

Утилизация теплоты центров обработки данных с использованием тепловых насосов

Рецензия эксперта на статью получена
04.09.2025 [The expert review of the article
was received on September 4, 2025]

В современном мире стремительно развиваются компьютерные технологии, которые уже занимают весомую позицию в жизни каждого человека. С каждым годом приходится хранить и обрабатывать всё большие объёмы данных. Скорость процессов играет важную роль при достижении результата. Происходит рост количества центров обработки данных (ЦОД), работающих без остановок.

Центр обработки данных (ЦОД) — специализированный объект, представляющий собой связанную систему ИТ-инфраструктуры, инженерной инфраструктуры, оборудование (серверное и сетевое), части которых размещены в здании или помещении, подключённом к внешним сетям, как инженерным, так и телекоммуникационным. Дата-центры исполняют функции обработки, хранения и распространения информации. ЦОД обеспечивает бесперебойный контроль работоспособности приложений и устройств посредством систем охлаждения, питания и безопасности, необходимых для достижения максимальной эффективности и надёжности функционирования.

Удаление сбросной теплоты центров обработки данных является одним из основных аспектов корректного проектирования объектов подобного типа. Процесс удаления теплоты необходим для поддержания оптимальной температуры внутри помещений ЦОД, а также для минимизации рисков выхода из строя оборудования.

Центры обработки данных включают системы охлаждения, состоящие из кондиционеров, вентиляторов, термостатов

Удаление сбросной теплоты ЦОД является одним из основных аспектов корректного проектирования объектов подобного типа. Процесс удаления теплоты необходим для поддержания оптимальной температуры внутри ЦОД

и т.д. Они удаляют избыточную теплоту, генерируемую оборудованием (серверы, маршрутизаторы и т.д.), а также ту теплоту, которое выделяют люди.

Существует несколько способов утилизации сбросной теплоты:

- геотермальное охлаждение;
- технологии «холодного хранения» — избыточная теплота идёт на обогрев здания или на обеспечение его горячим водоснабжением;
- использование тепловых насосов.

Рассмотрим применение теплонасосных установок.

В принципиальных схемах утилизационных установок используют теплообменники-теплоутилизаторы, которые применяются для передачи теплоты между средами. Они извлекают теплоту, возникающую в процессе производства, и используют её. В основном такие теплообменники применяют для снижения потребления энергии производства и повышения его энергоэффективности.

Утилизация сбросной теплоты ЦОД — важный шаг в повышении энергетической эффективности и уменьшении воздействия на окружающую среду.

УДК 620.97. Научная специальность: 2.4.5.

Утилизация теплоты центров обработки данных с использованием тепловых насосов

Михаил Юрьевич Егоров, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); **Эдуард Сергеевич Жилев**, магистр, НИУ «МЭИ»; **Алексей Олегович Кривицкий**, аспирант, НИУ «МЭИ»; **Нина Борисовна Демидова**, аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП); **Иван Иванович Коваленко**, к.ф.-м.н., доцент, СПбГУАП; **Станислав Станиславович Прошкин**, к.т.н., доцент, СПбГУАП; **Сергей Владимирович Соловьёв**, к.т.н., доцент, Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, МИРЭА — Российский технологический университет; **Анна Сергеевна Степашкина**, к.т.н., инженер, Zhejiang Lab (КНР); **Иван Анатольевич Щербатов**, к.т.н., доцент, НИУ «МЭИ»

Исследована утилизация сбросной теплоты центров обработки данных (ЦОД). Проанализированы методы утилизации вентиляционных выбросов и методы отвода теплоты от оборудования ЦОД. Рассмотрено оборудование утилизационных установок и критерии их энергетической эффективности. Обсуждается использование тепловых насосов, их типы, устройство и принципы организации рабочего процесса. Разработана принципиальная схема утилизационной установки с применением тепловых насосов. Проведён теплогидравлический расчёт теплообменника-утилизатора. Выполнены оценки потребления энергетических ресурсов утилизационной установкой, экономии топлива на источнике при утилизации сбросной теплоты.

Ключевые слова: центры обработки данных, охлаждение ИТ-оборудования, сбросная теплота, утилизация, тепловые насосы, экономия топлива.

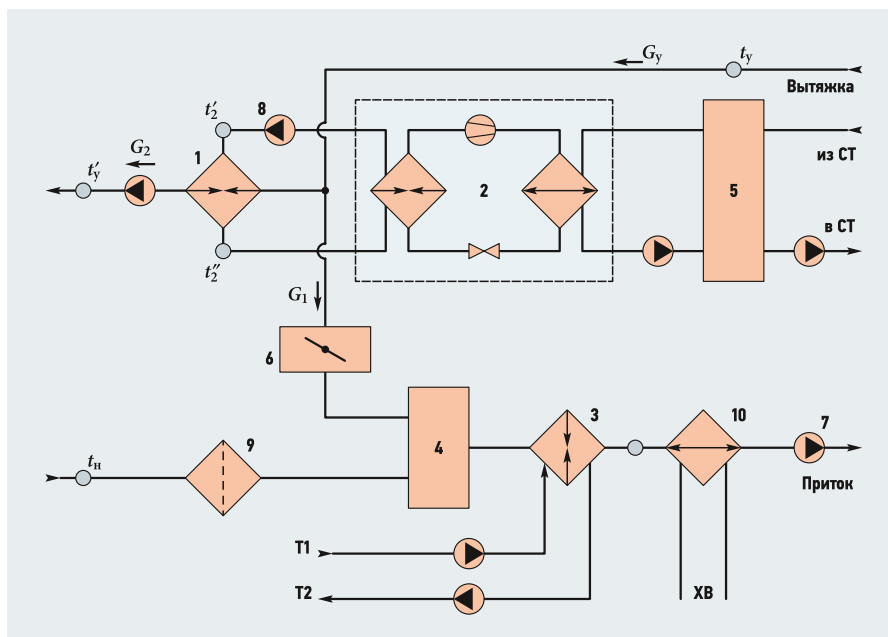
UDC 620.97. Scientific specialty number: 2.4.5.

