

УДК 669

Кузнецов Глеб Александрович, магистрант,
Самарский государственный технический университет,
Самара

АНАЛИЗ АКТУАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВОБОДНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РАСПОЛОЖЕННЫХ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ РОССИИ.

Аннотация: В настоящее время рынок холодильных установок огромен. Они получили свое распространение практически во всех секторах промышленности.

Одним из основных недостатков холодильных установок являются большие затраты на расход электроэнергии, поскольку компрессор, который необходим для циркуляции хладагента является энергозатратным потребителем.

В данной статье рассмотрен вариант применения системы свободного охлаждения с целью повышения эффективности на промышленном предприятии на примере ЦОД. Также проведен анализ актуальности его применения в средней полосе России (г. Самара).

Ключевые слова: Свободное охлаждения, компрессор, Фрикулинг, чиллеры, хладагент, электроэнергия, испаритель, холодильные установки, умеренный климат, средняя температура, рециркуляция, воздушный поток.

1. Актуальность применения фрикулинга

Холодопотребляющее оборудование сегодня используется повсеместно. Показательно, что в развитых странах на работу холодильных установок, включая кондиционеры и бытовые холодильники, приходится 15–20% общего энергопотребления.

Несмотря на попытки оптимизации – например, за счет улучшенных хладагентов и настройки рабочих параметров – значительного снижения энергозатрат достичь не удалось. Основной расход энергии в классических системах охлаждения связан с работой компрессоров и конденсаторных агрегатов. Но наибольшего снижения энергозатрат удалось добиться за счет внедрения технологии фрикулинга.

Климатические условия России позволяют активно внедрять технологии охлаждения с применением природного холода на большинстве территорий страны в различных отраслях производства.

В настоящее время системы охлаждения с фрикулингом наиболее широко применяются:

- в технологическом кондиционировании воздуха на предприятиях пищевой промышленности для охлаждения продуктов;
- в химической промышленности при изготовлении пластиковых изделий;
- для охлаждения серверных комнат в дата-центрах.

Цель данной работы заключается в формировании оценки эффективности применения фрикулинга на предприятиях Российской Федерации и сравнении с традиционными холодильными установками с компрессором. Также в работе будет произведен сравнительно-экономический анализ, показывающий соотношение затрат на энергоресурсы при применении разных холодильных установок. Результаты расчетов могут быть применимы как крупными предприятиями, так и небольшими индивидуальными предпринимателями, занимающимися майнинг-фермами и ЦОД.

1. Анализ рынка центров обработки данных (ЦОД)

На территории Российской Федерации положение с функционированием и эксплуатацией ЦОД состоит следующим образом:



1. Объем и динамика:

В 2023 году рынок оценивался в ~\$1,5–2 млрд с CAGR ~15–20% (несмотря на санкции).

В России ~500+ коммерческих ЦОД, из них ~20% – Tier III и выше.

Крупнейшие операторы: DataPro, IXcellerate, Rostelecom, Selectel, Yandex Cloud.

2. Развитие:

Импортозамещение – рост спроса на локальные дата-центры после ухода AWS и Azure.

Государственные проекты – развитие ЦОД в рамках цифровой экономики (например, "Гособлако").

3. Тенденции:

Повышение энергоэффективности – из-за роста тарифов на электроэнергию.

Кибербезопасность – усиление требований к хранению данных внутри страны.

Гибридные облака – совмещение частных и государственных ЦОД.

4. Вызовы и перспективы

В мире: нехватка мощностей в ЕС и США из-за бума AI, дефицит чипов и оборудования.

В России: зависимость от импорта серверов, нехватка квалифицированных кадров.

4. Прогноз:

К 2030 году мировой рынок может превысить \$500 млрд, а российский – \$3–4 млрд.

Основной рост будет связан с AI, квантовыми вычислениями и edge-инфраструктурой.

