S145HR (Alfa Laval, Италия); 4 – воздушные конденсаторы ECA12N9P10C2 (Friga-Bohn, Франция); 5 – кондиционеры K1, K2 (VTS Clima, Польша); 6 – мембранный расширительный бак Reflex N200 (Reflex, Германия); 7, 10 – задвижка чугунная с обрезиненным клином BV GGG50 (HEBEI CENTRAL, Китай); 8 – измерительный стенд; 9 – циркуляционный насос IL50/170-7 (WILO, Германия); 11 – тепловентиляторы VR2 (VOLCANO, Польша); 12,13 – врезка в трубопроводы; 14 - циркуляционный насос IPL80/140-4/2 (WILO, Германия)

Подвод приточно-вытяжных трубопроводов на ледовые арены выполнен на высоте более 6 метров от уровня пола (рисунок 5), что не позволяет поддерживать установленные параметры микроклимата, в соответствии с требованиями на уровне 1,5 метров от льда (+6...+12 °С), в виду чего использование низкопотенциального тепла будет осуществляться в системе воздушного отопления (рисунок 6), элементами которой являются тепловентиляторы (рисунок 7а), расположенные на требуемой высоте непосредственно в отапливаемых помещениях (рисунок 7б).



Рисунок 5 – Вентиляционный канал кондиционера К2

Рисунок 6 – Схема распределения воздушных потоков тепловентиляторов над ледовой ареной



а)



б)

Рисунок 7 – Водяной тепловентилятор VOLCANO VR2 (а) и его размещение в помещении СПб ГБУ СШОР по фигурному катанию на коньках (б)

Модернизация системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин выполнена при проведении планового профилактического ремонта и обеспечит полноценное функционирование ледовых арен СПб ГБУ СШОР с одновременным снижением эксплуатационных затрат на отопление и электроэнергию от сторонних поставщиков на величину ~2,6 млн. рублей в год.

В четвертой главе приведены результаты внедрения и исследования усовершенствованной системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента тепловых машин. Опытные данные для проведения расчетов и анализа результа-

тов, получены после разработки и установки вычислительного стенда (рисунок 8), включающего, в том числе, стационарный теплосчетчик Streamlux-SLS-720FE и тепловычислитель СПТ-940. Данные этих приборов непрерывно записывались и сохранялись на персональном компьютере.

Для определения величины полученного экономического эффекта, на входе и выходе из реализованной системы, с помощью приборов вычислительного стенда выполнялся контроль и расчетное определение следующих параметров:

– температуры теплоносителя t_1 (t_2), °С (датчиками температуры накладного типа ДТС3225-РТ100, предел допускаемых отклонений $\pm 0,30$ °С);



Рисунок 8 – Стенд для фиксации параметров работы усовершенствованной системы:
1 – место установки измерительного стенда (поз.8 рис.4); 2 – тепловычислитель СПТ-940;
3 – теплосчетчик Streamlux-SLS-720FE; 4 - датчик температуры накладного типа ДТС3225-РТ100; 5 - ультразвуковые датчики расхода ТМ-1-НТ

– давление теплоносителя на входе и выходе из системы P_1 (P_2), МПа (манометрами общетехническими стандартного исполнения ТМ-510Р.00);

– расход теплоносителя: V_1 , м³ (ультразвуковыми датчиками расхода (2 шт.) ТМ-1-НТ на Ду70-700 мм (диапазон температур: -30 °С... $+160$ °С, предел допустимой относительной погрешности при измерении объемного расхода $\pm 0,5$ %);

– разность температур на входе и выходе из системы Δt , °С;

– количество потребленного в системе тепла Q , Гкал.

Для определения средней расчетной теплоты потребления в усовершенствованной системе утилизации теплоты конденсации (в системе воздушного отопления), использована следующая зависимость:

$$\sum_0^{24} Q_i = \frac{\sum_0^{24} V_i}{n} \frac{\sum_0^{24} T1_i}{n} - \frac{\sum_0^{24} T2_i}{n}, \quad (3)$$

где $\sum_0^{24} Q_i$ – расчетная теплота потребления за период i (рисунок 9);
 $\sum_0^{24} V_i / n$ – среднеарифметическое значение расхода теплоносителя за период i ;
 $\sum_0^{24} T1_i$ – среднеарифметическое значение температуры теплоносителя на выходе из системы за период i ; $\sum_0^{24} T2_i$ – среднеарифметическое значение температуры теплоносителя на входе в систему за период i (рисунок 10); 1000 – коэффициент перевода значений в Гкал.

Результаты анализа полученных данных, в случае полного отказа от использования тепла, поставляемого теплоснабжающей организацией в отопительный период, и отказа от теплового насоса в межотопительный период, представлены на диаграммах (рисунки 9–11). Диаграмма рисунка 5 иллюстрирует положительный эффект работы, выражающийся в стабильном использовании теплоты, полученной из системы утилизации, в системе воздушного отопления СПб ГБУ СШОР по фигурному катанию на коньках.

