

На правах рукописи



Дмитриев Юрий Александрович

ТЕПЛОВОЙ И ВОЗДУШНЫЙ РЕЖИМЫ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Специальность: 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Пономарев Николай Степанович

Официальные оппоненты: **Аверкова Ольга Александровна**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова»,
кафедра Теплогазоснабжения и вентиляции,
профессор;

Мансуров Рустам Шамильевич,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет»,
кафедра Теплогазоснабжения и вентиляции,
заведующий.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет».**

Защита диссертации состоится «12» декабря 2023 года в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.380.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, аудитория 220. Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/dmitriev-yuriy-aleksandrovich>.

Автореферат разослан «23» октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В. А. Пухкал

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном обществе информационные технологии присутствуют практически во всех сферах жизнедеятельности человека. Решая задачи по организации обработки, передачи и хранения информации, они позволяют экономить время, энергию и материальные ресурсы. Серверное оборудование, организующее данные процессы, размещают в машинных залах центров обработки данных, где оно группируется в стойках или шкафах. Для бесперебойной работы центров обработки данных в машинных залах необходимо обеспечивать определенные параметры воздуха. Отклонения от требуемых параметров воздуха могут привести к выходу из строя серверного оборудования. Актуальной задачей является изучение влияния различных технологических решений и характеристик серверного оборудования на тепловой и воздушный режимы центров обработки данных.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической основой послужили работы отечественных и зарубежных ученых: Г.Н. Абрамовича, О.А. Аверковой, В.В. Батурина, В.Н. Богословского, М.И. Гримитлина, Т.А. Дацюк, А.М. Зиганшина, В.В. Ловцова, К.И. Логачева, Г.А. Максимова, Р.Ш. Мансурова, П.В. Участкина, Ю.Н. Хомутецкого, А.Н. Чернова, A.M. Abbas, J. Cho, P. Lin, M. Tatchell-Evans, S.A. Nada, N. Rasmussen.

Цель работы заключается в исследовании влияния различных технологических решений и характеристик серверного оборудования на тепловой и воздушный режимы центров обработки данных.

Задачи исследования:

- провести анализ отечественных и зарубежных исследований в области обеспечения теплового и воздушного режимов центров обработки данных;
- выполнить натурные исследования теплового и воздушного режимов действующего центра обработки данных при различных способах организации воздушных потоков;
- разработать численные модели для исследования влияния технологических решений и характеристик серверного оборудования на тепловой и воздушный режимы центра обработки данных;
- разработать методику расчета и рекомендации по проектированию систем кондиционирования воздуха для центров обработки данных.

Объектом исследования являются машинные залы центра обработки данных.

Предметом исследования являются тепловой и воздушный режимы машинных залов в центре обработки данных.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являются основные теоретические

положения процессов тепломассобмена и аэродинамики; методы планирования экспериментальных исследований; теория численного моделирования гидродинамических потоков.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.3. «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», а именно пункт 1. «Климатологическое обеспечение зданий. Тепломассообмен и гидроаэромеханика систем теплогазоснабжения и вентиляции, тепло и холодогенерирующего оборудования, ограждающих конструкций. Исследования теплового, воздушного, влажностного режимов помещений, зданий и сооружений» и пункт 2 «Технологические задачи теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, разработка методов энергосбережения систем и элементов теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений. Очистка и расчет рассеивания загрязняющих веществ от вентиляционных выбросов».

Научная новизна исследования:

- впервые в натурных условиях действующего центра обработки данных установлены поля распределения температуры воздуха при различных способах размещения потолочных и фальш-панелей для выявления зон с температурой воздуха выше нормируемого значения;

- установлена зависимость перепада температур воздуха в стойках от потребляемой электрической мощности при различной загрузке серверных стоек для определения производительности систем кондиционирования воздуха;

- получена зависимость объемного расхода воздуха, проходящего через серверное оборудование типа шасси с блейд-серверами и стоечного типа, от потребляемой электрической мощности;

- определена зависимость градиента температуры воздуха по высоте машинного зала в центре обработки данных от количественного соотношения «горячих» и «холодных» коридоров, потребляемой электрической мощности стоек и степени их загрузки серверным оборудованием.

Теоретическая значимость работы состоит в анализе влияния технологических решений и характеристик серверного оборудования на тепловой и воздушный режимы центров обработки данных.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики расчета и рекомендаций по проектированию систем кондиционирования воздуха для центров обработки данных.

Положения, выносимые на защиту:

- поля распределения температуры воздуха при различных способах размещения потолочных и фальш-панелей;

- зависимость перепада температур воздуха в стойках от потребляемой электрической мощности;

- зависимость объемного расхода воздуха, проходящего через серверное оборудование типа шасси с блейд-серверами и стоечного типа, от потребляемой электрической мощности;
- зависимость градиента температуры воздуха по высоте машинного зала в центре обработки данных от количественного соотношения «горячих» и «холодных» коридоров, потребляемой электрической мощности стоек и степени их загрузки серверным оборудованием;
- методика расчета и рекомендации по проектированию систем кондиционирования воздуха для центров обработки данных.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследования обоснована применением методов планирования эксперимента; подтверждена внедрением теоретических разработок проведенных исследований в практическую деятельность предприятия; обеспечена использованием поверенных средств измерений и методов статистической обработки данных.

Основные результаты исследования были представлены на следующих конференциях: XX Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» (НИИСФ, 2022), V Международной научно-практической конференции «Методология безопасности среды жизнедеятельности» (Институт «Академия строительства и архитектуры» Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, 2022), Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Инженерные системы и городское хозяйство» (СПбГАСУ, 2023).