Heat recovery of data centers using heat pumps

Mikhail Yu. Egorov, PhD (Engineering), Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Eduard S. Zhilyaev**, Master's degree, NRU "MPEI"; **Alexey O. Krivitsky**, PhD student, NRU "MPEI"; **Nina B. Demidova**, PhD student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SPbSUAI); **Ivan I. Kovalenko**, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, SPbSUAI; **Stanislav S. Proshkin**, PhD, Associate Professor, SPbSUAI; **Sergey V. Solovyov**, PhD (Engineering), Associate Professor, Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, MIREA — Russian Technological University (Moscow); **Anna S. Stepashkina**, PhD (Engineering), Engineer, Zhejiang Lab (China); **Ivan A. Shcherbatov**, PhD (Engineering), Associate Professor, NRU "MPEI"

The utilization of waste heat from data centers has been investigated. The methods of disposal of ventilation emissions and methods of heat removal from data center equipment are analyzed. The equipment of recycling plants and criteria of their energy efficiency are considered. The use of heat pumps, their types, design, and principles of workflow organization are discussed. A schematic diagram of a recycling plant using heat pumps has been developed. The thermohydraulic calculation of the heat exchanger-utilizer is carried out. Estimates of the consumption of energy resources by the recycling plant and fuel savings at the source during the disposal of waste heat have been performed.

Keywords: data processing centers, cooling of IT equipment, waste heat, recycling, heat pumps, fuel economy.



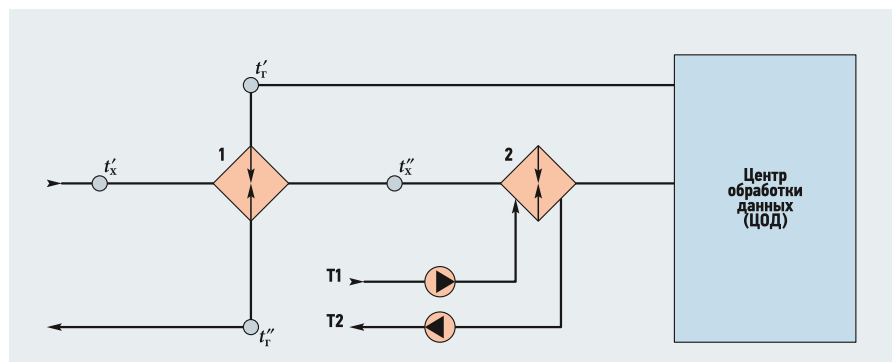
❖ **Рис. 1.** Схема утилизации теплоты вытяжного воздуха при помощи теплонасосной установки (1 — теплообменник-утилизатор; 2 — тепловой насос типа «антифриз — вода»; 3 — калорифер подогрева наружного воздуха; 4 — камера смешения; 5 — бак-аккумулятор; 6 — воздушная регулирующая заслонка; 7 — приточный вентилятор; 8 — циркуляционный насос; 9 — воздушный фильтр; 10 — воздухоохладитель)

Способы утилизации теплоты вентиляционных выбросов и применение утилизируемой теплоты

Теплоту можно сбрасывать и в окружающую среду, но этот подход имеет низкую энергетическую эффективность, поскольку её можно использовать различными способами, которые принесут значительную пользу, и важный энергетический ресурс не будет утерян. Необходимо учитывать, что проектируемые в настоящее время ЦОД имеют значительные размеры и вмещают крупные машины, выделяющие теплоту.

Оценка энергоэффективности действующих ЦОД и анализ потенциала улавливания отработанной теплоты были проведены в Финляндии [1–3]. Установлено, что 97% потребляемой электроэнергии можно использовать в качестве отработанной теплоты. Следовательно, теплота, удаляемая из ЦОД мощностью 1 МВт, работающего на половине номинальной нагрузки, способна покрыть потребность в теплоте для 30 тыс. м² нежилых зданий ежегодно. Анализ повторного использования сбросной теплоты ЦОД для отопления спа-салонов и коттеджей северной части Финляндии показал, что отработанная теплота практически полностью покрывает потребность в тепловой мощности на площади 60 тыс. м².

Сравнение двух вариантов охлаждения ЦОД в здании Futura в Ювяскюля (центральная часть Финляндии) показало, что использование сочетания автономного охлаждения с тепловыми насосами при-



❖ **Рис. 2.** Схема утилизации теплоты вытяжного воздуха при помощи теплообменника-утилизатора (1 — теплообменник-утилизатор; 2 — калорифер подогрева наружного воздуха)

водит к экономии €280 тыс. в течение 20 лет по сравнению с использованием установок естественного охлаждения и холодильных машин.

Выделяют несколько способов утилизации теплоты вентиляционных выбросов:

- использование теплонасосных установок (рис. 1);
- применение теплообменников (рис. 2);
- использование конденсационных отопительных котлов;
- передача теплоты вытяжного воздуха к приточному с применением схемы с промежуточным контуром и теплообменником с выпадением влаги.

В тепловых насосах наружный воздух подогревает промежуточный теплоноситель — антифриз. При использовании теплового насоса необходимо учитывать длительность периода, за который рассчитывается экономия. Он ограничен температурой наружного воздуха +8°C, то есть длительностью отопительного периода. Его можно расширить на весь год,

учитывая то обстоятельство, что в летнее время тепловой насос будет работать в режиме охлаждения воздуха [2].

Применять утилизируемую теплоту можно различными способами. Зачастую теплота используется для обогрева помещений и подогрева воды. Это помогает уменьшить затраты на отопление и повысить энергетическую эффективность зданий.