Диаграмма рисунка 10 иллюстрирует разницу температур теплоносителя на входе и выводе из системы, а диаграмма рисунка 11 – изменение температуры теплоносителя на входе в систему.

Изменение параметров, представленных на диаграммах (за рассматриваемый период), позволяет сделать вывод о том, что применение системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента:

- позволяет стабильно получать теплоноситель с температурой 35–40 °С, которая оптимальна для поддержания микроклимата в отапливаемых помещениях;
- подтверждает возможность отказа от использования тепла, поставляемого теплоснабжающей организацией, в системе воздушного отопления, в пользу исследуемой системы, позволяющей полностью обеспечить отапливаемые помещения требуемым количеством тепла.

Сравнением фактических затрат с результатами технико-экономических расчетов (таблица 3) подтверждено, что реализация проекта позволяет на ~70 % сократить долю сторонних источников тепла. В то же время, увеличение энергетической эффективности собственных инженерных систем достигается без существенных капитальных затрат при минимальных сроках внедрения и сокращении сроков простоя оборудования.

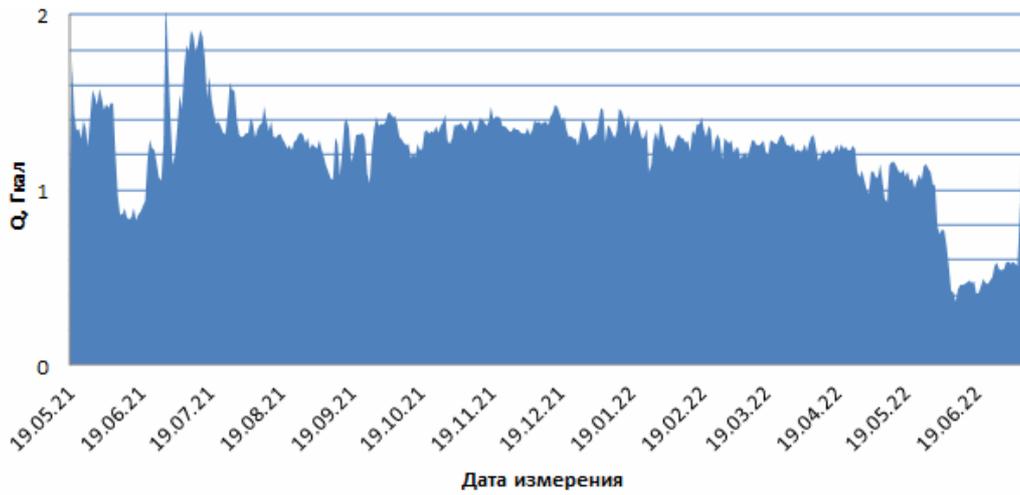


Рисунок 9 – Изменение количества потребления тепла в системе воздушного отопления ледовых арен (по месяцам за рассматриваемый период Q), Гкал



Рисунок 10 – Величина отклонения разницы температур dt ($^{\circ}\text{C}$) на входе и выходе из системы (по месяцам за рассматриваемый период)

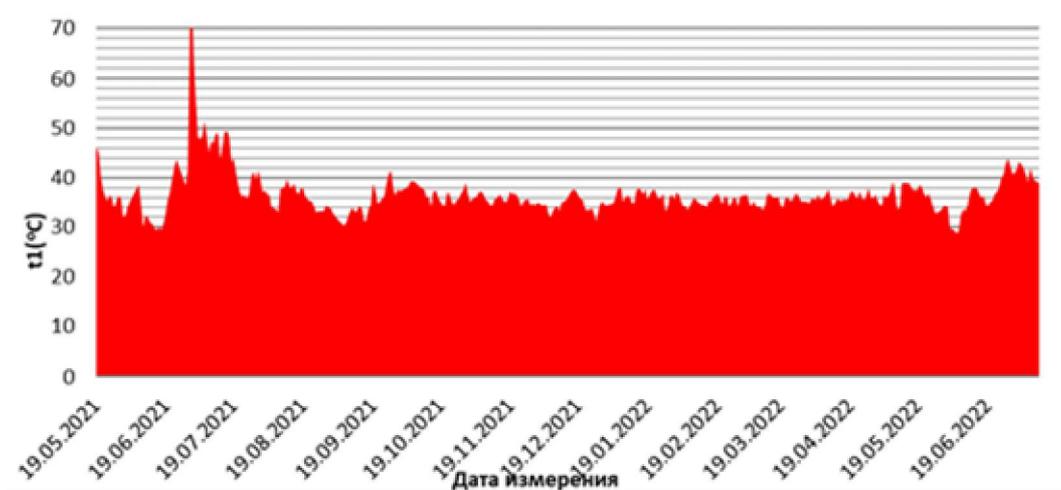


Рисунок 11 – Изменение температуры прямой воды t_1 ($^{\circ}\text{C}$) в системе утилизации теплоты конденсации рабочего агента (по месяцам за рассматриваемый период)