Результаты диссертационного исследования были внедрены в Северо-Западном главном управлении Центрального банка Российской Федерации. Организацией представлен акт о внедрении научных результатов.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 печатных работах, в том числе 2 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, утвержденных ВАК РФ и 1 работа в издании, входящем в базу SCOPUS.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав с выводами по каждой из них, заключения и приложений, содержит 116 страниц печатного текста и 14 страниц приложений, 8 таблиц, 56 рисунков и список литературы из 120 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, характеризуется степень ее разработанности, формулируется цель и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования, приводятся научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также сведения об апробации и публикациях.

В первой главе выполнен обзор и анализ отечественных и зарубежных исследований в области обеспечения теплового и воздушного режимов центров обработки данных.

Во второй главе приведены результаты натурного исследования теплового и воздушного режимов центра обработки данных при различных способах организации воздушных потоков. Определены зависимости объемного расхода воздуха, проходящего через серверное оборудование, от потребляемой электрической мощности и перепада температур воздуха в стойках от их потребляемой электрической мощности.

В третьей главе приведены результаты численного исследования влияния технологических решений и характеристик серверного оборудования на тепловой и воздушный режимы центров обработки данных.

В четвертой главе приведены рекомендации по проектированию и методика расчета систем кондиционирования воздуха для центров обработки данных.

В заключении приведены основные выводы по работе.

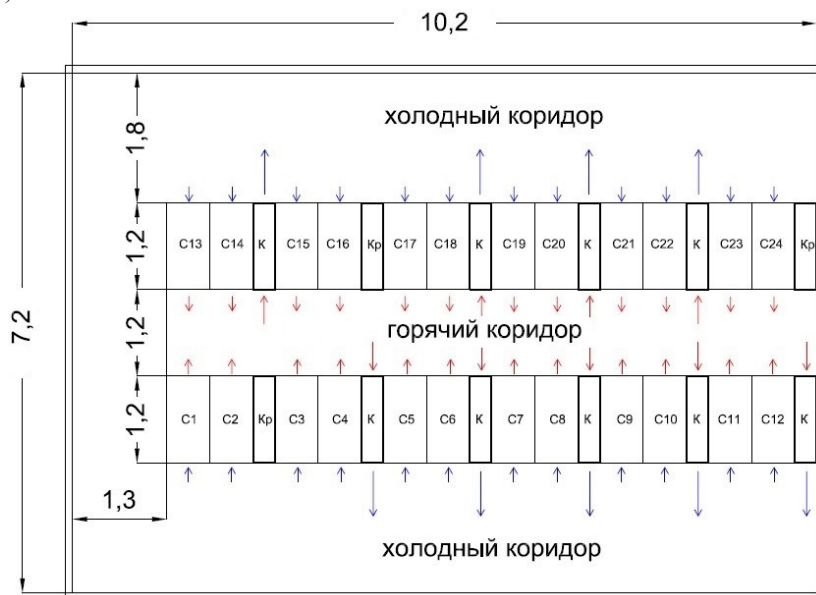
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Поля распределения температуры воздуха при различных способах размещения потолочных и фальш-панелей.

Для проведения исследований выбран центр обработки данных (далее – ЦОД) в г. Санкт-Петербург, состоящий из четырех машинных залов, в каждом из которых установлено два ряда по 12 стоек. Между рядов стоек организованы «горячие» и «холодные» коридоры. Серверное оборудование в стойках установлено таким образом, чтобы отвод теплоты производился в «горячий» коридор, а забор воздуха для охлаждения оборудования производился из «холодного» коридора. В качестве оборудования систем кондиционирования воздуха (далее – СКВ) в каждом машинном зале использованы прецизионные кондиционеры в количестве 12 шт., которые установлены внутри каждого ряда стоек. Проектное значение температуры воздуха в «холодном» коридоре машинных залов составляет 22 ± 2 °С. Система вентиляции выключена. Потребляемая электрическая мощность стоек в машинных залах не превышает 6 кВт.

Для проведения исследования размещения потолочных панелей над технологическим коридором выбран машинный зал (рисунок 1) с наибольшим значением суммарной потребляемой электрической мощности стоек и однотипным серверным оборудованием в стойках – шасси с блейд-серверами.

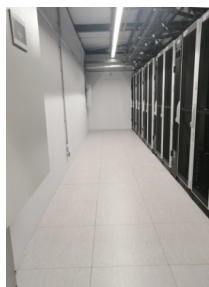
а)



б)



в)



г)



д)



Рисунок 1 – Машинный зал ЦОД в г. Санкт-Петербург: а – план машинного зала: С1-С24 – стойки с серверным оборудованием, К – кондиционеры, К_р – резервные кондиционеры; б – «горячий» коридор над которым установлены потолочные панели; в – «холодный» коридор; г – серверное оборудование в стойке; д – расположение точек измерения и датчика температуры воздуха, входящего в стойки

Габариты машинного зала: длина – 10,2 м; ширина – 7,2 м; высота – 3,0 м. Габариты одного кондиционера: длина – 1,2 м; ширина – 0,3 м; высота – 2,0 м. Габариты одной стойки с серверным оборудованием: длина – 1,2 м; ширина – 0,6 м; высота – 2,0 м. Габариты одного серверного

оборудования: длина – 0,84 м; ширина – 0,44 м; высота – 0,53 м. Потолочные панели изготовлены из прозрачного поликарбоната толщиной 6 мм. Контроль параметров воздуха производится непрерывно с помощью датчиков, установленных на дверях стоек. Также выполнены натурные измерения температуры воздуха на входе в стойки с помощью комбинированного прибора Testo 435-1. Расположение датчика температуры воздуха в каждой стойке и точек измерений представлено на рисунке 1д.