Оборудование утилизационных установок

Утилизационные установки ЦОД содержат оборудование, которое помогает эффективно использовать тепловую энергию, выделяющуюся при работе серверов, устройств, ЭВМ и других элементов дата-центров [4].

Одним из основных компонентов являются теплообменники. В них воздух из серверных помещений используют для передачи теплоты другим теплоносите-

лям (зачастую воде) и её дальнейшего использования. В состав утилизационных установок могут входить:

- охладители;
- тепловые насосы;
- экономайзеры;
- приточные и вытяжные вентиляторы.

Комплектация утилизационных установок ЦОД зависит от условий эксплуатации и требований к энергоэффективности здания.

Из существующих методов отвода теплоты от оборудования центров обработки данных можно выделить:

- жидкостное охлаждение;
- использование теплообменных аппаратов;
- охлаждение наружным воздухом (фрикулинг) [5].

Фрикулинг — метод охлаждения воздуха в помещении с помощью наружного воздуха без применения холодильных установок, компрессоров и другого энергоёмкого оборудования.

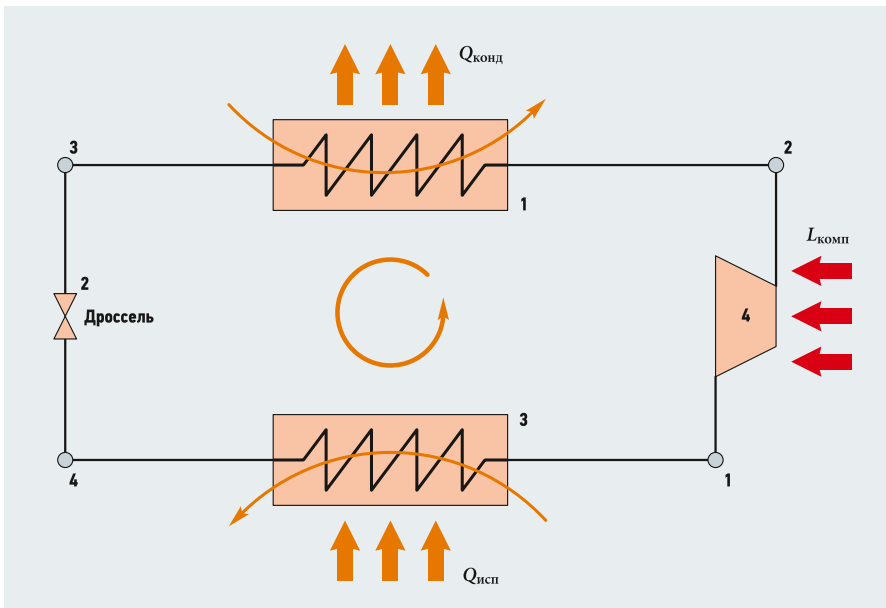


Рис. 3. Принципиальная схема теплового насоса (1 — конденсатор; 2 — дроссель; 3 — испаритель; 4 — компрессор)

Этот метод является менее энергозатратным, а также более эффективным и экологичным по сравнению с системами охлаждения, которые используют сжатый хладагент. При помощи вентиляторов и фильтров холодный наружный воздух забирается и направляется внутрь ЦОД, затем он используется для охлаждения оборудования серверов. Метод может сочетаться с традиционными системами охлаждения. При низких температурах целесообразно использовать фрикулинг, а в периоды, при которых температура воздуха окружающей среды становится чрезмерно высокой, переходить на традиционные системы охлаждения.

У фрикулинга имеются ограничения, связанные с климатическими условиями. Для ЦОД, где вырабатывается большое количество теплоты, только этой системы охлаждения может оказаться недостаточно для поддержания низкой температуры в помещении.

Критерии энергетической эффективности утилизации теплоты вторичных энергоресурсов.

Энергоэффективность утилизации теплоты вторичных энергоресурсов ЦОД можно определить, основываясь на факторах:

- КПД теплогенерирующих установок;
- окружающая среда;
- экономическая выгода;
- безопасность работы;
- надёжность;
- совместимость.

Уменьшение потребления энергии и снижение затрат на эксплуатацию можно получить, эффективно используя при утилизации теплоты вторичные энергоресурсы.

Принцип работы теплового насоса

Тепловой насос — устройство для переноса тепловой энергии от теплоисточника с низкой температурой к теплоприемнику с высокой температурой; перенос осуществляется с затратой энергии. Рабочие процессы подобны процессам в холодильных машинах.

Принципиальная схема теплового насоса представлена на рис. 3, его цикл в T - S -диаграмме — на рис. 4.

Точка 1 — состояние сухого насыщенного пара, который образуется после полного испарения жидкого хладагента в испарителе. После этого происходит сжатие хладагента в компрессоре с резким повышением давления, представленным на диаграмме процессом 1–2. Перегретый

пар (точка 2) подается в конденсатор, где он охлаждается до сухого насыщенного состояния, а затем полностью конденсируется (точка 3), отдавая тепловую энергию. Затем хладагент в жидком состоянии проходит через дросселирующее устройство, где его давление и температура понижаются (процесс 3–4). Процесс 3–4 является изохальным, так как он проходит практически адиабатно. В процессе 4–1 происходит кипение хладагента в испарителе, он получает теплоту низкопотенциального источника [6].

Тепловая энергия для цикла отбирается из окружающей среды, для работы компрессора по перемещению хладагента необходима электрическая энергия. Следовательно, необходимости расходовать энергию на подогрев или охлаждение нет. Тепловые насосы имеют высокую энергоэффективность, так как энергия, полученная из окружающей среды, используется для передачи теплоты

Тепловая энергия для цикла отбирается из окружающей среды, для работы компрессора по перемещению хладагента необходима электрическая энергия. Следовательно, необходимости расходовать энергию на подогрев или охлаждение нет.

