DOI: https://doi.org/10.17816/RF322838

Энергоэффективная система кондиционирования воздуха центра обработки данных

А.А. Жаров, Д.А. Веневцева, Г.И. Микита, В.А. Воронов, К.А. Апсит

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (научно-исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование: В настоящее время, в связи с бурным развитием цифровых технологий, требуются все большие мощности компьютерных вычислений, для чего строятся центры обработки данных (ЦОД), требующие порой потребляемые мощности, измеряемые в МВт. Для стабильной работы ЦОД в круглогодичном режиме, необходимо надежное инженерное обеспечение, включающее в себя системы кондиционирования воздуха (СКВ) круглогодичного использования с заданным уровнем надежности. Существует несколько традиционных способов охлаждения ЦОД: прецизионными кондиционерами на основе парокомпрессионных холодильных машин (ПКХМ), системами с промежуточным хладоносителем – так называемыми системами чиллер-фанкойлами. Однако, в современных условиях, когда требуемые от ЦОД мощности с каждым годом увеличиваются, а рамки по экологичности и энергоэффективности установок с каждым годом становятся жестче, возникает потребность в поиске новых более энергоэффективных и, в тоже время, экологически безопасных решений для охлаждения ЦОД.

Цель – сравнение предлагаемой энергоэффективной СКВ с комбинированным парокомпрессионным и косвенно-испарительным циклом с наиболее часто используемыми в центрах обработки данных и определить границы перехода между режимами работы предлагаемой СКВ на примере ЦОД, работающего в г. Москва.

Методы: Анализ существующих систем охлаждения ЦОД. Определение типового расчетного набора параметров наружного воздуха в рассматриваемом регионе. Расчётный сравнительный анализ энергопотребления предлагаемой и традиционных СКВ для ЦОД.

Результаты: В результате проделанной работы были освещены различные системы кондиционирования воздуха, применяемые в настоящее время для ЦОД: прецизионные кондиционеры и системы чиллер-фанкойлы. Были описаны основные составляющие каждой системы, достоинства и недостатки наблюдающиеся в процессе проектирования, монтажа, при пуско-наладочных работах, а также при дальнейшей эксплуатации систем. Предложена альтернативная комбинированная система кондиционирования воздуха, объединяющая ПКХМ и косвенно-испарительное охлаждение. Сравнительный анализ предложенной схемы и традиционных решений показал, что комбинированная система кондиционирования воздуха позволяет значительно сократить энергопотребление на кондиционирование ЦОД. Так в условиях московского региона предложенная система в течение года потребляет энергии в 2 раз меньше, чем система чиллер-фанкойлы со свободным охлаждением и в 2,5 раз меньше, чем система с прецизионными кондиционерами, работающими на традиционных парокомпрессионных циклах.

Заключение: Сравнительный анализ предлагаемой энергоэффективной СКВ с комбинированным парокомпрессионным и косвенно-испарительным циклом с наиболее часто используемыми СКВ в ЦОД подтвердил ее высокую энергоэффективность при большей экологической безопасности. Определены границы перехода между режимами работы предлагаемой СКВ на примере ЦОД, работающего в г. Москва, обеспечивающие высокую энергоэффективность и надежность работы.

Ключевые слова: центр обработки данных; система кондиционирования воздуха центра обработки данных; комбинированное парокомпрессионное и косвенно-испарительное охлаждение; свободное охлаждение; энергоэффективная и экологически безопасная система кондиционирования воздуха.

Как цитировать:
Жаров А.А., Веневцева Д.А., Микита Г.И., Воронов В.А., Апсит К.А. Энергоэффективная система кондиционирования воздуха центра обработки данных // Холодильная техника. 2021. Т. 110, № 2. С. 113–121. DOI: https://doi.org/10.17816/RF322838

Рукопись получена: 12.04.2023 **Рукопись одобрена:** 16.07.2023 **Опубликована онлайн:** 23.08.2023

ЭКО • ВЕКТОР

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2023

DOI: https://doi.org/10.17816/RF322838

Energy-efficient air conditioning system of a data processing center

Anton A. Zharov, Darya A. Venevceva, Guriy I. Mikita, Vladimir A. Voronov, Konstantin A. Apsit

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Currently, because of the rapid development of digital technologies, an increasing amount of computer computing power is required where data processing centers are built, which sometimes require power consumption in the megawatt range. For stable year-round operation of data centers, reliable engineering is required, which includes air conditioning systems (ACS) for year-round use with a given level of reliability. Several traditional methods of data center cooling are available, namely, precision air conditioners based on vapor compression refrigeration machines (PCRMs) and systems with intermediate coolant (so-called chiller–fancoil systems). However, in modern settings, when the required capacity of data centers increases every year and the framework for environmental friendliness and energy efficiency of installations becomes stricter, new, more energy-efficient, and environmentally friendly solutions for data center cooling is needed.

AIM: This study aims to compare the proposed energy-efficient ACS with combined vapor compres-sion and indirect-evaporative cycle with the most commonly used ACSs in data centers and to deter-mine the boundaries of transition between the operating modes of the proposed ACS in a data center operating in Moscow as an example.