Таблица 3 – Коммунальные затраты системы воздушного отопления ледовых арен до и после внедрения системы утилизации теплоты

	Наименование затрат	Затраты, определенные расчетным путем, руб.	Фактические затраты, руб.	Экономия, руб.
До внедрения системы утилизации	Тепло для системы воздушного отопления ледовых арен, полученное от теплоснабжающей организации	1 920 000	1 235 654	0
	Электрическая энергия для теплового насоса системы воздушного отопления	684 064	1 225 565	0
	Итого:	2 604 064	2 461 219	
	Разница между расчетными и фактическими значениями	142 845		
После внедрения системы утилизации	Полезно использовано в системе воздушного отопления 496,3157 Гкал/год (данные исследовательского стенда) (Стоимость 1 Гкал = 3050 руб.)	0	0	1 513 763
	Электрическая энергия для теплового насоса системы воздушного отопления	0	0	1 225 565
	Электрическая энергия для циркуляционного насоса системы воздушного отопления	278 693	278 693	0

Результатами внедрения усовершенствованной системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента тепловых машин явилось следующее:

1. Подтверждена возможность отказа от использования тепла, поставляемого теплоснабжающей организацией, в системе воздушного отопления СПб ГБУ СШОР, в пользу использования системы утилизации теплоты конденсации, что, в том числе, обеспечивает независимость от сторонних поставщиков энергоресурсов.

2. Снижение платы за потребленное тепло на 2,6 млн. рублей в год, а также сокращение коммунальных платежей за электроэнергию в виду отказа от использования теплового насоса.

В таблице 4 приведены данные приборов учета измерительного стенда за период с июля 2021 года по июль 2022 года, по которым можно сделать вывод о использовании теплоты конденсации в системе воздушного отопления ледовых арен. В результате в среднем за месяц полезно использовано ~45,85 Гкал тепла, что в денежном выражении соответствует ~140 тыс.руб. экономии в месяц за коммунальные платежи, в сравнении с поставкой тепловой энергии теплоснабжающей организацией.

Полные данные (за все время проведения исследования), с учетом остановки части холодильных машин в связи с плановой сплавкой двух ледовых арен, приведены в таблице 5.

Таблица 4 – Данные приборов учета измерительного стенда

Месяц	t1 (°C)	t2 (°C)	dt (°C)	V1 (м ³)	Q (Гкал)	Q _{среднее} (Гкал/мес.)	Стоимость 1 Гкал (руб.)	Средняя экономия по теплу в месяц (руб.)
01.09.2022	41,5	38,9	2,6	16 384,6	42,5	45,9	3 050	139 854
01.10.2022	32,7	30,0	2,7	17 369,0	46,6			
01.11.2022	34,7	32,3	2,4	16 384,6	39,9			
01.12.2022	35,2	32,0	3,2	17 396,0	55,7			
01.01.2023	35,6	32,6	3,0	15 654,0	46,9			
01.02.2023	35,7	32,7	3,1	15 665,5	47,8			
01.03.2023	36,3	33,3	3,1	16 855,0	51,3			
01.04.2023	36,8	33,7	3,1	17 162,3	53,3			
01.05.2023	37,7	34,6	3,1	17 381,8	53,5			
01.06.2023	25,9	24,7	1,2	16 735,7	20,5			
01.07.2023	34,0	32,7	1,3	17 444,9	21,9			
01.08.2023	37,9	35,0	2,9	16 862,4	48,1			
01.09.2023	41,3	38,0	3,4	17 364,1	58,2			
01.10.2023	34,6	31,4	3,2	17 428,4	55,6			

Таблица 5 – Результаты использования бросового тепла в системе воздушного отопления СПб ГБУ СШОР в период с 01.07.2021 по 31.10.2023 гг. (28 месяцев) с учетом паспортной погрешности приборов учета

Величина допустимых отклонений приборов учета	dt (°C)	Общий расход воды V1, (м ³)	Использованное тепло Q, (Гкал)	Стоимость 1 Гкал, руб.	Общая экономия по теплу, руб. за период	Средняя экономия по теплу, руб./год
+0,3 °C (температура) +0,5 % (расход)	2,7 (+0,3 °C)	476 994,5 (+0,5 %)	1 306,96	3 050	3 986 228	1 708 383 (+194 620)
-0,3 °C (температура) -0,5 % (расход)	2,1 (-0,3 °C)	472 248,3 (-0,5 %)	1 010,61	3 050	3 082 360	1 321 011 (-192 752)
Среднее арифметическое значение	2,4	474 621,4	1 158,79	3 050	3 534 294	1 514 697
По показаниям приборов учета	2,4	474 621,4	1 158,07	3 050	3 532 114	1 513 763

Из данных таблицы 5, собранных с модернизированной системы при помощи приборов учета, можно сделать вывод о хорошем совпадении величины экономии с данными технико-экономического обоснования (таблица 3). Величина стандартного отклонения величины экономического эффекта (с учетом паспортной погрешности приборов измерения температуры и расхода) составляет ±190 тыс. рублей в год.