Исходя из всего выше перечисленного можно сделать вывод, что Россия является крупным игроком на рынке центров обработки данных и имеет все перспективы для дальнейшего роста в этой отрасли.

2. Описание объекта исследования

В качестве исследования выбран центр обработки данных, расположенный в центральной части России (г. Самара). Площадь помещения составляет 125 м². В помещении расположено серверное оборудование мощностью 200 кВт. Для поддержания стабильной работы в случае нештатных ситуаций, помещение оборудовано ИБП (источником бесперебойного питания) мощностью 20 кВт. Система освещения и распределители питания мощностью 5 кВт.

3. Требования к климатическим условиям ЦОД

К центрам обработки данных, как и к большинству промышленных объектов применяются требования к внутреннему климату помещения. Российские нормы СН 512-78 (п.3) предъявляют следующие требования к микроклимату:

- температура воздуха в помещениях – 20°±2 °С (не более 25 °С). При подаче охлажденного воздуха непосредственно в устройства (стойки с аппаратурой) температура его на входе не должна быть ниже 14 °С;

- относительная влажность воздуха – 20–70 % (не более 75 % в холодный период, в теплый для 25 °С – не более 65 %, для 24 °С и ниже – не более 70 %);

- оптимальная скорость потока воздуха – 0,2 м/с (не более 0,3 м/с для холодного, 0,5 м/с для теплого периодов);

- запыленность воздуха помещений не должна превышать: в серверной – 0,75 мг/м³, с размерами частиц не более 3 мкм (атм. пыль, сажа, дым, споры, асбест); в помещениях обработки данных – 2 мг/м³

4. Выбор оптимальной установки

Для серверных помещений дата-центра предлагается система охлаждения с автоматическим переключением с прямого охлаждения наружным воздухом на косвенное охлаждение с помощью фреоновой холодильной установки. В летнее и ночное время система кондиционирования работает с помощью парокомпрессионной холодильной установки,



использующей в качестве хладагента фреон R410a, это связано с температурой наружного воздуха и пониженными тарифами на электроэнергию в ночное время суток. В дневное время суток система работает по принципам фрикулинга, т.е. с помощью охлаждения наружным воздухом и с отключением холодильной установки, также предусмотрен режим совместной работы холодильной установки и системы естественного охлаждения. Во время зимнего, неотапительного, периода года в данную систему предлагается включить систему мультивоздух, это связано с требованиями, предъявляемыми к микроклимату серверных помещений, а также линию частичной рециркуляции вытяжного воздуха, снижающую затраты на подогрев холодного зимнего воздуха

5. Исходные данные для расчета

Для дальнейшего расчета необходимо установить суммарное тепловыделение от оборудования, расположенного в ЦОД.

Результаты расчета тепловыделения представлены на рис 1.

Исходные данные			
Источники тепла	Характеристики	Тепловыделение	Итого
ИТ-оборудование	Совокупная мощность, Вт	5000*40	200 кВт
Источники бесперебойного питания (ИБП)	Номинальная мощность, Вт	0,04*20000+ +0,05*2000000	10800 Вт
Электрораспределительная аппаратура	Номинальная мощность, Вт	0,01*5000+ +0,02*200000	4050 Вт
Освещение	Площадь помещения, м2	21,53*125м2	2691,25 Вт
Персонал	Максимальная численность персонала, чел.	100*5	500 Вт

Рис.1. Расчет тепловыделения оборудования

Расчет тепловыделения производился согласно методике подбора систем кондиционирования для центров обработки данных.

Согласно приведённой методике и исходным данным было определено, что общее тепловыделение в серверной комнате составляет 218 кВт. На основании этих расчётов из каталога с типоразмерным рядом оборудования подбирается соответствующая охлаждающая установка.



6. Анализ климатических условий

Для дальнейшего исследования необходимо проанализировать климатические условия. Исследуемый объект располагается в средней полосе России в г. Самаре, Самарской области. Для сбора информации будем использовать различные ресурсы в сети Интернет.