METHODS: This study employs the following methods: analysis of existing data center cooling sys-tems, determination of a typical design set of outdoor air parameters in the region under consideration, and calculation by comparative analysis of the energy consumption of the proposed and traditional ACSs for data centers.

RESULTS: From our study, the different ACSs currently used for data centers, namely, precision air conditioners and chiller–fancoil systems are highlighted. The main components of each system, the advantages and disadvantages observed in the design, installation, and commissioning processes, and the operation of the systems are described. An alternative ACS that combines PCRM and indirect-evaporative cooling is proposed. The comparative analysis of the proposed scheme and traditional so-lutions demonstrates that the combined ACS allows significant reduction in the energy consumption for data-center cooling. Therefore, under the conditions in Moscow, the proposed system for a particu-lar year will consume energy that is two times less than a chiller–fancoil system with free cooling and 2.5 times less than a system with precision air conditioners that operate on the traditional vapor-compression cycles.

CONCLUSION: The comparative analysis of the proposed energy-efficient ACS with combined vapor compression and indirect-evaporative cycle with the most commonly used ACS in data centers con-firms its high energy efficiency and provides greater environmental safety. The boundaries of the tran-sition between the operating modes of the proposed ACS are determined in a data center that operates in Moscow as an example, which exhibits high energy efficiency and reliable operation.

Keywords: data processing center; data processing center air conditioning system; combined vapor compression and indirect-evaporative cooling; free cooling; energy-efficient and environmentally safe air conditioning system.

To cite this article:
Zharov AA, Venevceva DA, Mikita GI, Voronov VA, Apsit KA. Energy-efficient air condi-tioning system of a data processing center. *Refrigeration Technology.* 2021;110(2):113–121. DOI: https://doi.org/10.17816/RF322838

Received: 12.04.2023 **Accepted:** 16.07.2023 **Published online:** 23.08.2023

ECO•VECTOR

Article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Усовершенствование пакетов вычислительных программ для расчётов и моделирования технологических процессов, используемых в конструкторско-технологических бюро, влечет за собой переход на мощные вычислительные машины, требующие собственных центров обработки данных.

Вот уже несколько десятилетий операторы ЦОД и поставщики оборудования для дата-центров обсуждают перспективу резкого роста плотности размещения аппаратного обеспечения в стойках внутри машинных залов. Достижение более высокой плотности размещения комплектующих повышает эффективность ЦОД при одновременном сокращении счетов за электроэнергию. Но одновременно с этим также возникает риск отказа системы охлаждения или перебоев в ее работе. По мере роста плотности серверов в стойках проектировщики дата-центров и производители оборудования для них вынуждены создавать все более эффективные и, что не менее важно, надежные решения для охлаждения серверов [1-5].

В современных условиях, когда требуемые от ЦОД мощности с каждым годом увеличиваются, а рамки по экологичности и энергоэффективности установок с каждым годом становятся жестче, возникает потребность в поиске новых более энергоэффективных и в тоже время экологически безопасных решений для охлаждения ЦОД.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Провести сравнение предлагаемой энергоэффективной СКВ с наиболее часто используемыми в центрах обработки данных. Выбрать наиболее энергоэффективную систему кондиционирования для ЦОД. Определить границы перехода предлагаемой СКВ между режимами работы.

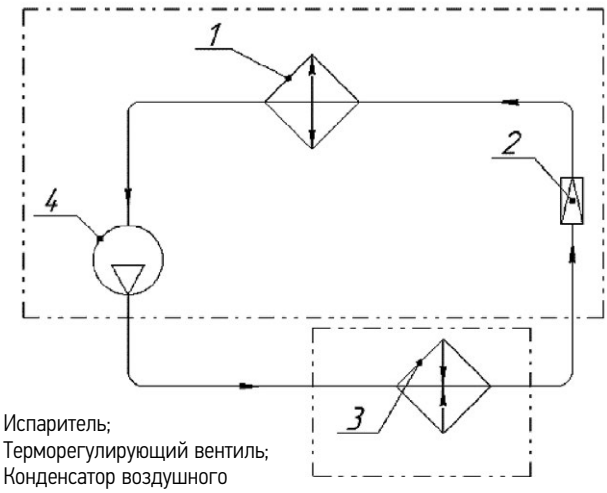
ОПИСАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦОД

Прецизионные кондиционеры с непосредственным охлаждением

В современных системах такого типа обычно используются хладагенты R410A и R407C.

Принцип работы такого кондиционера следующий.

Хладагент сжимается в компрессоре 4 (рис. 1), после поступает в конденсатор 3, где переходит в жидкое состояние. Проходит через терморегулирующий вентиль 2 (ТРВ), и там понижается его температура. Попадая в испаритель 1, хладагент испаряется в процессе охлаждения воздуха ЦОД и снова поступает в компрессор.



1. Испаритель;
2. Терморегулирующий вентиль;
3. Конденсатор воздушного охлаждения;
4. Компрессор.

Рис. 1. Прецизионные кондиционеры с непосредственным охлаждением
Fig. 1. Direct expansion type close control units

От конденсатора теплота отводится к воздуху окружающей среды.

