

биопереходов, а так же значительно повысить безопасность дорожного движения.

Список использованных источников

1. Гусева М.В., Блохин Л.В., Воздействие транспортной инфраструктуры на окружающую среду // Молодежь, наука, творчество - 2020. Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов. Омск, 2020. С. 562-566
2. Е.Г. Королёва, У.Д. Щербакова, Макроэкология автомобильных дорог: оценка воздействия на биоразнообразие и популяционную структуру позвоночных животных // Вестник Международного университета природы, общества и человека "Дубна", 2016. С. 22-28;
3. ГОСТ Р 58947—2020 Дороги автомобильные общего пользования. Экодуки. Требования к размещению и обустройству. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174654> (дата обращения 15.09.2025).

УДК 330

Д.В.Сидоров, А.А. Дудолин
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ

Аннотация. В работе исследуется возможность повышения энергоэффективности центров обработки данных (ЦОД) путем рекуперации низкопотенциального тепла, выделяемого серверным оборудованием. В качестве основного решения предлагается двухконтурная система, интегрирующая парокомпрессионный тепловой насос (ТН) и бромистолитиевую абсорбционную холодильную машину (АБХМ). Методология исследования включает теоретический анализ и компьютерное моделирование в среде *Thermoflex* для ряда хладагентов: R600, R717, R134a и RC318. В качестве критерия эффективности системы использовался коэффициент преобразования энергии (COP). Проанализировано влияние температурных режимов различных типов серверных стоек (ИТ и ОДМ) и внешних климатических условий на работу системы. Результаты моделирования свидетельствуют о потенциальном снижении энергопотребления ЦОД на 8–13% по сравнению с традиционными системами охлаждения на базе чиллеров. Рассмотрены перспективы интеграции предложенной системы в тригенерационные комплексы, что способствует

снижению эксплуатационных расходов и экологической нагрузки. Исследование ориентировано на специалистов в области энергосбережения, проектировщиков инфраструктуры ЦОД и разработчиков систем тепловой утилизации.

Ключевые слова: центр обработки данных, энергоэффективность, утилизация тепла, тепловой насос, абсорбционная холодильная машина, коэффициент COP, моделирование, тригенерация.

D.V. Sidorov, A.A. Dudolin

Research University «MPEI»

Москва, Россия

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF DATA CENTERS THROUGH THE INTRODUCTION OF A DUAL-CIRCUIT HEAT LOSS RECOVERY SYSTEM

***Abstract.** The paper explores the possibility of improving the energy efficiency of data centers (data centers) by recovering low-potential heat generated by server equipment. A two-circuit system integrating a steam compression heat pump (TN) and a bromistolithium absorption refrigerating machine (ABCM) is proposed as the main solution. The research methodology includes theoretical analysis and computer simulation in a Thermoflex environment for a number of refrigerants: R600, R717, R134a and RC318. The energy conversion coefficient (COP) was used as a criterion for the efficiency of the system. The influence of temperature conditions of various types of server racks (IT and ODM) and external climatic conditions on the system operation is analyzed. The simulation results indicate a potential reduction in data center energy consumption by 8-13% compared to traditional chiller-based cooling systems. The prospects of integrating the proposed system into trigeneration complexes are considered, which helps to reduce operating costs and environmental burden. The research is aimed at specialists in the field of energy conservation, designers of data center infrastructure and developers of thermal recycling systems.*

Keywords: data processing center, energy efficiency, heat recovery, heat pump, absorption refrigerating machine, COP coefficient, modeling, trigeneration.

Введение

Стремительная цифровизация экономики, сопровождаемая распространением облачных сервисов, интернета вещей и технологий искусственного интеллекта, обуславливает постоянный рост мощностей центров обработки данных. Это, в свою очередь, ведет к увеличению их энергопотребления и сопутствующих тепловых выбросов. Значительная часть электроэнергии ЦОД тратится на системы охлаждения, обеспечивающие штатный температурный режим работы чувствительного ИТ-оборудования.