С целью проведения сравнения эффективности работы системы прямого охлаждения в разных температурных режимах, проанализируем данные о температуре в разные месяцы года в диаметрально противоположных климатических зонах – г. Сочи и г. Новосибирск.

На диаграмме представлены графические изображения среднемесячных температур за 2024 г:

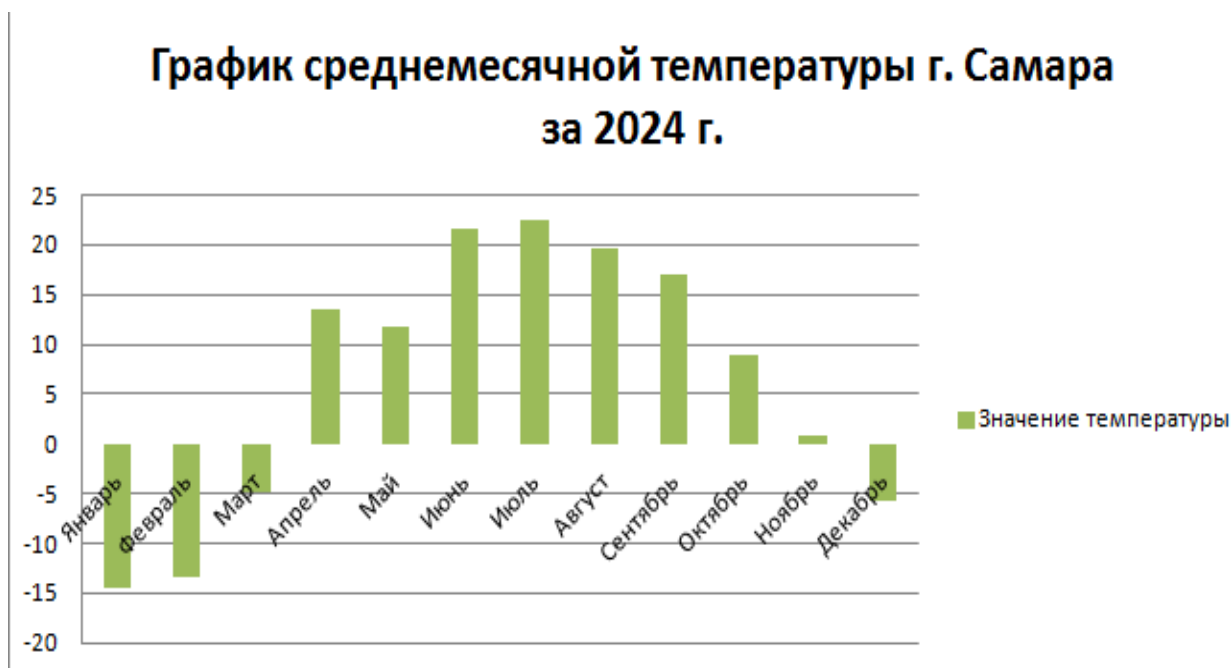


Рис. 2. График среднемесячной температуры в г. Самаре

На основании проведенных расчетов следует отметить, что система охлаждения будет проанализирована для трех типовых климатических регионов: в условиях континентального климата с морозными зимами, в зоне умеренного континентального климата с выраженной сезонной изменчивостью, а также в субтропической климатической зоне, где в течение исследуемого периода средние месячные температуры сохраняются выше нулевой отметки. Все последующие вычисления выполнялись с использованием среднемесячных значений температуры наружного воздуха для каждого конкретного месяца.

7. Основные расчетные формулы и соотношения

асчет проводился для двух основных режимов работы, а именно: классическая работа холодильной машины (теплового насоса) и режим совместной работы частичной рециркуляции и фрикулинга.

Расчет будет производиться поэтапно для каждого из городов по отдельности (для каждого месяца отдельный расчет), по окончанию расчета результаты будут сведены в таблицу.