Тепловые насосы имеют высокую энергоэффективность, так как энергия, полученная из окружающей среды, используется для передачи теплоты, а не для её производства.

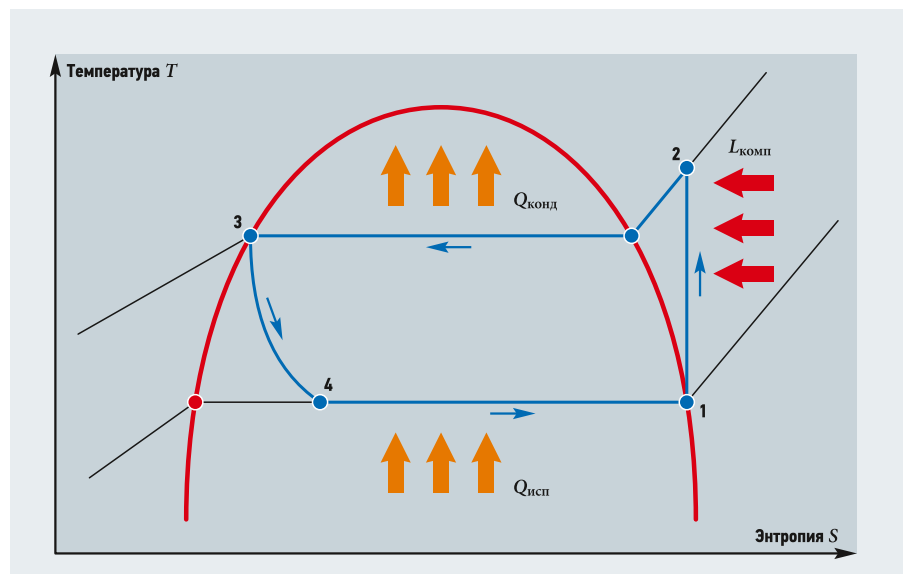


Рис. 4. Термодинамический цикл теплового насоса в T - S -диаграмме (1–2 — сжатие в компрессоре; 2–3 — отвод теплоты к потребителю; 3–4 — расширение в дросселе; 4–1 — подвод теплоты от низкопотенциального источника)



❖ Вентиляционные выбросы относятся к вторичным энергоресурсам и являются надёжным источником «бросовой» теплоты, особенно в случае выбросов от промышленных производств

Источники низкотемпературной теплоты и типы тепловых насосов

Источники низкотемпературной теплоты — источники с низкой температурой, которые могут использоваться для работы тепловых насосов.

В качестве низкопотенциальных (низкотемпературных) источников теплоты могут выступать [6]:

1. Вторичные энергетические ресурсы:

- вентиляционные выбросы;
- «серые» канализационные стоки;
- технологические процессы.

2. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии:

- окружающий воздух;
- грунтовые и геотермальные воды;
- водоёмы и природные водные потоки;
- солнечная энергия;
- поверхностные и более глубокие слои грунта.

Типы тепловых насосов

Первый критерий, по которому можно разделить тепловые насосы — циклы и схемы работы:

1. Компрессионные:

- газомкомпрессионные (ГТН);
- пароккомпрессионные (ПТН);

2. Сорбционные:

- абсорбционные (АБТН);
- адсорбционные (АДТН).

По принципу взаимодействия рабочих тел тепловые насосы бывают [6]:

- открытого цикла;
- закрытого цикла.

По режиму температур тепловые насосы подразделяются на:

- низкотемпературные (могут работать при температуре ниже +50 °С);
- среднетемпературные (от +50 до +80 °С);
- высокотемпературные (выше +80 °С).

Выбор типа насоса по температуре зависит от требуемой температуры в здании, вида системы отопления и других факторов.

По виду теплоносителя в контурах [6]:

- «грунт — вода»;
- «грунт — воздух»;
- «вода — вода»;
- «вода — воздух»;
- «воздух — вода»;
- «воздух — воздух»;
- «лёд — вода».

Производительность также относится к критериям, по которым можно классифицировать тепловые насосы на виды:

- бытовые (малые, 5–20 кВт);
- промышленные (средние, 20–600 кВт);
- большие (от 1 МВт и выше).

Разработка принципиальной схемы утилизации теплоты

Рассмотрим систему, представленную на рис. 1. Вытяжной воздух является источником низкопотенциальной теплоты для теплового насоса типа «антифриз — вода». Чтобы утилизировать сбросную теплоту ЦОД, необходимо использование теплообменного аппарата, который встраивается в вытяжной воздуховод системы вентиляции дата-центра. Теплота от вытяжного воздуха с помощью промежуточного

теплоносителя (антифриза) передаётся испарителю теплового насоса.

Работу системы вентиляции ЦОД можно разделить на три режима. Режим №1 имеет место при наружной температуре $t_n < +18^\circ\text{C}$. Приточный воздух, подаваемый на охлаждение, необходимо подогревать. Подогрев происходит за счёт смешения наружного и части удаляемого воздуха в камере смешения. В режиме работы №2, при $+18^\circ\text{C} < t_n < +27^\circ\text{C}$, удаляемый воздух полностью направляется в теплообменник-теплоутилизатор. Режим №3 наступает при $t_n > +27^\circ\text{C}$. В этом режиме необходимо охлаждение приточного воздуха, который удаляется и подаётся в теплообменник-теплоутилизатор.

Источники низкотемпературной теплоты — это источники с низкой температурой, которые могут использоваться для работы тепловых насосов. В качестве низкопотенциальных (низкотемпературных) источников теплоты могут выступать как вторичные энергетические ресурсы, так и нетрадиционные ВИЭ

В первом режиме теплота разделяется на две части: первая обеспечивает нужды ЦОД, а вторая идёт внешнему потребителю. В других режимах весь расход удаляемого воздуха G_y направляется на охлаждение в теплообменнике-утилизаторе.