На рисунке 1а красными стрелками обозначено направление воздушных потоков нагретого воздуха, синими стрелками – охлажденного воздуха.

В результате натурных измерений выявлено, что в случае использования только потолочных панелей над технологическим коридором максимальная температура воздуха на входе в некоторые стойки достигает 29 °С (рисунок 2).

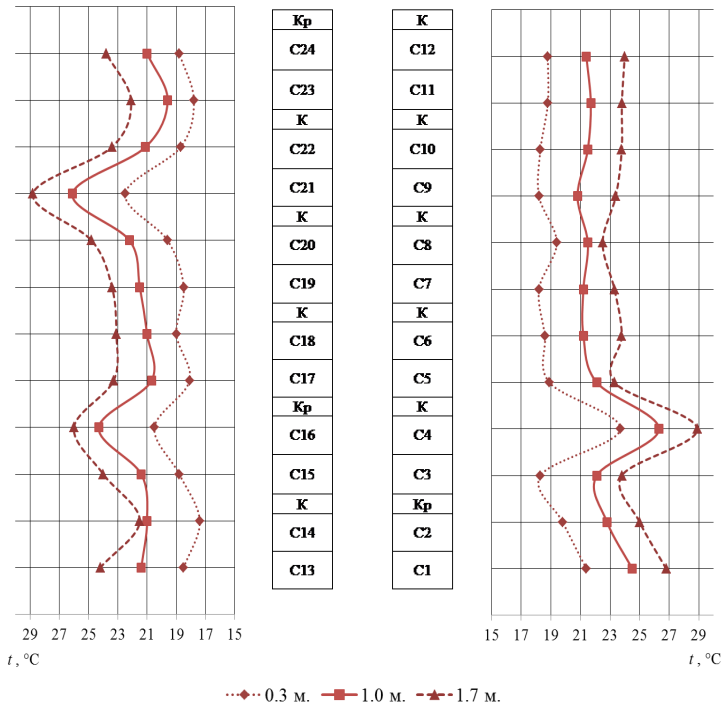


Рисунок 2 – Поля распределения температуры воздуха в «холодном» коридоре машинного зала на высоте + 0,3 м, + 1,0 м и + 1,7 м от уровня пола в случае использования только потолочных панелей. C1–C24 – стойки с серверным оборудованием; К – кондиционеры; К_р – резервные кондиционеры

Установлено, что стойки, в которых средняя температура воздуха на входе составляет более 24°C расположены рядом с резервными кондиционерами и/или напротив более нагруженных стоек.

Для обеспечения проектного значения температуры воздуха выполнено устройство фальш-панелей в свободном пространстве стоек. Результаты натурных измерений после установки фальш-панелей представлены на рисунке 3.

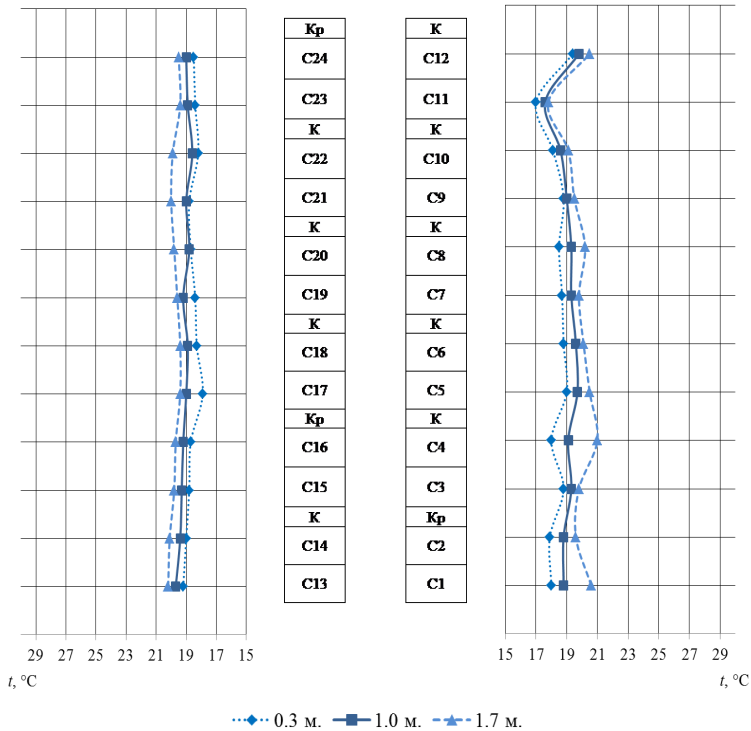


Рисунок 3 – Поля распределения температуры воздуха в «холодном» коридоре машинного зала на высоте + 0,3 м, + 1,0 м и + 1,7 м от уровня пола в случае совместного использования потолочных панелей и фальш-панелей. C1–C24 – стойки с серверным оборудованием; К – кондиционеры; К_р – резервные кондиционеры

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что для обеспечения необходимого температурного режима в стойках размещение потолочных панелей над технологическим коридором целесообразно предусматривать совместно с фальш-панелями в свободном пространстве стоек.

2. Зависимость перепада температур воздуха в стойках от потребляемой электрической мощности.

В зависимости от целей использования, ЦОД разделяют на коммерческие и корпоративные. Целью корпоративных ЦОД является поддержка бизнес-процессов, в основном крупных организаций, в то время как коммерческие ЦОД рассчитаны на получение прибыли от сдачи в аренду стоек и предоставление сервисов потребителям среднего и малого бизнеса. При проектировании коммерческих ЦОД данные о загрузке и типе оборудования, которое предполагается установить в стойках, обычно отсутствуют. Известны только значения подводимой к стойкам электрической мощности. Однако для расчета объема воздуха, необходимого для охлаждения серверного оборудования, и производительности СКВ по воздуху, необходимы не только данные о подводимой к стойкам электрической мощности, но и данные о перепаде температур воздуха в стойках. Обычно это значение принимают постоянным, вне зависимости от потребляемой электрической мощности стоек.