Для города Самара расчет будет выглядеть следующим образом:

Таблица с плотностью воздуха при различных температурах представлена на рисунке 3



Плотность воздуха в г. Самаре по месяцам в 2024 г.	
Месяц	Плотность
Январь	1,366
Февраль	1,360
Март	1,317
Апрель	1,232
Май	1,240
Июнь	1,198
Июль	1,195
Август	1,207
Сентябрь	1,218
Октябрь	1,252
Ноябрь	1,289
Декабрь	1,321

Рис. 3. Плотность воздуха в г. Самаре по месяцам за 2024г.

Найдем показатели за январь:

Найдем расход воздуха, необходимый для удаления избытков полной теплоты $Q_{\text{сумм}}$ по формуле (1)

$$L_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{сумм}}}{\rho \cdot c_p \cdot (t_y - t_n)} \quad (1)$$

Где, t_y – температура воздуха, удаляемого из рабочей или обслуживаемой зоны помещения, принимаем равной 35 °С;

Где, t_n – температура подаваемого в помещение системой вентиляции, принимаем равной 20 °С;

ρ – плотность воздуха при средней температуре 27,5 °С;

c_p – удельная теплоемкость воздуха при температуре 27,5 °С;

Давление P будем считать атмосферным и равным 101325 Па;

Для нахождения плотности и удельной теплоемкости воспользуемся табличными значениями.

Плотность найдем исходя из значений таблицы, изображенной на рисунке 13:

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
-50	1,584	20	1,205	150	0,835	600	0,404
-45	1,549	30	1,165	160	0,815	650	0,383
-40	1,515	40	1,128	170	0,797	700	0,362
-35	1,484	50	1,093	180	0,779	750	0,346
-30	1,453	60	1,06	190	0,763	800	0,329
-25	1,424	70	1,029	200	0,746	850	0,315
-20	1,395	80	1	250	0,674	900	0,301
-15	1,369	90	0,972	300	0,615	950	0,289
-10	1,342	100	0,946	350	0,566	1000	0,277
-5	1,318	110	0,922	400	0,524	1050	0,267
0	1,293	120	0,898	450	0,49	1100	0,257
10	1,247	130	0,876	500	0,456	1150	0,248
15	1,226	140	0,854	550	0,43	1200	0,239

Рис. 4. Таблица плотности воздуха



Удельную теплоемкость найдем исходя из значений таблицы, изображенной на рисунке 5:

t, °C	C _p , Дж/(кг·град)	t, °C	C _p , Дж/(кг·град)	t, °C	C _p , Дж/(кг·град)
-50	1013	20	1005	150	1015
-45	1013	30	1005	160	1017
-40	1013	40	1005	170	1020
-35	1013	50	1005	180	1022
-30	1013	60	1005	190	1024
-25	1011	70	1009	200	1026
-20	1009	80	1009	250	1037
-15	1009	90	1009	300	1047
-10	1009	100	1009	350	1058
-5	1007	110	1009	400	1068
0	1005	120	1009	450	1081
10	1005	130	1011	500	1093
15	1005	140	1013	550	1104

Рис. 5. Таблица удельной теплоемкости

$$L_{\Pi} = \frac{218}{1,192 \cdot 1,005 \cdot (35 - 20)} = 12, 13 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Оценим затраты холода или тепла для выбранной установки, в зависимости от режима работы – холодильная машина или тепловой насос соответственно. Для этого воспользуемся данными о значениях среднемесячной температуры в г. Самара за 2024 г., изображенных на рисунке 7.

Для сравнения возьмем четыре характерные точки: в зимний, летний и переходный периоды года, а именно в январе, июле, апреле и октябре. Затраты энергии на охлаждение или нагрев найдем по формуле (2)

$$Q_0 = L_{\Pi} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_{\Pi} - t_{\text{нро}}) \tag{2}$$

Где $t_{\text{нро}}$ – температура наружного воздуха соответственно в каждом из месяцев года;

Анализ полученных результатов

Для более наглядного обзора данных, полученных в результате расчета, построим гистограммы изменений расхода электроэнергии на охлаждение или нагрев воздуха в классическом режиме работы и в режиме совместной работы рециркуляции и фрикулинга. Гистограммы построим для трех рассчитанных городов, они приведены на рисунках 18,19 и 20.