Конструктивный расчёт теплообменника-теплоутилизатора

Исходные данные:

- горячий теплоноситель — воздух: $t_1' = +27^\circ\text{C}$, $t_1'' = +20^\circ\text{C}$, $G_1 = 166$ тыс. м³/ч;
- холодный теплоноситель — вода: $t_2' = +10^\circ\text{C}$, $t_2'' = +13^\circ\text{C}$;
- относительная влажность воздуха на входе в теплообменник $\phi' = 70\%$.

Результаты расчёта водяного воздухоохладителя с влаговыведением приведены в табл. 1.

❖ Результаты проектного расчёта водяного воздухоохладителя с влаговыведением табл. 1

Параметр	Величина
Тепловая мощность аппарата, кВт	770,774
Фактическая площадь поверхности теплообмена, м ²	79,394
Степень оребрения	12,205
Запас по площади, %	23,063
Количество труб, общее / в ряду / рядов / в одном ходе	150 / 25 / 6 / 6
Количество ходов	25
Габаритные размеры теплообменной матрицы (ш×в×г), мм	5200×1632×230,4
Падение давления, по воздуху / по воде, кПа	1,9 / 1518

Расчёт потребления энергоресурсов утилизационной установкой

Для того, чтобы рассчитать годовое количество теплоты, воспользуемся графиком числа часов средней температуры наружного воздуха (табл. 2).

Расход приточного воздуха определяется по формуле:

$$G_{\text{п}} = \frac{\Delta Q}{c_{\text{п}}(t_{\text{г}} - t_{\text{п}})}, \quad (1)$$

где ΔQ — тепловая мощность, поступающая в помещение от оборудования ЦОД (на уровне 50 % от электрической мощности ЦОД), $\Delta Q = 500$ кВт.

Уравнение теплового баланса для камеры смешения:

$$G_1 c_{\text{п}} t_{\text{г}} + G_{\text{п}} c_{\text{п}} t_{\text{н}} = G_{\text{п}} c_{\text{п}} t_{\text{п}}. \quad (2)$$

Уравнения материального баланса по воздуху:

$$G_1 + G_{\text{п}} = G_{\text{п}}; \quad (3)$$

$$G_{\text{г}} = G_{\text{п}}.$$

Из уравнений (2) и (3) следует:

$$G_1 c_{\text{п}} t_{\text{г}} + G_{\text{п}} c_{\text{п}} t_{\text{н}} - G_1 c_{\text{п}} t_{\text{п}} = G_{\text{п}} c_{\text{п}} t_{\text{п}}.$$

Расход удаляемого воздуха через камеру смешения:

$$G_{1i} = G_{\text{п}} \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{ни}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{ни}}}. \quad (4)$$

Тепловая мощность, передаваемая наружному воздуху в процессе смешения при текущей температуре наружного воздуха $t_{\text{ни}}$:

$$Q_i = G_1 c_{\text{п}} (t_{\text{г}} - t_{\text{п}}) = G_{\text{п}} \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{ни}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{ни}}} c_{\text{п}} (t_{\text{г}} - t_{\text{п}}). \quad (5)$$

Максимальный расход воздуха в системе утилизации теплоты:

$$G_{\text{п}} = \frac{\Delta Q}{c_{\text{п}}(t_{\text{г}} - t_{\text{п}})} = 55,23 \text{ кг/с}.$$

Расход воздуха через теплообменник-утилизатор:

$$G_{2i} = G_{\text{п}} \left(1 - \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{ни}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{ни}}} \right) = G_{\text{п}} \frac{t_{\text{г}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{ни}}}. \quad (6)$$

Рассчитаем экономию тепловой энергии за год (табл. 3) при применении рециркуляции вытяжного воздуха за период времени с температурой наружного воздуха ниже $+18^\circ\text{C}$:

$$\Delta Q_{\text{р}} = \sum_{i=5}^n Q_i \tau_i = 1,9 \text{ ГВт}\cdot\text{ч}.$$

Оценим мощность, передаваемую внешнему потребителю посредством теплообменника-утилизатора и теплового насоса (табл. 4).

Тепловая мощность [кВт], передаваемая в теплообменнике-утилизаторе при темпе-

... График числа часов средней температуры наружного воздуха в Московском регионе табл. 2

i	$t_{\text{н}}^k, ^\circ\text{C}$	$\tau_i, \text{ч}$	$t_{\text{ни}}^{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$
1	+27...+30	153	28,1
2	+24...+27	333	25,3
3	+21...+24	615	22,4
4	+18...+21	723	19,4
5	+15...+18	774	16,6
6	+12...+15	813	13,5
7	+9...+12	606	10,4
8	+6...+9	564	7,4
9	+3...+6	468	4,4

i	$t_{\text{н}}^k, ^\circ\text{C}$	$\tau_i, \text{ч}$	$t_{\text{ни}}^{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$
10	0...+3	684	1,4
11	-3...0	729	-1,6
12	-6...-3	801	-4,4
13	-9...-6	765	-7,5
14	-12...-9	426	-10,4
15	-15...-12	192	-13,5
16	-18...-15	69	-16,4
17	-21...-18	42	-19,0
18	-24...-21	3	-21,1

... Расход удаляемого воздуха через камеру смешения и тепловая мощность, передаваемая наружному воздуху в процессе смешения с наружным воздухом табл. 3

Режим №1: $t_{\text{н}} < 18^\circ\text{C}$					
$t_{\text{г}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ни}}, ^\circ\text{C}$	$Q_i, \text{кВт}$	$G_{1i}, \text{кг/с}$	$G_{2i}, \text{кг/с}$
+27	+18	16,6	67,25	7,43	47,80
+27	+18	13,5	166,52	18,94	36,82
+27	+18	10,4	228,71	25,28	29,94
+27	+18	7,4	270,17	29,87	25,36
+27	+18	4,4	300,62	33,24	21,99
+27	+18	1,4	323,93	35,81	19,42
+27	+18	-1,6	342,35	37,80	17,38