Одним из ключевых показателей, характеризующих эффективность использования энергии в ЦОД, является коэффициент PUE (Power Usage Effectiveness). Его значение для современных

российских data-центров typically находится в диапазоне 1.3–1.5, что указывает на существенную долю энергозатрат, не связанных непосредственно с вычислениями. Таким образом, задача утилизации низкопотенциального тепла (30–50 °C), которое традиционно рассеивается в атмосфере, приобретает высокую актуальность с точки зрения как экономии ресурсов, так и экологии.

Настоящее исследование посвящено разработке и анализу гибридной системы, позволяющей не только отводить, но и полезно использовать сбросное тепло серверов для генерации холода, что создает замкнутый энергоэффективный контур.

Энергетический баланс и потенциал утилизации тепла в ЦОД

Структура энергопотребления типового ЦОД (рис.1) в условиях России характеризуется примерным распределением: 50% — на основное ИТ-оборудование и 50% — на системы обеспечения (включая охлаждение, ИБП и освещение). При этом практически вся потребляемая серверами электрическая мощность преобразуется в тепло, выделяемое в машинных залах. Это означает, что тепловая нагрузка от серверных стоек составляет около половины от общей электрической мощности ЦОД.



Рис.1- Структура ЦОД

Для крупных российских ЦОД, таких как объекты «Росатом» (38 МВт) или «Сбер» (29 МВт), тепловые потери исчисляются десятками мегаватт. Однако низкий температурный потенциал этого тепла (40–50 °C) ограничивает возможности его прямого использования в стандартных системах отопления или ГВС, требующих более высоких температур. Данное ограничение является основным стимулом для поиска решений, позволяющих повысить потенциал тепла или

напрямую конвертировать его в другие полезные формы энергии, такие как холод.

Предлагаемое техническое решение

В качестве альтернативы традиционным чиллерным технологиям, авторами разработана двухконтурная система утилизации тепла рис.2.

Ключевыми компонентами данной системы являются:

1. **Парокомпрессионный тепловой насос (ТН)**, предназначенный для повышения температурного потенциала сбросного тепла серверов. ТН отбирает тепло из горячего воздуха машинного зала и, совершая работу сжатия, нагревает теплоноситель до температур, достаточных для активации второго контура.
2. **Бромистолитиевая абсорбционная холодильная машина (АБХМ)**, которая использует тепло от конденсатора ТН в качестве источника энергии для выработки холода. Этот холод, в свою очередь, используется для дополнительного охлаждения воздуха, поступающего в серверные стойки.