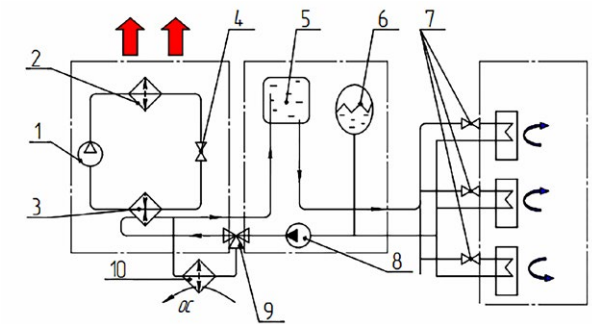
Эта система обладает несколькими преимуществами, включая длительный срок службы и высокую надежность. Благодаря широкому выбору мировых производителей, она доступна по разумной цене и не требует значительных финансовых затрат. Кроме того, проектировщики, монтажники и службы эксплуатации хорошо знакомы с такими системами [3-5].

Минусами данной системы являются: трудности при экстремально низких и высоких температурах окружающей среды. При очень низких температурах требуется искусственно повышать давление конденсации, которое без этого станет ниже давления в испарителе. При высоких температурах существенно повышаются затраты мощности в компрессоре и может возникать ситуация превышения максимально-допустимого давления конденсации, что чревато отключением системы охлаждения ЦОД, именно тогда, когда она наиболее важна. Наиболее существенным минусом являются высокие эксплуатационные затраты, связанные с большим расходом электроэнергии, вследствие чего необходимо увеличивать мощность источников бесперебойного питания ЦОД.

Система чиллер-фанкойлы

Принцип работы данной системы следующий [3–5]. От единого источника «холода» (чиллера), с помощью гидравлического модуля, холодоноситель подается к нескольким конечным охладителям воздуха (фанкойлам). В качестве хладагента в чиллерах применяют фреоны R407C и R134a. Хладоносителем является вода, либо антифриз (смесь воды с этиленгликолем или пропиленгликолем). Реже используется в качестве добавки

DOI: https://doi.org/10.17816/RF322838



1. Компрессор;
2. Конденсатор;
3. Испаритель;
4. Терморегулирующий вентиль;
5. Бак-аккумулятор;
6. Расширительный бак;
7. Регулирующий вентиль;
8. Насос;
9. Трехходовой вентиль;
10. Теплообменный аппарат свободного охлаждения.

Рис. 2. Система чиллер-фанкойлы.
Fig. 2. Chiller systems.

хлорид натрия (поваренная соль) и хлорид кальция. В зависимости от их концентрации изменяется температура замерзания смеси.

Основным преимуществом такой системы чиллер-фанкойлы является высокая гибкость построения, т.к. удаленность фанкойлов ограничена только возможностями насосов 8 (рис. 2). Эта система наиболее распространена как система охлаждения ЦОД. Самым важным преимуществом является наличие функции свободного охлаждения (когда при низких температурах наружного воздуха ПКХМ не включается, а хладоноситель охлаждается в теплообменнике 10 напрямую наружным воздухом), за счёт чего существенно снижаются затраты на электроэнергию.

Такие системы достаточно гибкие в эксплуатации. Благодаря использованию свободного охлаждения, насосных групп с переменным расходом холодоносителя и других технологий в этих кондиционерах, можно достичь уменьшения годового энергопотребления в два раза по сравнению с прецизионными кондиционерами, работающими на фреоне.

При этом системы чиллер-фанкойлы требуют тщательного процесса проектирования, трудоемкость монтажа высокая, следовательно, цена выше на 30-40 процессов, относительно кондиционеров с непосредственным охлаждением, таких как прецизионные кондиционеры.

В настоящее время установка таких кондиционеров достаточно актуальна, несмотря на свою цену. Решение продолжает развиваться и будет сохранять свою актуальность в ближайшем будущем.

Предлагаемая комбинированная система

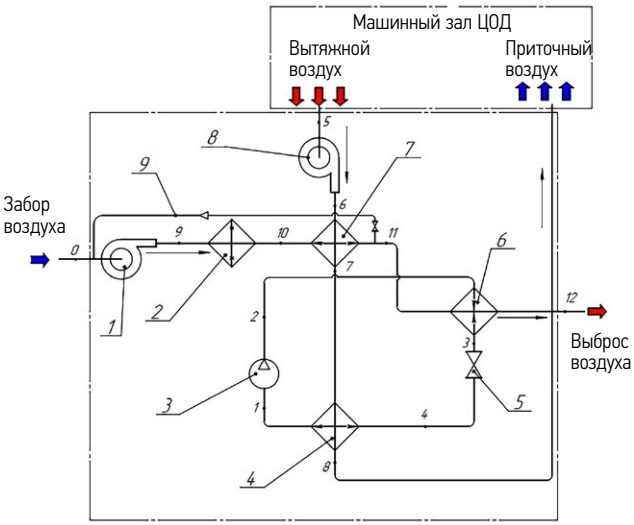
Предлагаемая система объединяет в себе косвенно-испарительное охлаждение [6–14] и охлаждение в традиционной парокомпрессионной холодильной машине. Данная идея рассмотрена авторами в предыдущих работах [15–17]. Предлагаемая система функционирует следующим образом.