Для определения зависимости перепада температур воздуха в стойках от потребляемой электрической мощности в рассматриваемом ЦОД выбраны 69 стоек, в которых присутствует серверное оборудование с различной степенью загрузки. Измерения температуры на входе и выходе воздуха из стоек с серверным оборудованием выполнены комбинированным прибором Testo 435-1 после установки потолочных панелей над технологическим коридором и фальш-панелей в свободном пространстве стоек. Расположение точек измерения на входе и выходе воздуха из стоек аналогично расположению, представленному на рисунке 1д.

В результате измерений получена зависимость между перепадом температур воздуха в стойках и потребляемой электрической мощностью серверного оборудования в стойках, не превышающей 6 кВт (рисунок 4).

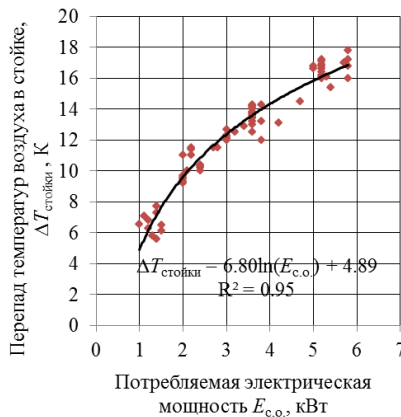


Рисунок 4 – Зависимость перепада температур воздуха в стойках $\Delta T_{стойки}$ (К) от потребляемой электрической мощности серверного оборудования в стойках $E_{с.о.}$ (кВт)

Выявлено, что вне зависимости от типа установленного оборудования и степени загрузки стоек, данная зависимость носит логарифмический характер

$$\Delta T_{\text{стойки}} = 6,80 \cdot \ln E_{\text{с.о.}} + 4,89, \text{ K}, \quad (1)$$

где $E_{\text{с.о.}}$ – потребляемая электрическая мощность серверного оборудования в стойке, кВт.

Проверка статистической значимости полученной зависимости выполнена с помощью F-критерия Фишера. В результате расчета выявлено, что значение критерия Фишера меньше табличного $F = 1,05 < F_{\pi(0,05;1;67)} = 3,98$. Таким образом, с заданной вероятностью можно считать, что дисперсия выборки значений, полученных в результате натурных измерений равна дисперсии значений, полученных в результате аппроксимации. Следовательно, статистическая значимость полученной зависимости доказана.

3. Зависимость объемного расхода воздуха, проходящего через серверное оборудование типа шасси с блейд-серверами и стоечного типа, от потребляемой электрической мощности.

Для определения объемного расхода воздуха выполнены натурные измерения скорости воздуха на выходе из серверного оборудования $v_{\text{с.о.}}$ (м/с). Расположение точек измерений на серверном оборудовании типа шасси с блейд-серверами представлено на рисунке 5. Расположение точек измерений на серверном оборудовании стоечного типа представлено на рисунке 6. Измерения выполнены с помощью прибора Testo 435-1 при средней температуре воздуха, входящего в серверное оборудование, 19 °С.

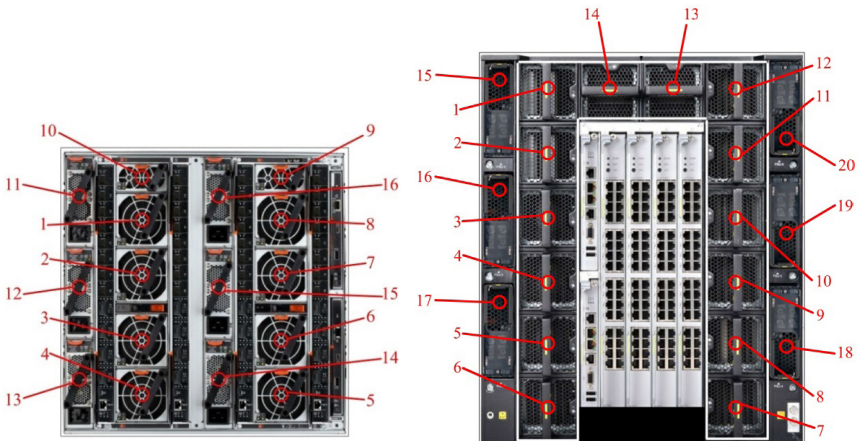


Рисунок 5 – Расположение точек измерения скорости воздуха на серверном оборудовании типа шасси с блейд-серверами



Рисунок 6 – Расположение точек измерения скорости воздуха на серверном оборудовании стойечного типа

В результате натурных измерений получена зависимость объемного расхода воздуха, проходящего через серверное оборудование типа шасси с блейд-серверами и стойечного типа, от потребляемой электрической мощности (рисунок 7). На рисунке 7 значения объемного расхода воздуха, полученные при потребляемой электрической мощности до 1 кВт, относятся к серверному оборудованию стойечного типа. Значения объемного расхода воздуха, полученные при потребляемой электрической мощности выше 1 кВт, относятся к серверному оборудованию типа шасси с блейд-серверами.