Режим №1: $t_{\text{н}} < 18^\circ\text{C}$					
$t_{\text{г}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ни}}, ^\circ\text{C}$	$Q_i, \text{кВт}$	$G_{1i}, \text{кг/с}$	$G_{2i}, \text{кг/с}$
+27	+18	-4,4	356,37	39,40	15,83
+27	+18	-7,5	369,24	40,80	14,41
+27	+18	-10,4	379,34	41,93	13,29
+27	+18	-13,5	388,54	42,96	12,27
+27	+18	-16,4	395,96	43,78	11,45
+27	+18	-19,0	401,82	44,42	10,81
+27	+18	-21,1	406,10	44,90	10,33

... Расчёт передаваемой мощности $Q_{\text{ни}}$ в теплообменнике-утилизаторе и мощности, передаваемой внешнему потребителю $Q_{\text{ки}}$, в зависимости от температуры $t_{\text{ни}}^{\text{ср}}$ табл. 4

i	$t_{\text{н}}^k, ^\circ\text{C}$	$\tau_i, \text{ч}$	$t_{\text{ни}}^{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$G_{2i}, \text{кг/с}$	$Q_{\text{ни}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{ки}}, \text{кВт}$	$P_{\text{ТН}i}, \text{кВт}$
5	+15...+18	774	16,6	47,8	336,24	470,73	134,5
6	+12...+15	813	13,5	36,82	259	362,6	103,6
7	+9...+12	606	10,4	29,94	210,66	294,92	84,26
8	+6...+9	564	7,4	25,36	178,41	249,77	71,36
9	+3...+6	468	4,4	21,99	154,73	216,62	61,89
10	0...+3	684	1,4	19,42	136,6	191,24	54,64
11	-3...0	729	-1,6	17,38	122,27	171,18	48,91
12	-6...-3	801	-4,4	15,83	111,37	155,92	44,55
13	-9...-6	765	-7,5	14,41	101,36	141,9	40,5
14	-12...-9	426	-10,4	13,29	93,5	130,9	37,4
15	-15...-12	192	-13,5	12,27	86,34	120,88	34,5
16	-18...-15	69	-16,4	11,45	80,57	112,8	32,23
17	-21...-18	42	-19,0	10,81	76	106,4	30,4
18	-24...-21	3	-21,1	10,33	72,7	101,78	29,1

ратуре наружного воздуха $t_{\text{ни}}^{\text{ср}} [^\circ\text{C}]$ промежуточному теплоносителю и испарителю теплового насоса:

$$Q_{\text{ни}} = Q_{\text{гв}} = G_{\text{п}} \frac{t_{\text{г}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{ни}}^{\text{ср}}} c_{\text{п}} (t_{\text{г}} - t_{\text{г}}). \quad (7)$$

Тепловая мощность [кВт], передаваемая с горячей водой внешнему потребителю в режиме вентиляции №1 [2]:

$$Q_{\text{ки}} = G_{\text{п}} \frac{t_{\text{г}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{ни}}^{\text{ср}}} c_{\text{п}} (t_{\text{г}} - t_{\text{г}}) \frac{\mu}{\mu - 1}, \quad (8)$$

где μ — коэффициент трансформации энергии теплового насоса при температуре промежуточного теплоносителя на входе в испаритель, $\mu = 3,5$.

Потребление электрической энергии (мощность) [кВт] тепловым насосом [2]:

$$Q_{\text{ТН}i} = \frac{Q_{\text{ки}}}{\mu} = G_{\text{п}} \frac{t_{\text{г}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{ни}}^{\text{ср}}} c_{\text{п}} (t_{\text{г}} - t_{\text{г}}) \frac{1}{\mu - 1}. \quad (9)$$

Количество тепла, передаваемого внешнему потребителю [кВт·ч] за период времени с температурой наружного воздуха ниже $+18^\circ\text{C}$ (индекс «1» означает режим вентиляции №1):

$$Q_1 = \sum_{i=5}^n Q_{\text{ки}} \tau_i = \quad (10)$$

$$= \sum_{i=5}^n G_{\text{п}} \frac{t_{\text{г}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{ни}}^{\text{ср}}} c_{\text{п}} (t_{\text{г}} - t_{\text{г}}) \frac{\mu}{\mu - 1} \tau_i;$$

$$Q_{\text{к5}} \tau_5 = 364,35 \text{ МВт}\cdot\text{ч}.$$

Количество электрической энергии, потребляемое тепловым насосом за рассматриваемый период времени (табл. 5):

$$P_1 = \sum_i^n G_{\pi} \frac{t_y - t_{\pi}}{t_y - t_{\pi}^{cp}} c_p (t_y - t_{y'}) \frac{1}{\mu - 1}; \quad (11)$$

$$Q_{\text{TH}i} \tau_i = \sum_i^n G_{\pi} \frac{t_y - t_{\pi}}{t_y - t_{\pi}^{cp}} c_p (t_y - t_{y'}) \frac{1}{\mu - 1}. \quad (12)$$

Для режима вентиляции №2 полагаем, что расход воздуха остаётся постоянным и равным 55,23 кг/с (табл. 6).