При низкой температуре окружающего воздуха установка работает в режиме свободного охлаждения. Теплообмен между вспомогательным потоком (воздух забирается с улицы) и циркулирующим потоком (воздух забирается из помещения ЦОД) происходит в рекуперативном косвенно-испарительном теплообменнике (КИТО) 7, но без использования воды в этом режиме (рис. 3).

Если температура наружного воздуха слишком низкая и есть вероятность обмерзания каналов КИТО по циркулирующему потоку, то установка переходит в режим с включением байпасной линии 9, которая повышает температуру вспомогательного потока перед вентилятором вспомогательного потока 1 и КИТО 7 и исключает выпадение инея в каналах циркулирующего потока.

При повышении температуры наружного воздуха в работу включается увлажнитель наружного воздуха 2 и происходит орошение каналов вспомогательного потока косвенно-испарительного теплообменного аппарата 7. Циркулирующий поток в этом случае охлаждается только в КИТО 7.

На характер работы в этом режиме оказывает влияние влажность наружного воздуха, поскольку эффективность



1. Вентилятор наружного воздуха;
2. Увлажнитель наружного воздуха;
3. Компрессор;
4. Испаритель;
5. Терморегулирующий вентиль;
6. Конденсатор;
7. Косвенно-испарительный теплообменник;
8. Вентилятор воздуха из ЦОД.

Рис. 3. Предлагаемая комбинированная СКВ.
Fig. 3. The proposed combined air conditioning system (ACS).

испарения напрямую зависит от способности наружного воздуха поглощать влагу.

При повышении влажности и температуры наружного воздуха КИТО продолжает работать, хотя и не справляется полностью с требуемым охлаждением, а доохлаждение циркулирующего воздуха осуществляется в ПКХМ, состоящей из компрессора 3, конденсатора 6, терморегулирующего вентиля 5 и испарителя 8.

Важно отметить, что в последнем режиме конденсатор 6 обдувается вспомогательным потоком, выходящим из КИТО, и имеющим температуру меньше, чем воздух окружающей среды, что снижает давление конденсации и дополнительно снижает потребляемую мощность парокомпрессионного блока.

Данная система обеспечивает существенное снижение расходов и экономию с точки зрения электрической инфраструктуры и оборудования. Поскольку весь воздухоохлаждающий модуль устанавливается снаружи ЦОД, что увеличивает доступное свободное пространство внутри ЦОД. От модуля в ЦОД тянутся только воздуховоды для циркулирующего воздуха.

Свободное и косвенно-испарительное охлаждение без промежуточного хладоносителя, а также более выгодная работа конденсатора ПКХМ позволят ощутимо снизить энергозатраты на охлаждение ЦОД по сравнению с традиционными системами.

В результате значительно чего снижается совокупная стоимость ЦОД.

МЕТОДЫ

Исходные данные для проектирования:

- расположение ЦОД: Москва;
- тепловая нагрузка (тепловыделения цифровых стоек ЦОД): 100 кВт;
- параметры наружного воздуха: по СП131.13330.2012, при этом расчетная максимальная температура воздуха в теплый период года должна быть принята равной абсолютно максимальной в данном регионе;
- параметры воздуха, входящего в цифровые стойки ЦОД (использовать метод воздухораспределения типа «холодные коридоры»): температура: 22±2°С; относительная влажность: 45±15%;
- температура воздуха, выходящего из цифровых стоек ЦОД: 35±2°С;
- в ПКХМ использован хладагент R410A.

Для сравнения круглогодичного энергопотребления вышеописанных СКВ, был проведен сбор информации о погодных условиях в г. Москва. Для наглядности, изменение температуры и относительной влажности представлены на рис. 4 и 5.

Предлагаемая комбинированная СКВ имеет четыре режима работы: свободное охлаждение при очень низких температурах окружающей среды, свободное охлаждение, косвенно-испарительное и комбинированное косвенно-испарительное и парокомпрессионное охлаждение. При этом необходимо определить границы

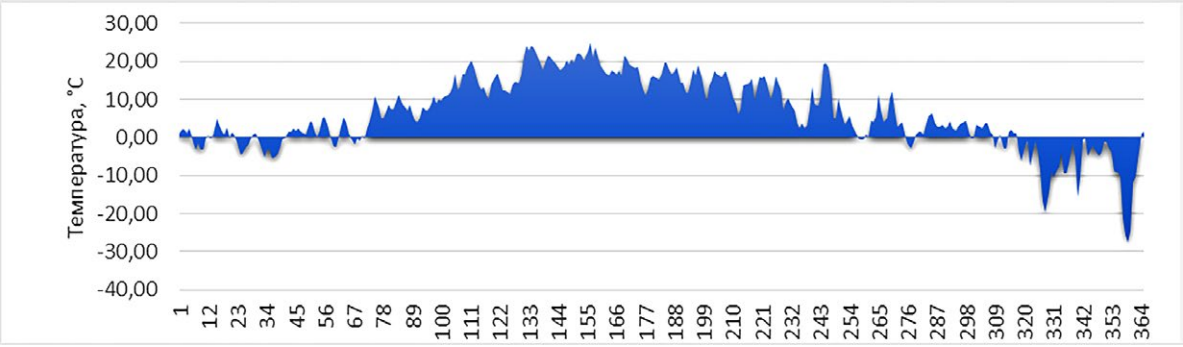


Рис. 4. График изменения температуры воздуха в г. Москва за год.
Fig. 4. Chart of the all-year air temperature changes in Moscow.