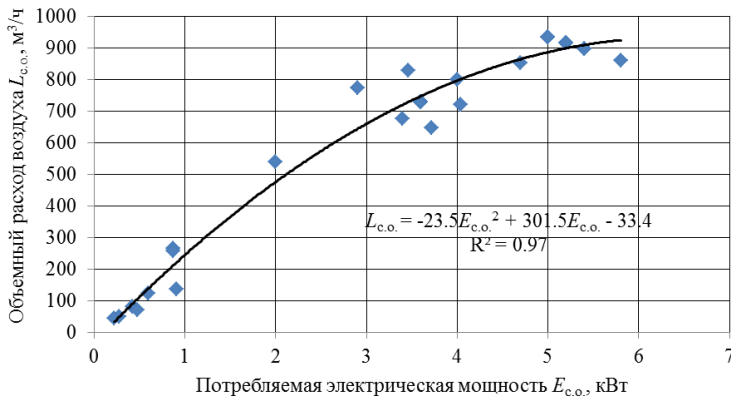


Рисунок 7 – Зависимость объемного расхода воздуха, проходящего через серверное оборудование типа шасси с блейд-серверами и стойечного типа, от потребляемой электрической мощности

Выявлено, что для серверного оборудования типа шасси с блейд-серверами и стойечного типа зависимость объемного расхода воздуха от потребляемой электрической мощности является полиномом

$$L_{c.o.} = -23,5 \cdot E_{c.o.}^2 + 301,5 \cdot E_{c.o.} - 33,4, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где $E_{c.o.}$ – потребляемая электрическая мощность серверного оборудования в стойке, кВт.

Полученная зависимость может быть использована для определения скорости воздуха, проходящего через серверное оборудование типа шасси с блейд-серверами или стоечного типа. В свою очередь, значение скорости воздуха, проходящего через серверное оборудование, может быть использовано при проведении численного моделирования воздушно-теплого режима ЦОД.

Проверка статистической значимости полученной зависимости выполнена с помощью F-критерия Фишера. В результате расчета выявлено, что значение критерия Фишера меньше табличного $F = 1,02 < F_{\tau(0,05;1;33)} = 4,1$. Таким образом, с заданной вероятностью можно считать, что дисперсия выборки значений, полученных в результате натурных измерений, равна дисперсии значений, полученных в результате аппроксимации. Следовательно, статистическая значимость полученной зависимости доказана.

4. Зависимость градиента температуры воздуха по высоте машинного зала в центре обработки данных от количественного соотношения «горячих» и «холодных» коридоров, потребляемой электрической мощности стоек и степени их загрузки серверным оборудованием.

Для определения зависимости градиента температуры воздуха по высоте машинного зала в центре обработки данных от количественного соотношения «горячих» и «холодных» коридоров, потребляемой электрической мощности стоек (4,7 кВт и 10 кВт) и степени их загрузки серверным оборудованием выполнено численное моделирование в программном комплексе STAR CCM+. Геометрические модели машинного зала приняты по аналогии с действующим машинным залом в ЦОД. Принято, что свободное от серверного оборудования пространство стоек в моделях заглушено фальш-панелями, а потолочные панели над технологическими коридорами не установлены. Для оценки степени загрузки стоек серверным оборудованием введено понятие коэффициента загрузки

$$K_z = \frac{H_o}{H_c} \leq 1, \quad (3)$$

где H_o – высота загрузки стоек серверным оборудованием (принято, что загрузка стоек серверным оборудованием производится снизу-вверх), м; H_c – высота стойки (стандартная высота стойки 2 м.), м.

Принято, что при коэффициенте загрузки $K_z = 0,3$ в стойках машинного зала установлено серверное оборудование типа шасси с блейд-серверами, при коэффициенте загрузки $K_z \geq 0,5$ – серверное оборудование стоечного типа. Необходимые для построения моделей значения расхода воздуха, проходящего через серверное оборудование, получены по зависимости (2) при потребляемой электрической мощности стоек 4,7 кВт

или по формуле (4) при потребляемой электрической мощности стоек 10 кВт.

$$L_{c.o.} = \frac{3,6 \cdot Q_{c.o.}}{\rho \cdot c \cdot \Delta T_{c.o.}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (4)$$

где $Q_{c.o.}$ – тепловой поток от серверного оборудования, который принят равным количеству потребляемой электрической мощности стойки ($E_{c.o.} = 10000 \text{ Вт}$), Вт; ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; c – удельная теплоемкость воздуха, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\Delta T_{c.o.}$ – перепад температур входящего и выходящего воздуха на серверном оборудовании типа шасси с блейд-серверами марки Huawei, который принят равным 20 К.

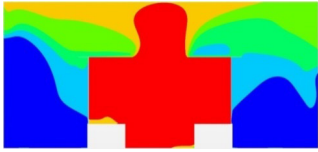
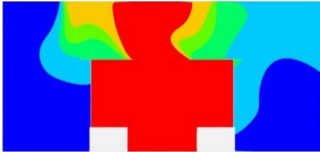
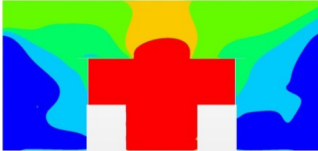
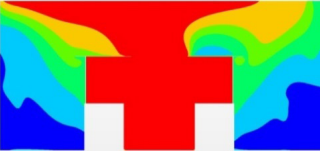
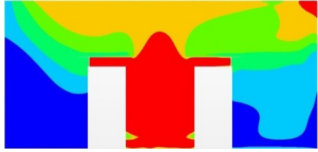
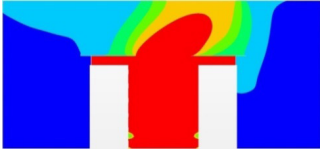
В таблице 1 представлены характеристики серверного оборудования, которые использованы при проведении численного моделирования.