Сравнение энергозатрат для г. Самара за 2024г.

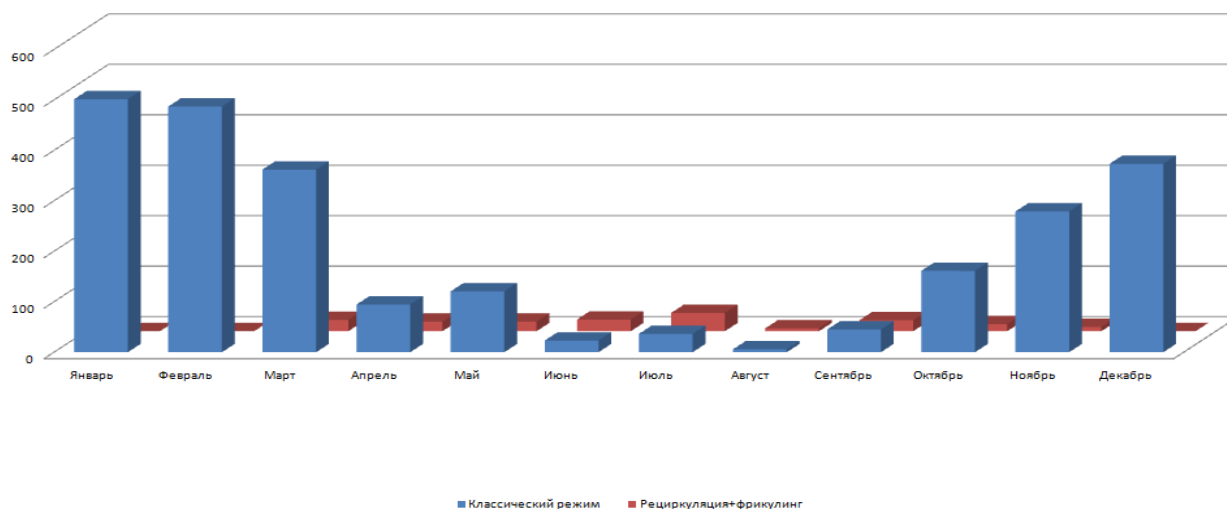


Рис.18. Изменение энергозатрат на обогрев или охлаждения температуры при разных режимах работы установки в г. Самара за 2024 г.

Анализируя полученные гистограммы, можно сделать вывод, что наибольшую эффективность система охлаждения имеет в режиме совместной работы рециркуляции и фрикулинга в холодные и переходный периоды года. В данный период наблюдается существенное снижение энергозатрат при использовании естественного охлаждения.

Так, например, для г. Самары в январе и декабре 2024 года включение в схему рециркуляции позволяет эксплуатировать систему охлаждения с выключенной холодильной машиной, осуществляя прямой фрикулинг за счет теплоты вытяжного воздуха. Данная эффективность была достигнута при температуре наружного воздуха примерно от -9 до -4 °C

По аналогии построим гистограмму полученных данных расчета для г. Новосибирска исходя из среднемесячной температуры за 2024г.