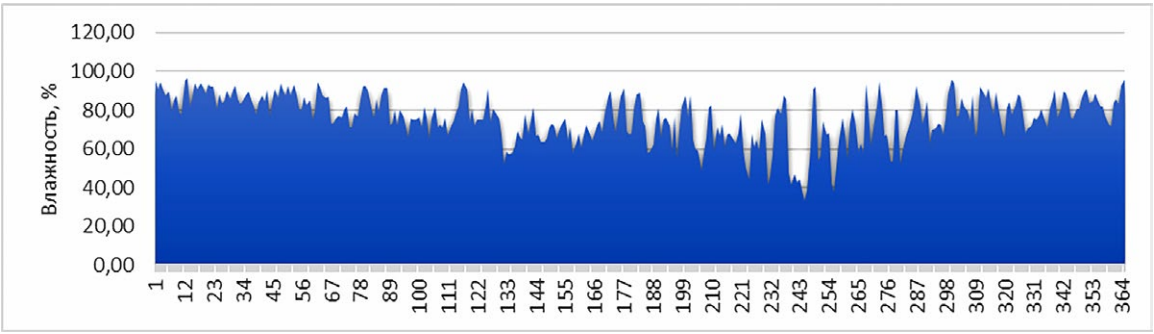


Рис. 5. График изменения относительной влажности воздуха в г. Москва за год.
Fig. 5. Chart of the all-year relative humidity changes in Moscow.

переходов между режимами, чтобы более точно рассчитать энергопотребление СКВ.

Переход с режима свободного охлаждения с байпасом на режим свободного охлаждения.

Забор воздуха из окружающей среды осуществляется с помощью вентилятора. Для предотвращения неисправностей и поломок вентилятора, не рекомендуется пропускать через воздух с температурой ниже -20°С. Также при температуре приточного воздуха ниже -20°С возможно обмерзание каналов циркулирующего воздуха. Следовательно, если температура на входе ниже -20°С, в работу подключают байпасную линию.

Переход с режима свободного охлаждения на косвенно-испарительное охлаждение.

В режиме косвенно-испарительного охлаждения на поверхность теплообменного аппарата разбрызгивается вода. Чтобы предотвратить возможное обмерзание теплообменного аппарата, необходимо подавать приточный воздух с температурой ниже 0°С. Следовательно, переход на режим косвенно-испарительного охлаждения может быть осуществлен при положительной температуре воздуха, принимаем, что выше +1°С.

Переход с режима косвенно-испарительное охлаждения на режим комбинирования косвенно-испарительного охлаждения и ПКХМ

Для определения границ режимов работы, проведен итерационный перебор параметров наружного воздуха. Для этого, по данным СНиП 23-01-99 (среднемесячная температура и среднее месячное парциальное давление пара) на i-d диаграмме строим кривую, которая будет характеризовать изменение параметров наружного воздуха. Рассматриваем месяцы с января по июль, так как после июля среднемесячная температура уменьшается.

Проведя расчёты, получаем следующие параметры наружного воздуха, при которых установка переходит в различные режимы работы. Для определения границы принимали, что разница между температурами в точках 7 и 10 должно составлять Δt = 5°С (недорекуперация в теплообменном аппарате).

При достижении на улице температуры t = 20°С и влажности φ = 77% установка переходит из режима косвенно-испарительного охлаждения в режим, когда включается в работу ПКХМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных расчётов получены графики потребляемой мощности сравниваемых СКВ в течение года (см. рис. 6–8).

Наглядно видно, что наиболее эффективной является предлагаемая комбинированная СКВ. Для нее площадь под графиком потребляемой мощности в течение года, которая соответствует годовому энергопотреблению, ощутимо меньше, чем у традиционных систем.

В системе чиллер-фанкойлы наибольшее количество энергии потребляется в летний период года. Зимой охлаждение ЦОД происходит с помощью свободного охлаждения. А летом в работу включается компрессор, который и является основным потребителем электроэнергии.

В системе с прецизионным кондиционером в зимний период потребление электроэнергии больше, чем в летний. Обусловлено это тем, что из-за большой разницы температур в помещении и на улице в зимний период года, нам необходимо поддерживать давление конденсации, что привод к увеличению потребления энергии.

В предлагаемой системе кондиционирования воздуха, большую часть времени года потребляют электроэнергию только вентиляторы и насос. И только в дни с высокой температурой приточного воздуха подключается ПКХМ. Комбинирование свободного охлаждения, косвенно-испарительного охлаждения и ПКХМ позволяет существенно снизить затраты на электроэнергию.