Таблица 1 – Характеристики серверного оборудования в стойках

$E_{c.o.}$, кВт	Тип серверного оборудования	Количество оборудования в стойке, шт.	K_z стойки	Суммарный расход воздуха $L_{c.o.}$, $\text{м}^3/\text{ч}$
4,7	шасси с блейд-серверами	1	0,3	865
	стоечное	11	0,5	
		21	0,9	
10	шасси с блейд-серверами	1	0,3	1500
	стоечное	11	0,5	
		21	0,9	

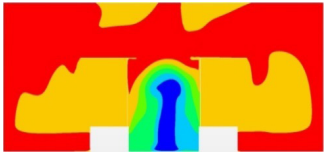
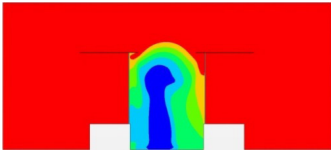
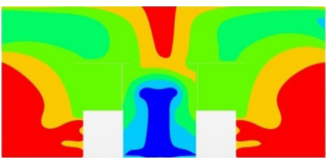
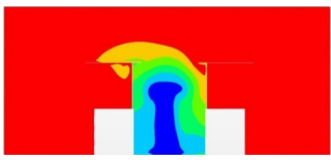
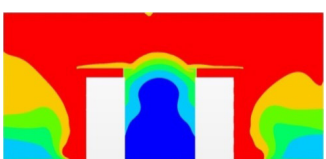
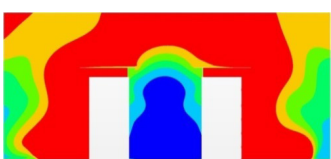
В таблицах 3 и 4 отображены результаты численного моделирования в виде полей распределения температуры воздуха в плоскости y - z .

Таблица 3 – Поля распределения температуры воздуха в машинном зале
для варианта с преобладающим количеством «холодных» коридоров

Коэффициент загрузки стоек	Потребляемая электрическая мощность стоек, кВт	
	4,7	10
0,3		
0,5		
0,9		

Примечание: температурная шкала (°C) — 

Таблица 4 – Поля распределения температуры воздуха в машинном зале для варианта с преобладающим количеством «горячих» коридоров

Коэффициент загрузки стоек	Потребляемая электрическая мощность стоек, кВт	
	4,7	10
0,3		
0,5		
0,9		

Примечание: температурная шкала (°C) – 20,0 22,5 25,0 27,5 30,0 32,5 35,0

На основании полученных в процессе численного моделирования полей распределения температуры воздуха выполнен многофакторный регрессионный анализ. В результате аппроксимации функции $gradt = f(K_3, E_{c.o.}, N_{гк}/N_{хк})$ получен полином

$$gradt = 1,4 - 1,2 \cdot K_3 + 0,1 \cdot E_{c.o.} + 1,2 \cdot \frac{N_{гк}}{N_{хк}}, \text{ } ^\circ\text{C/м}, \quad (5)$$

где $N_{гк}$ – количество «горячих» коридоров в машинном зале, шт.; $N_{хк}$ – количество «холодных» коридоров в машинном зале, шт.; $E_{c.o.}$ – потребляемая электрическая мощность стоек, кВт; K_3 – безразмерный коэффициент загрузки стоек в машинном зале.

Зависимость градиента температуры по высоте стоек от коэффициента загрузки стоек K_3 , потребляемой электрической мощности серверного оборудования в стойках $E_{c.o.}$ и варианта количественного соотношения коридоров в машинном зале отображена на рисунке 8.

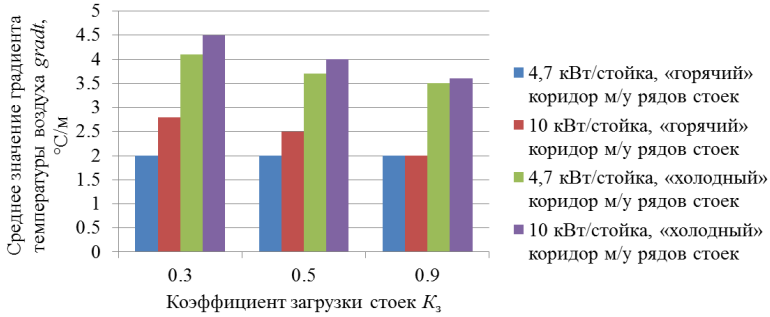


Рисунок 8 – Среднее значение градиента температуры воздуха по высоте стоек в зависимости от коэффициента загрузки стоек K_s , потребляемой электрической мощности серверного оборудования в стойках $E_{с.о.}$ и варианта количественного соотношения коридоров в машинном зале

Для оценки количества стоек в машинном зале, в которых температура воздуха на входе в серверное оборудование превышает рекомендуемое значение (27°C), вычислен безразмерный коэффициент RCI_{high} по формуле

$$RCI_{high} = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (t_{вх.i} - t_{рек.мах})_{t_{вх.i} > t_{рек.мах}}}{N \cdot (t_{доп.мах} - t_{рек.мах})} \right] \cdot 100, \% \quad (6)$$

где $t_{доп.мах}$ – допустимое значение температуры (32°C), $^{\circ}\text{C}$; $t_{рек.мах}$ – рекомендуемое значение температуры (27°C), $^{\circ}\text{C}$; $t_{вх.i}$ – средняя температура воздуха, входящего в серверное оборудование в стойке, $^{\circ}\text{C}$.

Результат расчета коэффициента RCI_{high} представлен на рисунке 9.