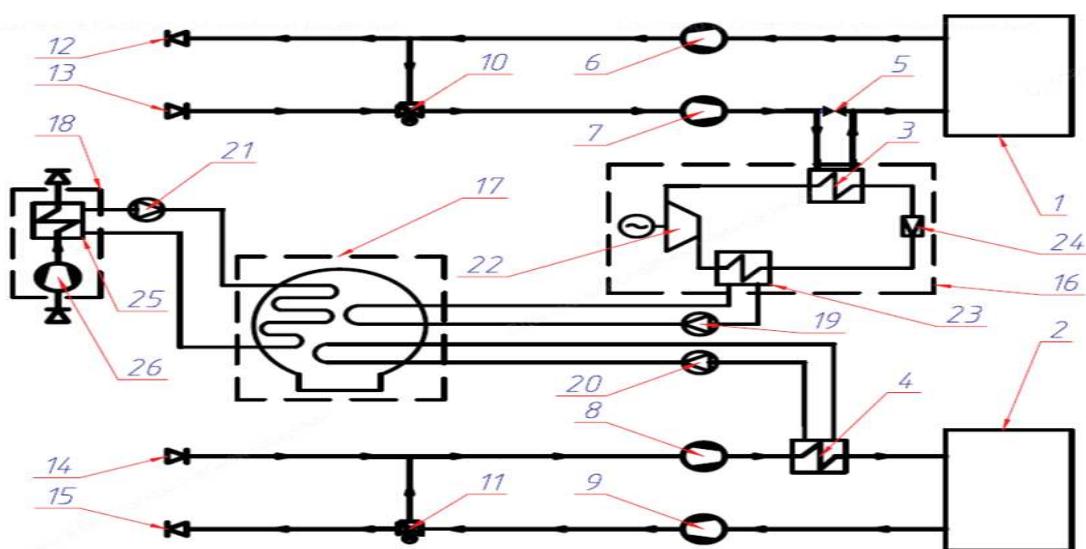


Рис. 2 - Принципиальная схема 2-х ступенчатой системы охлаждения

1, 2 – машинные залы ЦОД; 3 – испаритель парокомпрессионной теплонасосной установки (ТНУ); 4 – охладитель абсорбционной холодильной машины (АБХМ); 5 – байпасная линия с воздушным клапаном; 6, 7 – вентиляторы притока и вытяжки центральной вентиляционной установки 1; 8, 9 – вентиляторы притока и вытяжки центральной вентиляционной установки 2; 16 – ТНУ с элементами (компрессор 22, дроссель 24, конденсатор 23); 17 – АБХМ с элементами (контуром теплоснабжения 19, охлаждения 20, градирни 21); 18 – градирня с элементами (вентилятор 26, теплообменник 25).

Система защищена авторским свидетельством (патент на изобретение №2848512 «Система двухступенчатого охлаждения центра обработки данных»). Её основное преимущество — синергетический эффект от комбинации двух технологий, позволяющий значительно сократить энергопотребление на привод компрессоров по сравнению с классическими схемами.

Методология исследования и моделирование

Для верификации эффективности предложенной системы было проведено компьютерное моделирование в программном комплексе ThermoFlex (рис.3). Исследование включало анализ работы системы с различными хладагентами (R600, R717, R134a, RC318) и при различных температурных сценариях, характерных для серверных стоек стандартов ИТ (холодный коридор 25 °C, горячий — 40 °C) и ОДМ (горячий коридор до 48.5 °C).