В результате, после проведения расчетов, было получено, что в сравнении с предлагаемой комбинированной СКВ, система с прецизионным кондиционером

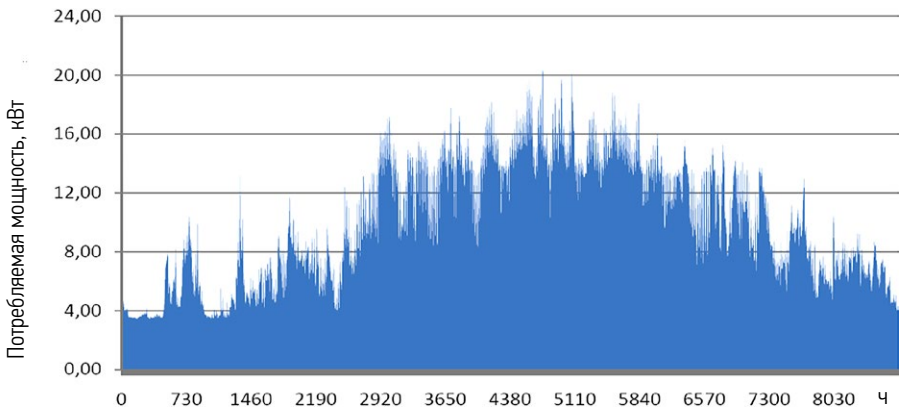


Рис. 6. Система чиллер-фанкойлы с свободным охлаждением.
Fig. 6. Chiller with free cooling system.

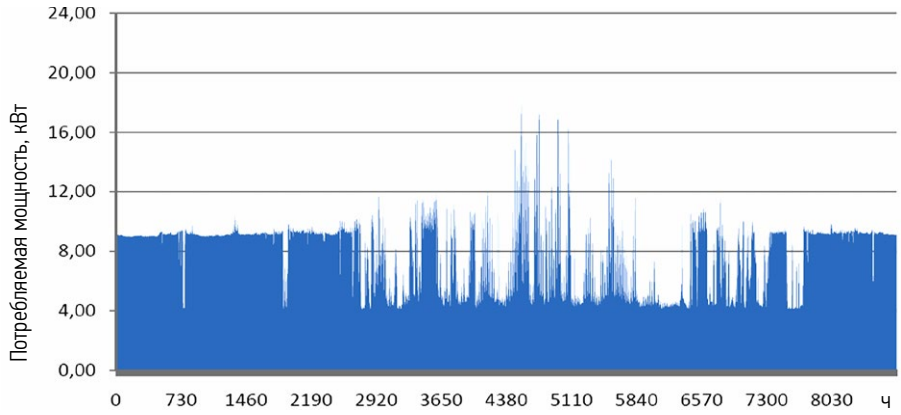


Рис. 7. Система с прецизионным кондиционером.
Fig. 7. Close control unit.

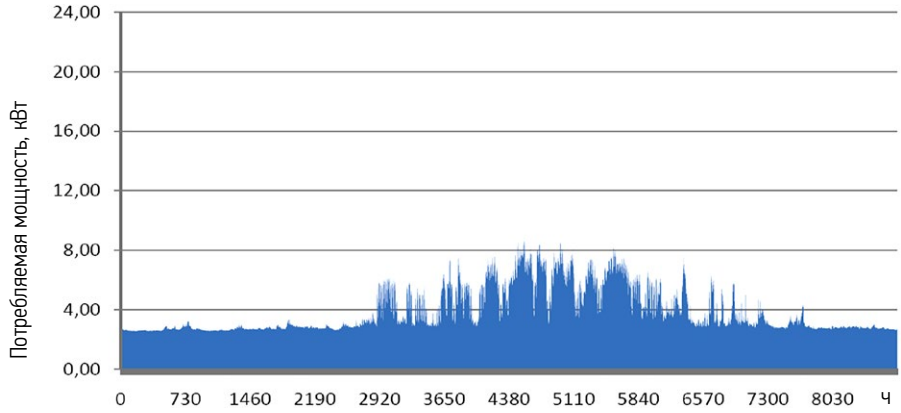


Рис. 8. Предлагаемая комбинированная СКВ.
Fig. 8. Proposed combined ACS.

потребляет в 2,5 раза больше электроэнергии, а чиллер-фанкоил со свободным охлаждением в 2 раз больше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были освещены различные системы кондиционирования воздуха, применяемые в настоящее время для охлаждения ЦОД: прецизионные кондиционеры и системы чиллер-фанкойлы. Были описаны основные составляющие каждой системы, достоинства и недостатки наблюдающиеся в процессе проектирования, монтажа, при пуско-наладочных работах, а также при дальнейшей эксплуатации таких систем.

Предложена альтернативная комбинированная система кондиционирования воздуха, объединяющая ПКХМ и косвенно-испарительное охлаждение.

Сравнительный анализ предложенной схемы и традиционных решений показал, что комбинированная система кондиционирования воздуха позволяет значительно сократить энергопотребление на кондиционирование ЦОД. Так в условиях московского региона предложенная система в течение года потребит энергии в 2 раз меньше, чем система чиллер-фанкойлы со свободным охлаждением и в 2,5 раз меньше, чем система с прецизионными кондиционерами, работающими на традиционных парокомпрессионных циклах.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contributions. All authors made a substantial contribution to the conceptual development and preparation of this article and read and approved the final version before publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koomey J. Estimating Total Power Consumption by Servers in the US and the World. Stanford: Lawrence Berkeley National Laboratory and Consulting Professor, 2007.