Из расхода приточного воздуха (1) найдём t_y при $t_{\pi} = t_{\pi}^{cp}$:

$$t_{yi} = \frac{\Delta Q}{c_p G_{\pi}} + t_{\pi}^{cp}; \quad (13)$$

$$t_{y2} = 34,3^{\circ}\text{C}.$$

Тепловая мощность, передаваемая внешнему потребителю в режиме вентиляции №2 при условии $t_{\pi}^{cp} = t_{\pi}$:

$$Q_{ki} = G_{\pi} c_p (t_y - t_{y'}) \frac{\mu}{\mu - 1}. \quad (14)$$

Количество теплоты, передаваемой внешнему потребителю [кВт·ч], за рассматриваемый период времени:

$$Q_2 = \sum_i^n Q_{ki} \tau_i = \sum_i^n G_{\pi} c_p (t_y - t_{y'}) \frac{\mu}{\mu - 1} \tau_i. \quad (15)$$

Количество электрической энергии, потребляемое тепловым насосом за рассматриваемый период времени:

$$P_2 = \sum_i^n G_{\pi} c_p (t_y - t_{y'}) \frac{1}{\mu - 1} \tau_i. \quad (16)$$

Расчёт экономии топлива на источнике при реализации утилизации сбросной теплоты

Для расчёта экономии топлива в условных единицах примем средние расходы условного топлива по стране:

$$b_Q = 0,1486 \text{ т.у.т/Гкал};$$

$$b_3 = 0,3445 \text{ кг у.т./кВт·ч}.$$

Экономия тепловой энергии за год при применении рециркуляции вытяжного воздуха за период времени с температурой наружного воздуха ниже +18 °С:

$$\Delta B_p = \Delta Q_p b_Q = 242,9 \text{ т.у.т}.$$

Экономия теплоты и затраты электрической энергии, потребляемой тепловым насосом при температуре наружного воздуха ниже +18 °С:

$$\Delta B_k = \Delta Q_k b_Q = 212,1 \text{ т.у.т};$$

$$\Delta B_{\text{TH}} = \Delta P_{\text{TH}} b_3 = 163,4 \text{ т.у.т}.$$

Экономия теплоты и затраты электроэнергии в режиме работы вентиляции №2:

$$\Delta B_k = \Delta Q_k b_Q = 177,2 \text{ т.у.т};$$

$$\Delta B_{\text{TH}} = \Delta P_{\text{TH}} b_3 = 136,59 \text{ т.у.т}.$$

Суммарная экономия топлива на источнике при реализации утилизации сброс-

... Расчёт количества теплоты, передаваемой внешнему потребителю, и количества электроэнергии, потребляемой тепловым насосом, в зависимости от температуры t_{π}^{cp} табл. 5

i	$t_{\pi}^k, ^{\circ}\text{C}$	$\tau_i, \text{ч}$	$t_{\pi}^{cp}, ^{\circ}\text{C}$	$Q_{ki}, \text{кВт}$	$P_{\text{TH}i}, \text{кВт}$	$Q_{ki} \tau_i, \text{МВт·ч}$	$P_{\text{TH}i} \tau_i, \text{МВт·ч}$
5	+15...+18	774	16,6	470,73	134,5	364,35	104,1
6	+12...+15	813	13,5	362,6	103,6	294,79	84,22
7	+9...+12	606	10,4	294,92	84,26	178,72	51,10
8	+6...+9	564	7,4	249,77	71,36	140,44	40,13
9	+3...+6	468	4,4	216,62	61,89	101,38	28,97
10	0...+3	684	1,4	191,24	54,64	130,8	37,37
11	-3...0	729	-1,6	171,18	48,91	124,79	35,65
12	-6...-3	801	-4,4	155,92	44,55	124,89	35,68
13	-9...-6	765	-7,5	141,90	40,50	108,55	31,00
14	-12...-9	426	-10,4	130,90	37,40	55,76	15,93
15	-15...-12	192	-13,5	120,88	34,50	23,21	6,63
16	-18...-15	69	-16,4	112,80	32,23	7,78	2,22
17	-21...-18	42	-19,0	106,40	30,40	4,47	1,28
18	-24...-24	3	-21,1	101,78	29,10	0,30	0,09
Итого Q_1 и P_1						1660,23	474,37

... Расчёт количества теплоты, передаваемой внешнему потребителю, и количества электрической энергии в режиме №2 табл. 6

i	$t_{\pi}^k, ^{\circ}\text{C}$	$\tau_i, \text{ч}$	$t_{\pi}^{cp}, ^{\circ}\text{C}$	$G_{\pi}, \text{кг/с}$	$t_y, ^{\circ}\text{C}$	$Q_{ki}, \text{кВт}$	$P_{\text{TH}i}, \text{кВт}$	$Q_{ki} \tau_i, \text{МВт·ч}$	$P_{\text{TH}i} \tau_i, \text{МВт·ч}$
2	+24...+27	333	25,3	55,23	34,3	1111,23	317,49	370	105,70
3	+21...+24	615	22,4	55,23	31,4	885,88	253,11	544,8	155,66
4	+18...+21	723	19,4	55,23	28,4	652,75	186,50	471,94	134,84
Итого Q_2 и P_2								1386,7	396,2

ной теплоты: $\sum \Delta B_k = 632,1$ т.у.т. Суммарная затрата энергии в условном топливе на источнике при реализации утилизации сбросной теплоты составит:

$$\sum \Delta B_{\text{TH}} = 299,9 \text{ т.у.т}.$$

Выводы

1. Рассмотрены процессы утилизации сбросной теплоты центров обработки данных с целью определения оптимальных способов её использования с повышенной энергетической эффективностью. Проанализированы перспективные методы утилизации вентиляционных выбросов: применение тепловых насосов и теплообменников-утилизаторов. Рассмотрены принципы отвода теплоты от оборудования центров обработки данных: жидкостное охлаждение, теплообменники и фрикулинг, а также оборудование утилизационных установок и критерии их энергетической эффективности.

2. Описано устройство и принципы организации рабочего процесса в тепловых насосах. Представлена принципиальная схема и их работа в виде T - S -диаграммы. Обсуждаются виды низкопотенциальных источников теплоты и типы теплонасосных установок.

3. Разработана принципиальная схема утилизационных установок с применением тепловых насосов. Выполнен расчёт теплообменника-утилизатора для заданных параметров теплоносителей.