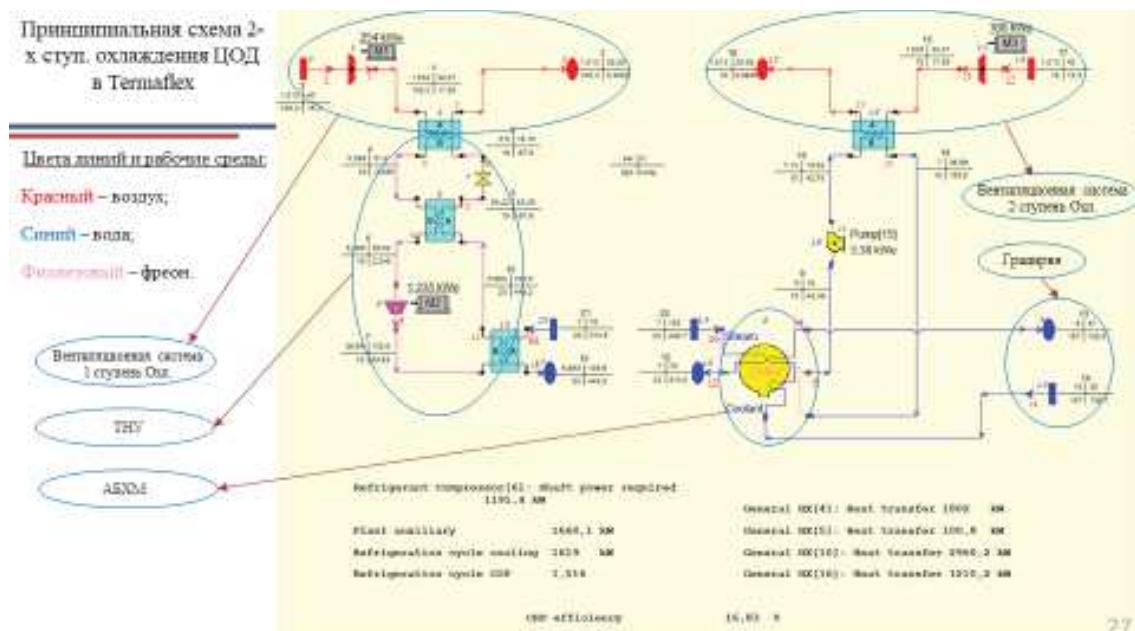


Рис. 3- Модель 2-х ступенчатой системы охлаждения в ThermoFlex

Основным критерием эффективности был выбран коэффициент СОР, определяемый как отношение произведенной тепловой энергии ТН к суммарным затратам энергии на привод компрессора и циркуляционных насосов.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования подтвердили высокую энергетическую эффективность двухконтурной системы. Значения СОР варьировались в зависимости от используемого хладагента и температурного режима.

Наибольший коэффициент эффективности был зафиксирован при использовании хладагента RC318 (табл.1), что объясняется его термодинамическими свойствами, оптимально подходящими для заданных диапазонов высоких температур конденсации.

Таблица 1 - Расчет основных термодинамических параметров ТНУ для различных вариантов охлаждения с применением фреона: R134a (тетрафторэтан); RC318 (октафторциклогубутан)