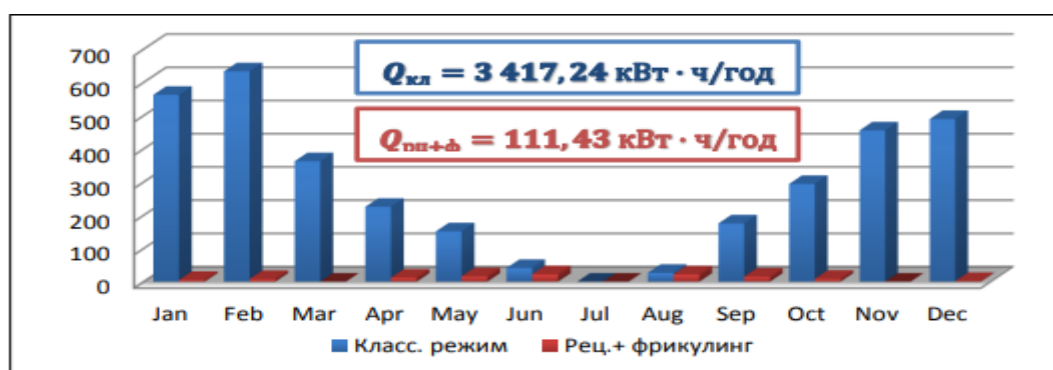


Рис.19. Изменение энергозатрат на обогрев или охлаждения температуры при разных режимах работы установки в г. Новосибирск за 2024 г.

Из гистограммы видно, что наибольшая эффективность системы охлаждения для г. Новосибирска, а соответственно для всей холодной климатической зоны страны, наблюдается в марте и ноябре, т.е. в переходный период года. Это связано с тем, что в холодный период в



этом регионе температура наружного воздуха достигает слишком низких значений и потенциала удаляемого воздуха не хватает, чтобы нагреть свежий приточный воздух до требуемых значений. Из этого можно сделать вывод, что эффективность реализации фрикулинга имеет не только верхний (для теплого периода), но и нижний предел оптимальных температур наружного воздуха.

Для третьей климатической зоны, такой как Краснодарский край, а именно, г. Сочи, видно, что реализация фрикулинга дает эффективность по сравнению с классическим режимом работы системы, но существенно меньшую, чем для двух других климатических зон. Уже при повышении температуры наружного воздуха выше 25 °С реализация прямого и косвенного фрикулинга нецелесообразна, а энергозатраты в холодильной установке заметно растут.

Также из анализа полученных результатов можно заметить, что подобное проектное решение имеет не только экономический, но и экологический положительный эффект. Так для г. Самары снижая энергопотребление фактически в 17,5 раз, существенно снижается объем сжигаемого топлива. В свою очередь, уменьшение объемов реализованного топлива, улучшает состояние окружающей среды, снижает количество таких выбросов, как оксиды азота, оксиды углерода, циклические полиуглеводороды, твердые частицы, оксиды серы, зола (для мазута и угля). Так, например, на 1 м³ природного газа приходится 5,1 г NO₂, 0,016 г полиуглеводородов, 0,002-0,005 г угарного газа и 2 000 г CO₂.

3. Основные выводы по работе

В работе были рассмотрены различные варианты схем систем охлаждения оборудования дата – центра. Подробно проанализировано было четыре схемы, из которых для данного дата-центра была выбрана и рассчитана одна схема, как наиболее перспективная. Эффективность схемы была рассмотрена с технической и экономической точек зрения;

- в ходе проекта был предложен метод, по которому может производиться вычисление экономии при введении естественного охлаждения в различные, с точки зрения Класс режим Рец.+ фрикулинг 21 конфигурации, схемы, а также расположенные в различных климатических регионах. Предложенный способ позволяет рассчитывать схему охлаждения в разных режимах работы.

Список литературы:

1. Российский рынок коммерческих дата-центров 2013-2017 / Сервер Iks-consulting.» / [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.iks-consulting.ru/markets-44.html>
2. Строительные нормы и правила: СН 512–78. Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин от 22 декабря 1978 г. № 244, п. 3.: нормативно–технический материал. – Москва: [б.и.], 1978. – 23 с. 22
3. Рассмусен Н. Расчет технических требований для общего охлаждения в центрах обработки данных / Н. Рассмусен // Информационная статья American Power Conversion. – 2003. – № 25. – 9 с.