4. Проведена оценка потребляемых утилизационной установкой энергетических ресурсов. Определена экономия топлива при реализации предложенного метода утилизации сбросной теплоты, составившая 632 тонн условного топлива. Затраты энергии при утилизации сбросной теплоты составляют 300 т.у.т. ●

1. Яковлев И.В., Авдокунин Н.В. Эффективность применения сбросного тепла центров обработки данных // Теплоэнергетика, 2023. №10. С. 55–64.
2. Яковлев И.В., Авдокунин Н.В. Утилизация теплоты вентиляционных выбросов центров обработки данных / Энергосбережение — теория и практика: Труды X Межд. школы-семинара молодых учёных и специалистов (19–23.10.2020, г. Москва). — Курск: ЗАО «Университетская книга», 2020. С. 104–109.
3. Яковлев И.В., Авдокунин Н.В. Перспективы и техническая реализация утилизации сбросной теплоты центров обработки данных / Энергосбережение — теория и практика: Труды XI Всеросс. конф. (10–14.10.2022, г. Москва). — М.: ЦПУ «Радуга», 2022. С. 95–101.
4. Асонов Д.А., Романова Т.Н. Утилизация теплоты ЦОД / Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: Мат. Межд. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, посвящённой памяти проф. Н.И. Данилова (Даниловские чтения) / Минобрнауки России. — Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2019. С. 34–37.
5. Яковлев И.В., Авдокунин Н.В., Горелов М.В. Экономия и затраты энергии при обеспечении тепловых режимов центров обработки данных, охлаждаемых наружным воздухом // Промышленная энергетика, 2025. №1. С. 41–49.
6. Тепловые насосы в современной промышленности и коммунальной инфраструктуре: информационно-методическое издание / Е.Г. Гапо, С.А. Козлов, В.С. Пузаков [и др.]. — М.: Изд-во «Перо», 2017. 204 с.

References — see page 80.

[Heat recovery of data centers using heat pumps. Pp. 38–44.](#)

Mikhail Yu. Egorov, PhD (Engineering), Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Eduard S. Zhilyaev**, Master's degree, NRU "MPEI"; **Alexey O. Krivitsky**, PhD student, NRU "MPEI"; **Nina B. Demidova**, PhD student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SPbSUA); **Ivan I. Kovalenko**, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, SPbSUA; **Stanislav S. Proshkin**, PhD, Associate Professor, SPbSUA; **Sergey V. Solovyov**, PhD (Engineering), Associate Professor, Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, MIREA — Russian Technological University (Moscow); **Anna S. Stepashkina**, PhD (Engineering), Engineer, Zhejiang Lab (China); **Ivan A. Shcherbatov**, PhD (Engineering), Associate Professor, NRU "MPEI"

1. I.V. Yakovlev, N.V. Avdokunin. *Effektivnost' primeneniya sbrosnogo tepla tsentrov obrabotki dannykh* [Efficiency of Using Waste Heat from Data Centers]. *Teploenergetika* ["Thermal Power Engineering" Magazine]. 2023. No. 10. Pp. 55–64. [In Russian]
2. I.V. Yakovlev, N.V. Avdokunin. *Utilizatsiya teploty ventilyatsionnykh vybrosov tsentrov obrabotki dannykh* [Utilization of Heat from Ventilation Emissions of Data Centers]. *Energoberezhenie — teoriya i praktika: Trudy X Mezhd. shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov* [Energy Saving — Theory and Practice: Proc. of the X International School-Seminar of Young Scientists and Specialists]. October 19–23, 2020; Moscow. Kursk. ZAO "Universitetskaya kniga" ["University Book", CJSC]. 2020. Pp. 104–109. [In Russian]
3. I.V. Yakovlev, N.V. Avdokunin. *Perspektivy i tekhnicheskaya realizatsiya utilizatsii sbrosnoy teploty tsentrov obrabotki dannykh* [Prospects and technical implementation of data center waste heat utilization]. *Energoberezhenie — teoriya i praktika: Trudy XI Vseross. konf.* [Energy saving — theory and practice: Proc. of the XI All-Russian conference]. October 10–14, 2022. Moscow. TsPU "Raduga" ["The Rainbow" Printing Services Center]. 2022. Pp. 95–101. [In Russian]
4. D.A. Asonov, T.N. Romanova. *Utilizatsiya teploty TsOD* [Data center heat utilization]. *Energo- i resursoberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyаемые istochniki energii. Atomnaya energetika: Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, posvyashchennoj pamyati prof. N.I. Danilova (Danilovskie chteniya)* [Energy and resource conservation. Energy supply. Alternative and renewable energy sources. Nuclear energy: Proc. of the International scientific and practical conference of students, graduate students, and young scientists dedicated to the memory of Professor N.I. Danilov ("The Danilov Readings")]. *Minobrazovaniya Rossii* [Ministry of Education of the Russian Federation]. Yekaterinburg. Izd-vo UrFU [Publishing House of the Ural Federal University]. 2019. Pp. 34–37. [In Russian]
5. I.V. Yakovlev, N.V. Avdokunin, M.V. Gorelov. *Ekonomiya i zatraty energii pri obespechenii teplovykh rezhimov tsentrov obrabotki dannykh, okhlazhdaemykh naruzhnym vozdukhom* [Energy savings and costs when providing thermal conditions for data processing centers cooled by outside air]. *Promyshlennaya energetika* ["Industrial Energy" Magazine]. 2025. No. 1. Pp. 41–49. [In Russian]
6. E.G. Gasho, S.A. Kozlov, V.S. Puzakov et al. *Teplovye nasosy v sovremennoy promyshlennosti i kommunal'noy infrastrukture: inf.-metod. izdanie* [Heat pumps in modern industry and municipal infrastructure: An information and methodological publication]. Moscow. Izd-vo "Pero" ["The Pen" Publishing House]. 2017. 204 p. [In Russian]