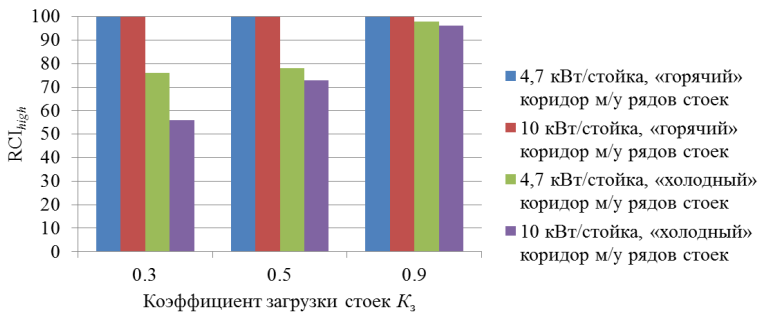


Рисунок 9 – Значения безразмерного коэффициента RCI_{high} в зависимости от коэффициента загрузки стоек K_s , потребляемой электрической мощности серверного оборудования в стойках $E_{с.о.}$ и варианта количественного соотношения коридоров в машинном зале

В результате численного моделирования выявлено следующее:

- получена зависимость среднего значения градиента температуры воздуха по высоте стоек от количественного соотношения «горячих» и «холодных» коридоров в машинном зале, коэффициента загрузки и потребляемой электрической мощности стоек с серверным оборудованием.

- установлено, что вне зависимости от количественного соотношения «горячих» и «холодных» коридоров в машинном зале наблюдается рост градиента температуры воздуха по высоте стоек при снижении коэффициента загрузки и увеличении потребляемой электрической мощности стоек с серверным оборудованием.

- для всех вариантов с преобладающим количеством «холодных» коридоров не выявлено зон, в которых температура воздуха выше рекомендуемого значения (коэффициент $RCI_{high} = 100 \%$). Для всех вариантов с преобладающим количеством «горячих» коридоров выявлено, что температура воздуха на одной или более стойках выше рекомендуемого значения (коэффициент $RCI_{high} < 100 \%$).

5. Методика расчета и рекомендации по проектированию систем кондиционирования воздуха для центров обработки данных.

В результате экспериментальных и численных исследований разработаны рекомендации по проектированию систем кондиционирования воздуха для ЦОД.

Устройство потолочных панелей над «холодными» коридорами и фальш-панелей в свободном пространстве стоек рекомендуется предусматривать, если количество «горячих» коридоров в машинном зале ЦОД преобладает над количеством «холодных» коридоров.

Устройство потолочных панелей над «горячими» коридорами и фальш-панелей в свободном пространстве стоек рекомендуется предусматривать:

- при размещении в машинных залах рабочих мест и наличии отдельно стоящих стоек;

- для увеличения времени безаварийной работы серверного оборудования в случае возможных перебоев в электроснабжении ЦОД.

Также в машинных залах ЦОД, в которых количество «холодных» коридоров преобладает над количеством «горячих» коридоров, допускается устройство только фальш-панелей в свободном пространстве стоек при условии обеспечения высоты помещения не менее 3 м.

Фальш-панели в свободном пространстве стоек рекомендуется устанавливать на ряд вертикальных направляющих ближе к «холодному» коридору.

Теплопоступления от серверного оборудования в стойках принимают равными величине потребляемой электрической мощности. В паспорте на серверное оборудование в основном указывается полезная выходная потребляемая электрическая мощность, которая не учитывает потери электроэнергии

в блоке питания серверного оборудования. Поэтому расчет теплоступлений от серверного оборудования необходимо производить по формуле

$$Q_{c.o.} = E_{c.o.} = 100 \cdot E_{\text{вых.с.о.}} \cdot N_{\text{б.п.}} \cdot \eta_{\text{б.п.}}^{-1}, \text{ Вт}, \quad (7)$$

где $Q_{c.o.}$ – теплоступления от серверного оборудования, Вт; $E_{c.o.}$ – потребляемая электрическая мощность серверного оборудования, Вт; $E_{\text{вых.с.о.}}$ – полезная выходная мощность или паспортная мощность блоков питания серверного оборудования, Вт; $N_{\text{б.п.}}$ – количество основных блоков питания серверного оборудования в соответствии с паспортной схемой резервирования, шт; $\eta_{\text{б.п.}}$ – эффективность одного блока питания, %.

Методика расчета производительности систем кондиционирования воздуха для ЦОД заключается в выполнении следующей последовательности действий:

- а) определить количество стоек в машинном зале;
- б) вычислить требуемый расход воздуха для охлаждения каждой стойки

$$L_{\text{стойка}} = \frac{3600 \cdot E_{c.o.}}{\rho \cdot c \cdot \Delta T_{\text{стойка}}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (8)$$

где $L_{\text{стойка}}$ – объемный расход воздуха, проходящего через стойку, м³/ч; ρ – плотность воздуха, кг/м³; c – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); $\Delta T_{\text{стойка}}$ – перепад температур воздуха в стойке, К; $E_{c.o.}$ – значение потребляемой электрической мощности стойки, кВт;

в) рассчитать суммарную требуемую производительность кондиционеров по воздуху с учетом 5% запаса для исключения циркуляции воздушных потоков из «горячего» коридора в «холодный» по формуле

$$L_k = 1,05 \cdot \sum_{i=1}^N L_{\text{стойка},i} = 1,05 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{3600 \cdot E_{c.o,i}}{\rho \cdot c \cdot \Delta T_{\text{стойка},i}}, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (9)$$

Информация о потребляемой электрической мощности каждой стойки $E_{c.o,i}$ с серверным оборудованием, как правило, известна. Перепад температур воздуха в каждой стойке $\Delta T_{\text{стойка},i}$ можно вычислить по экспериментальной зависимости (1).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. На основании проведенного анализа отечественных и зарубежных исследований выявлено, что на сегодняшний день отсутствуют исследования теплового и воздушного режимов ЦОД, в которых устройство поточных панелей и фальш-панелей рассматривается по отдельности при различной степени загрузки и потребляемой электрической мощности стоек. Также не существует рекомендаций по количественному соотношению между «горячими» и «холодными» коридорами, а также между основными

и резервными кондиционерами, которые предназначены для установки внутри ряда в машинном зале ЦОД.