2. Anderson S. Improving the efficiency of data centers // Energy Engineering. 2010. Vol. 107, N 5. P. 42–63.

3. Capozzolia A., Primiceria G. Cooling Systems in Data Centers: State of Art and Emerging Technologies // 7th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings. Torino: Energy Procedia, 2015. P. 484–493. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.168

4. Evans T. The Different Technologies for Cooling Data Centers // White Papers. 2012. N 59. Дата обращения: 12.04.2023. Доступ по ссылке: https://it-resource.schneider-electric.com/white-papers/wp-59-the-different-technologies-for-cooling-data-centers

5. Балкаров М.А. Охлаждение серверных и ЦОД. Основы. Киев: Аванпост-Прим, 2011. (in Russ.)

6. Xiang H., Jianli D., Xiaoqing S., et al, inventor; Xian Polytechnic University, assignee. Data center's evaporation cold compound cooling system of cooling water cold wind. China patent CN105120637B. 2015 Sept 15. Доступ по ссылке: https://patents.google.com/patent/CN105120637B/en?oq=6.Huang+Xiang.%2c+2015.+A+data+center+cooled+with+evaporative+cooling+-+air+cooling+system+com-plex.+CN105120637B+Patent

7. Faramarzi R., Lutton J., Gouw S., editors. Performance Comparison of Evaporatively-Cooled Condenser versus Air-Cooled Condenser Air Conditioners. Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings Conference; 2010 August 15-20; Irvine, CA Southern California Edison, 2010. Available from: https://www.aceee.org/files/proceedings/2010/data/papers/1924.pdf

8. Pistochini T., Modera M. Water-use efficiency for alternative cooling technologies in arid climates // *Energy and Buildings.* 2011. Vol. 43. N 2–3. P. 631–638. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.11.004

9. Reichmuth, H., Turner, C., Higgins, et al., editors. Assessment of Market-Ready Evaporative Technologies for HVAC Application [Internet]. Vancouver, WA: New Buildings Institute, 2006. Дата обращения: 07.08.2023. Доступ по ссылке: https://newbuildings.org/wp-content/uploads/2015/11/SCE-AssessMarketReadyEvap_rev_Nov06_11.pdf

10. Hasan A. Indirect evaporative cooling of air to a sub wet-bulb temperature // Appl Therm Eng. 2010. Vol. 30. P. 2460–2468. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.06.017

11. Woods J., Kozubal E., inventor; Alliance for Sustainable Energy LLC, assignee. Control methods and systems for indirect evaporative coolers. United States patent US9140460B2. 2013 March 13. Доступ по ссылке: https://patents.google.com/patent/US9140460B2/en

12. Evaporative air cooling equipment. In: ASHRAE A. H. H. Systems and equipment. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta. 2000. Ch. 19.1–19.8.

13. Maisotsenko V., Gillan L.E., Heaton T.L., et al., inventor; FF Seeley Nominees Pty Ltd., assignee. Method and apparatus of indirect-evaporation cooling. United States patent US 6497107 B2 Patent. 2002 Apr 4.

14. Ahmad A., Rehman S., Al-Hadhrami L.M. Performance evaluation of an indirect evaporative cooler under controlled environmental conditions // Energy and Buildings. 2013. Vol. 62. P. 278–285. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.03.013

15. Патент РФ № 2420695/ 10.06.2011. Бюл. № 16. Жаров А.А., Гаранов С.А., Закатов А.С. Установка кондиционирования воздуха (варианты). (in Russ.) Дата обращения: 12.04.2023. Режим доступа: https://new.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=038b0f172b4c195053ae99fa6d57762c (in Russ.)

16. Гаранов С.А., Жаров А.А., Пантеев Д.А., и др. Водоиспарительное и комбинированное охлаждение воздуха // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1. С.84–90

17. Zharov A.A., Blinova D.A. Energy efficient air conditioning system of the computing centre of the space design and technology Bureau // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2171. №. 1. P. 120006. doi: 10.1063/1.5133262

REFERENCES

1. Koomey J. *Estimating Total Power Consumption by Servers in the US and the World.* Stanford: Lawrence Berkeley National Laboratory and Consulting Professor; 2007.

2. Anderson S. Improving the efficiency of data centers. *Energy Engineering.* 2010;107(5):42–63.

3. Capozzolia A, Primiceria G. Cooling Systems in Data Centers: State of Art and Emerging Technologies. In: *7th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings.* Torino: Energy Procedia; 2015. P. 484–493. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.168

4. Evans T. The Different Technologies for Cooling Data Centers. *White Papers.* 2012;59. Accessed: 12.04.2023. Available from: https://it-resource.schneider-electric.com/white-papers/wp-59-the-different-technologies-for-cooling-data-centers