В заключении представлены основные выводы по работе:

1. Предложена оптимизация схемы утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин путем организации воздушного отопления в Санкт-Петербургском государственном бюджетном учреждении Спортивная школа олимпийского резерва по фигурному катанию на коньках.

2. Выполнено моделирование теплообменных процессов и синтез теплообменной сети (с одновременным анализом экстрагированных потоков по пинч-технологии) на основе разработанной математической модели интеграции тепловых процессов, результаты которого позволяют назначить теплообменные связи. Технико-экономическое обоснование новой схемы подтверждает ее применимость для повышения энергетической эффективности компрессорно-испарительных агрегатов с конденсаторами воздушного охлаждения, используемых для намораживания ледового покрытия.

3. Реализация предложенной системы утилизации теплоты конденсации рабочего агента холодильных машин на действующем технологическом оборудовании, позволила примерно на 70% сократить долю сторонних источников тепла, а увеличение энергетической эффективности собственных инженерных систем достигнуто без существенных капитальных затрат при минимальных сроках внедрения и сокращении простоя оборудования (менее 1 месяца).

4. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных до и после внедрения системы, показал снижение эксплуатационных затрат на отопление и электроэнергию от сторонних поставщиков более чем на 2,6 млн. рублей в год; сокращение непосредственных тепловых выбросов в окружающую среду не менее чем на 1,4 ГВт в год.

5. Реализованные и проверенные на практике технические решения могут использоваться при проектировании, новом строительстве и модернизации существующего технологического оборудования объектов с постоянной работой холодильных машин.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Агапов Д.С., Картошкин А.П., Калютник А.А., Кондрашов А.В. Совершенствование пинч-технологии для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов с учётом их локализации. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023; 25(5):115-125. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-115-125>
2. Кондрашов А.В., Тринченко А.А. Система утилизации теплоты конденсации тепловых машин. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023;25(6):67-77. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-67-77>
3. Kondrashov, A.; Trinchenko, A. Reducing utility bills through the introduction of energy efficient systems; 2022; Construction of Unique Buildings and Structures; 102 Article No 10202. [DOI 10.4123/CUBS.102.2](https://doi.org/10.4123/CUBS.102.2)
4. А.В. Кондрашов, А.А. Тринченко. Система утилизации теплоты конденсации холодильных машин / Современные технологии и экономика в энергетике: Мат-лы межд-ной науч.-практич. конф., СПб., 27 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 267-269. – EDN OGIVPM
5. А.В. Кондрашов, А.А. Тринченко. Внедрение и исследование параметров работы энергоэффективных инженерных систем с единым контуром тепловых машин. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов Двадцать восьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 17–19 марта 2022 года. – Москва: ООО "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2022. – С. 524. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48312449>
6. Aleksey.V. Kondrashov, Aleksey A. Trinchenko. Implementation and research of operating parameters of energy-efficient engineering systems with a single circuit of heat engines, 2022 IEEE. [DOI:10.1109/REEPE53907.2022.9731451](https://doi.org/10.1109/REEPE53907.2022.9731451)
7. A.V. Kondrashov; A.A. Trinchenko. Reducing of the Environment Thermal Pollution by Introducing Energy Efficient Technologies in Engineering Systems. IEEE Xplore. 2020. [DOI:10.1109/FarEastCon50210.2020.9271312](https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271312)
8. Aleksey Kondrashov, Mikle Egorov. Energy conservation and the use of the heat of refrigeration of ice arenas to heat the school of figure skating of St. Petersburg. Journal of Physics: Conference Series. 2019. [DOI:10.1088/1742-6596/1369/1/012063](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1369/1/012063)
9. Aleksey Kondrashov, Mikle Egorov etc. Comparative efficiency of applying heat pumps within the system of disposal of the condensation heat of heat machines for heating ice arenas. E3S Web of Conferences. Volume 140, Article number 05011 (2019). [DOI:10.1051/e3sconf/201914005011](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914005011)
10. Кондрашов А.В., Егоров М.Ю. Повышение эффективности инженерных систем с единым контуром тепловых машин. – В сборнике: Наука и инновации в технических университетах Материалы Двенадцатого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. 2018. С. 85–87. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36495402>