ПАРАМЕТРЫ / ВАРИАНТЫ ОХЛАЖДЕНИЯ / МАРКИ ФРЕОНА				Bap.1.1	Bap.1.2	Bap.2.1	Bap.2.2	Bap.1.1	Bap.1.1	Bap.1.2	Bap.1.2	Bap.2.1	Bap.2.1	Bap.2.2	Bap.2.2	
	номера процесса в ТермоБокс	Обозначение	единиц	R134a (40-25°C)	R134a (40-30°C)	R134a (48,5-40°C)	R134a (40-25°C)	RC-318 ступ.1 (40-25°C)	RC-318 ступ.2 (40-30°C)	RC-318 ступ.1 (40-30°C)	RC-318 ступ.2 (40-30°C)	RC-318 ступ.1 (48,5-40°C)	RC-318 ступ.2 (48,5-40°C)	RC-318 ступ.1 (48,5-30°C)	RC-318 ступ.2 (48,5-30°C)	
Воздух																
Температура воздуха на входе в ТНУ	2	$t_{вх}$	°C	40	40	48,5	48,5	40	40	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5	
Энталпия воздуха на входе в ТНУ	2	$h_{вх}$	кДж/кг	15,3	15,41	24,56	24,07	15,3	15,41	24,56	24,56	24,56	24,56	24,56	24,56	
Температура воздуха после Вентилятора	1	$t_{вх}$	°C	41,95	41,97	50,6	50,56	41,96	41,96	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	
Энталпия воздуха после Вентилятора	1	$h_{вх}$	кДж/кг	17,28	17,43	26,76	26,18	17,3	17,42	26,65	26,65	26,65	26,65	26,65	26,65	
Температура воздуха на выходе из ТНУ	3	$t_{вых}$	°C	21,64	27,07	38,21	29,83	23,84	28,92	39,16	39,16	39,16	39,16	39,16	39,16	
Энталпия воздуха на выходе из ТНУ	3	$h_{вых}$	кДж/кг	-3,43	1,92	11,63	4,94	-11,18	4,02	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80	
Расход воздуха	1,2,3	$G_{вх}$	кг/с	105,30	105,30	105,30	105,30	105,30	105,30	105,30	105,30	105,30	105,30	105,30	105,30	
Фреон																
Температура фреона после дросселя (вход-HX4)	8	t_8	°C	20,97	25,98	35,93	29,08	21,06	65,40	26,04	65,40	32,96	65,40	26,04	65,40	
Давление фреона после дросселя (вход-HX4)	8	p_8	bar	5,89	6,85	9,10	7,50	2,75	9,58	3,23	9,58	4,00	9,58	3,23	9,58	
Температура фреона после Испарителя (выход-HX4 и вход-HX5)	4	t_4	°C	26,25	28,96	41,34	30,96	27,64	74,13	31,90	75,13	40,45	77,71	32,73	76,10	
Давление фреона после Испарителя (выход-HX4 и вход-HX5)	4	p_4	bar	5,84	6,83	9,09	7,46	2,70	9,39	3,17	9,39	3,92	9,39	3,17	9,39	
Температура фреона после Промперегрева (выход-HX5B)	6	t_6	°C	31,23	33,28	43,72	35,18	59,02	81,11	60,32	81,38	63,09	82,08	60,61	81,64	
Давление фреона после Промперегрева (выход-HX5B)	6	p_6	bar	5,72	6,69	8,91	7,31	2,64	9,21	3,11	9,21	3,85	9,21	3,11	9,21	
Температура фреона после компрессора (выход-HX10)	7	t_7	°C	124,50	120,30	118,30	118,50	136,10	109,50	135,60	109,70	135,80	110,30	135,80	109,90	
Давление фреона после компрессора (выход-HX10)	7	p_7	bar	36,64	36,64	36,64	36,64	34,07	20,59	34,56	20,59	35,37	20,59	34,56	20,59	
Температура фреона после Конденсатора (выход-HX10)	10	t_{10}	°C	78,86	76,02	76,61	77,64	75,39	83,53	75,23	83,56	75,11	83,61	75,26	83,58	
Давление фреона после Конденсатора (выход-HX10)	10	p_{10}	bar	36,27	36,46	36,48	36,29	33,40	20,19	33,89	20,19	34,67	20,19	33,89	20,19	
Температура фреона перед дросселем (выход-HX5A)	5	t_5	°C	75,93	73,27	74,87	74,91	53,25	78,18	54,96	78,75	58,70	80,22	55,38	79,30	
Давление фреона перед дросселем (выход-HX5A)	5	p_5	bar	35,36	35,74	35,77	35,57	32,74	19,79	33,22	19,19	33,99	19,79	33,22	19,79	
Расход фреона		$G_{ф}$	кг/с	21,00	15,00	14,00	21,00	25,80	37,00	18,50	26,00	16,00	22,00	30,60	43,00	
Контур ТС																
Энергетические показатели																
Gas/Air compressor: Shaft power required	1			кВт	209,50	213,50	231,80	222,40	210,60		211,70	220,20		217,00		
Refrigerant compressor: Shaft power required	6			кВт	1 201,40	766,00	590,40	1 003,90	906,10	475,10	599,50	334,50	465,10	284,50	993,80	554,50
Plant auxiliary				кВт	1 466,40	1 025,10	865,00	1 277,30		1 665,20		1 207,60		1 028,20		1 844,20
General HX[4]: Heat transfer	4			кВт	2 159,50	1 617,60	1 577,00	2 214,20	1 926,80	2 797,90	1 396,70	1 971,80	1 235,70	1 680,70	2 316,80	3 270,00
General HX[5]: Heat transfer	5			кВт	107,70	70,37	41,31	99,14	677,40	256,10	444,90	161,80	312,80	96,82	722,60	238,10
General HX[10]: Heat transfer	10			кВт	3 323,00	2 356,40	2 142,50	3 182,00		3 238,00		2 281,70		1 945,00		3 784,00
Refrigerant cycle cooling				кВт	1 940,20	1 453,30	1 416,80	1 989,30		4 640,00		3 305,00		2 857,70		5 481,00
Refrigerant cycle COP					1,802	2,119	2,684	2,312		3,739		3,938		4,243		3,940

Сравнительный анализ таблицы 1 показал, что предложенная система ТН+АБХМ демонстрирует сопоставимую, а в некоторых конфигурациях (например, при использовании RC318 в определенных режимах) — и превосходящую эффективность по сравнению с традиционными парокомпрессионными чиллерами. Расчетное снижение энергопотребления системы охлаждения оценивается в 8–13%.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует перспективность внедрения двухконтурных систем утилизации тепла на базе теплового насоса и абсорбционной машины в инфраструктуру ЦОД. Основные преимущества такого подхода:

- Снижение прямого энергопотребления на охлаждение и, как следствие, уменьшение эксплуатационных затрат.
- Повышение общей энергоэффективности объекта и снижение его углеродного следа.