5. Balkarov MA. *Cooling of server rooms and data centers.* Basics. Kyiv: Avanpost-Prim; 2011. (in Russ.)

6. Xiang H, Jianli D, Xiaoqing S, et al, inventor; Xian Polytechnic University, assignee. Data center's evaporation cold compound cooling system of cooling water cold wind. China patent CN105120637B. 2015 Sept 15. Accessed: 06.08.2023. Available from: https://patents.google.com/patent/CN105120637B/en?oq=6.Huang+Xiang.%2c+2015.+A+data+center+cooled+with+evaporative+cooling+-+air+cooling+system+com-plex.+CN105120637B+Patent

7. Faramarzi R, Lutton J, Gouw S, editors. Performance Comparison of Evaporatively-Cooled Condenser versus Air-Cooled Condenser Air Conditioners. Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings Conference; 2010 August 15–20; Irvine, CA Southern California Edison; 2010. Available from: https://www.aceee.org/files/proceedings/2010/data/papers/1924.pdf

8. Pistochini T, Modera M. Water-use efficiency for alternative cooling technologies in arid climates. *Energy and Buildings.* 2011;43(2–3): 631–638. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.11.004

9. Reichmuth H, Turner C, Higgins C, et al., editors. Assessment of Market-Ready Evaporative Technologies for HVAC Application [Internet]. Vancouver, WA: New Buildings Institute; 2006. Accessed: 06.08.2023. Available from:

https://newbuildings.org/wp-content/uploads/2015/11/SCE-AssessMarketReadyEvap_rev_Nov06_11.pdf

10. Hasan A. Indirect evaporative cooling of air to a sub wet-bulb temperature. *Appl Therm Eng.* 2010;30:2460–2468. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.06.017

11. Woods J, Kozubal E, inventor; Alliance for Sustainable Energy LLC, assignee. Control methods and systems for indirect evaporative coolers. United States patent US9140460B2. 2013 March 13. Accessed: 07.08.2023. Available from: https://patents.google.com/patent/US9140460B2/en

12. Evaporative air cooling equipment. In: ASHRAE A. H. H. *Systems and equipment. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.,* Atlanta. 2000. Ch. 19.1-19.8.

13. Maisotsenko V, Gillan LE, Heaton TL, et al., inventor; FF Seeley Nominees Pty Ltd., assignee. Method and apparatus of indirect-evaporation cooling. United States patent US 6497107 B2 Patent. 2002 Apr 4.

14. Ahmad A, Rehman S, Al-Hadhrami LM. Performance evaluation of an indirect evaporative cooler under controlled environmental conditions. *Energy and Buildings.* 2013;62:278–285. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.03.013

15. Patent RUS № 2420695/ 10.06.2011. Byul. № 16. Zharov AA, Garanov SA, Zakatov AS. Ustanovka konditsionirovaniya vozdukha (varianty). (in Russ.) Accessed: 12.04.2023. Available from: https://new.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=038b0f172b4c195053ae99fa6d57762c

16. Garanov SA, Zharov AA, Panteev DA, et al. Water evaporation and combined air cooling. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii.* 2013;1:84–90.

17. Zharov AA, Blinova DA. Energy efficient air conditioning system of the computing centre of the space design and technology Bureau. *AIP Conference Proceedings.* 2019;2171(1):120006. doi: 10.1063/1.5133262

ОБ АВТОРАХ

*** Жаров Антон Андреевич,**
канд. техн. наук;
адрес: Российская Федерация, 105005, Москва, Лефортовская наб., д. 1;
ORCID: 0000-0001-9945-0850;
eLibrary SPIN: 8581-1809;
e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Веневцева Дарья Андреевна;
ORCID: 0009-0006-8745-9798;
eLibrary SPIN: 2873-3767;
e-mail: vend09@ya.ru

Микита Гурий Иштванович,
канд. техн. наук;
ORCID: 0000-0002-3712-6913;
eLibrary SPIN: 7802-8398;
e-mail: mikitagi@bmstu.ru

Воронов Владимир Андреевич,
канд. техн. наук;
ORCID: 0000-0001-8581-9936;
eLibrary SPIN: 4502-9590;
e-mail: vavoronov@bmstu.ru

Апсит Константин Александрович;
eLibrary SPIN: 4063-7450;
e-mail: apsit.k@bmstu.ru

*** Автор, ответственный за переписку**

AUTHORS' INFO

*** Anton A. Zharov,**
Cand. Sci. (Tech.);
address: 1 Lefortovskaja naberezhnaja, 105005, Moscow, Russian Federation;
ORCID: 0000-0001-9945-0850;
eLibrary SPIN: 8581-1809;
e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Darya A. Venevceva;
ORCID: 0009-0006-8745-9798;
eLibrary SPIN: 2873-3767;
e-mail: vend09@ya.ru

Guriy I. Mikita,
Cand. Sci. (Tech.);
ORCID: 0000-0002-3712-6913;
eLibrary SPIN: 7802-8398;
e-mail: mikitagi@bmstu.ru

Vladimir A. Voronov,
Cand. Sci. (Tech.);
ORCID: 0000-0001-8581-9936;
eLibrary SPIN: 4502-9590;
e-mail: vavoronov@bmstu.ru

Konstantin A. Apsit;
eLibrary SPIN: 4063-7450;
e-mail: apsit.k@bmstu.ru

*** Corresponding author**