2. В результате экспериментальных исследований сделан вывод о том, что для обеспечения требуемого теплового и воздушного режимов машинного зала ЦОД устройство потолочных панелей над технологическим коридором целесообразно предусматривать только совместно с фальш-панелями в свободном пространстве стоек.

3. Получена экспериментальная зависимость между объемным расходом воздуха и потребляемой электрической мощностью до 6 кВт для серверного оборудования типа шасси с блейд-серверами и стойечного типа.

4. При совместном использовании потолочных панелей над технологическим коридором и фальш-панелей в свободном пространстве стоек получена экспериментальная зависимость между перепадом температур воздуха в стойках и потребляемой электрической мощностью стоек с серверным оборудованием до 6 кВт.

5. На основании результатов численных исследований машинного зала ЦОД с преобладающим количеством «холодных» коридоров установлено, что при потребляемой электрической мощности стоек с серверным оборудованием типа шасси с блейд-серверами до 10 кВт допускается устройство фальш-панелей в стойках без потолочных панелей над технологическим коридором.

6. Получена зависимость среднего значения градиента температуры воздуха по высоте стоек в «холодном» коридоре машинного зала от коэффициента загрузки стоек, потребляемой электрической мощности стоек и количественного соотношения «горячих» и «холодных» коридоров в машинном зале ЦОД.

7. Установлено, что вне зависимости от количественного соотношения коридоров наблюдается рост градиента температуры воздуха по высоте стоек при снижении коэффициента загрузки и увеличении потребляемой электрической мощности стоек с серверным оборудованием. Также установлено, что для всех вариантов с преобладающим количеством «холодных» коридоров не выявлено зон, в которых температура воздуха выше рекомендуемого значения (коэффициент $RCI_{high} = 100 \%$). Для всех вариантов с преобладающим количеством «горячих» коридоров выявлено, что температура воздуха на одной или более стойках выше рекомендуемого значения (коэффициент $RCI_{high} < 100 \%$).

8. В результате численного исследования влияния расположения фальш-панелей в стойке при различных значениях перепада давления между коридорами ($\Delta p = 0 \div 10$ Па) на тепловой и воздушный режимы машинного зала ЦОД выявлено следующее:

– при расположении фальш-панелей в стойке на ряд вертикальных направляющих ближе к «холодному» коридору температура воздуха, входящего в стойку, на $0,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \div 0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже по сравнению с вариантом расположения на ряд вертикальных направляющих ближе к «горячему» коридору;

– значения температуры воздуха, входящего в стойку, при $\Delta p \leq 2$ Па оказались выше рекомендуемого значения (27°C);

– значения температуры воздуха, входящего в стойку, при $\Delta p \geq 6$ Па находятся в пределах рекомендуемого диапазона значений ($18^\circ\text{C} \div 27^\circ\text{C}$).

9. Разработаны рекомендации по проектированию СКВ для ЦОД, в которых:

– даны указания по объемно-планировочным и технологическим решениям, выбору способа охлаждения серверного оборудования и расположению оборудования СКВ в машинных залах ЦОД, а также по расчету холодопроизводительности прецизионных кондиционеров для ЦОД;

– предложена методика расчета производительности прецизионных кондиционеров по воздуху. Выполнена проверка на адекватность разработанной методики расчета в натурных условиях;

– даны рекомендации по применению потолочных панелей в качестве способа организации воздушных потоков в машинных залах ЦОД с преобладающим количеством «холодных» коридоров.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в изучении влияния технологических решений на тепловой и воздушный режимы ЦОД для других способов расположения кондиционеров в машинном зале.

Также перспективным является поиск зависимости объемного расхода от потребляемой электрической мощности для серверного оборудования других типов.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Дмитриев, Ю. А.** Определение теплоступлений от серверного оборудования / Н.С. Пономарев, А.Ю. Мартынова, Ю.А. Дмитриев // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 2 (85). – С. 166–172.

2. **Дмитриев Ю. А.** Анализ влияния различных факторов на температуру воздуха на входе в ИТ-оборудование / Ю.А. Дмитриев // Строительство и техногенная безопасность. – 2022. – № S1. – С. 224–229.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus:

3. **Dmitriev Y.** Analysis of cooling system efficiency / Y. Dmitriev // Architecture and Engineering. Vol. 7. 2022. P. 49–59.

Доклады и материалы конференций:

4. **Дмитриев, Ю. А.** Анализ влияния различных факторов на температуру воздуха на входе в ИТ-оборудование / Ю.А. Дмитриев // Методология безопасности среды жизнедеятельности. Материалы V Международной научно-практической

конференции. Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского. Республика Крым, г. Симферополь, 2022, С. 224–229.

5. **Дмитриев, Ю. А.** Анализ влияния габаритов помещения на эффективность системы охлаждения IT-оборудования в центре обработки данных / Ю.А. Дмитриев, Н.С. Пономарев // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды. Материалы XX Международной научной конференции. Волгоградский государственный медицинский университет. г. Волгоград, 2022, С. 107–113.

6. **Дмитриев, Ю. А.** Численное исследование теплового режима различных типов серверного оборудования / Ю.А. Дмитриев // Инженерные системы и городское хозяйство. Материалы Национальной (всероссийской) научно-практической конференции. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, 2023, С. 203-209.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 25.09.2023. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 131.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.