- Возможность интеграции в тригенерационные системы для комплексного обеспечения объекта электроэнергией, теплом и холодом.

Внедрение подобных технологий соответствует глобальным трендам устойчивого развития и стратегическим направлениям научно-технологического развития Российской Федерации, способствуя созданию энергоэффективной и экологически ответственной цифровой инфраструктуры.

Список использованных источников

1. ASHRAE Handbook: Fundamentals. – Atlanta, 2009.
2. ASHRAE Standard 55-2020. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. – Atlanta, 2021.
3. Дзино А.А., Малинина О.С. Абсорбционные холодильные машины: учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016.
4. Асонов Д.А., Романова Т.Н. Утилизация тепла ЦОД // Энерго- и ресурсосбережение: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург, 2019.
5. Данные компаний IKS-Consulting [Электронный ресурс]. – URL: <https://survey.iksconsulting.ru/page56426925.html> (дата обращения: 29.10.2024).
6. Яковлев И.В., Авдокунин Н.В. Эффективность применения сбросного тепла центров обработки данных // Теплоэнергетика. – 2023. – № 10.
7. Степанов К.И., Мухин Д.Г. Анализ СОР термодинамического цикла АБХМ с двухступенчатой абсорбцией при получении отрицательных температур охлаждения // Вестник MAX. – 2016. – № 1.
8. Налетов В.А. Эксергетический анализ энергоблока тригенерации с улавливанием диоксида углерода из дымовых газов // Технические науки: традиции и инновации: материалы IV Междунар. науч. конф. – СПб., 2020.
9. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. – М.: Минстрой России, 2020.
10. Сулин А.Б. Расчет парокомпрессионных тепловых насосов в режиме отопления зданий: учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2022.
11. Указ Президента РФ № 529 от 18.06.2024 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших научноемких технологий».

12.Хомутский Ю. Удивительные, но настоящие: энергоэффективные системы охлаждения действующих и проектируемых ЦОД в России и за рубежом // Мир климата. – 2018. – № 111.

УДК 658.567.1

Г.Х. Ашырова, В.Б. Вельханов

Международный университет нефти и газа
имени Ягшыгелди Какаева
Ашхабад, Туркменистан

НЕОБХОДИМОСТЬ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАВШЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

***Аннотация.** Основная цель системы управления отходами заключается в том, чтобы все ресурсы, полученные из природы, перерабатывались, превращались в полезную продукцию и возвращались в производственный цикл. В составе отходов электронного и электрического оборудования содержатся такие опасные вещества, как кадмий, свинец, ртуть. Технология сбора и переработки отработавшего электронного и электрического оборудования должна осуществляться в соответствии со всеми экологическими нормами и законодательством.*

G.H. Ashyrova, V.B. Byashimovich

Yagshygeldi Kakayev,
International Oil and Gas University
Ashgabat, Turkmenistan

THE NECESSITY OF UTILIZING OUT-OF-USE ELECTRICAL EQUIPMENT

***Abstract.** The main objective of the waste management system is to ensure that all resources taken from nature are fully recycled, transformed into useful products, and returned to the production cycle. Electronic and electrical waste contains hazardous substances such as cadmium, lead, and mercury. The technology for collecting and processing out-of-use electronic and electrical equipment must be carried out in full compliance with all environmental protection laws and regulations.*

В Национальной программе социально-экономического развития Туркменистана на 2022–2052 годы «Возрождение новой эпохи могучего государства» подчеркивается, что устойчивое социально-экономическое развитие страны напрямую связано с реализацией мер по улучшению экологической обстановки, эффективному использованию природных ресурсов, их восстановлению и охране, а