

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ: 47-DC/CFD

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕРВЕРНОМ ШКАФУ SYSMATRIX DC

Проект: Оптимизация охлаждения высокоплотной стойки (25 кВт)

Дата: 18.03.2026

Исполнитель: Аналитическая группа SYSMATRIX Lab

1. Методология и параметры численного моделирования

Обеспечение достоверности теплового анализа серверного шкафа с высокой плотностью мощности (25 кВт) требует прецизионного подхода к выбору математического аппарата и дискретизации расчетной области. В условиях стесненного объема высоконагруженной стойки малейшие неточности в описании аэродинамического сопротивления или турбулентных пульсаций могут привести к ложному прогнозу температурных полей, что недопустимо при верификации критической инфраструктуры.

Геометрическая декомпозиция Процесс подготовки Fluid Domain включал этап глубокого упрощения САД-модели (defeaturing). Из расчета были исключены незначительные конструктивные детали, находящиеся за пределами характерного масштаба течения (крепезж, кабельные вводы), что позволило минимизировать паразитную сеточную сложность. Активное оборудование (20U серверных блоков и 3U ИБП) представлено макромоделями типа «черный ящик» с заданными характеристиками тепловыделения и протока. Батарейный шкаф был исключен из аэродинамической области ввиду отсутствия сквозного протока воздуха. Перфорация дверей смоделирована через инструмент пористой среды (Porous Media) с определением коэффициентов инерционного и вязкого сопротивления.

Конфигурация расчетной сетки Вычислительная сетка для конструкции DC была оптимизирована для минимизации численной диффузии в основном направлении потока:

Параметр	Значение
Тип элементов	Hex-dominant (преимущественно гексаэдральные)
Общее количество элементов	1,6 млн
Количество узлов	605 тыс.
Алгоритм построения	Physics-based meshing
Управление пограничным слоем	Контроль y^+ для обеспечения корректности SST wall functions

Физико-математическая модель Для решения задачи сопряженного теплообмена использована стационарная постановка (Steady-state). В качестве модели турбулентности выбран метод **k-omega SST**, который является индустриальным стандартом благодаря высокой точности разрешения пристенных течений и корректному прогнозированию отрывов потока. Моделирование вентиляторов выполнено через «Fan Model» на базе нелинейных P-Q характеристик. Струя из блока ИБП (до 7 м/с) обусловлена специфической крутизной кривой давления вентиляторов ИБП, обеспечивающей более высокий напор по сравнению с серверными узлами.

Верификация сходимости Численное решение признано сошедшимся и устойчивым после 1000 итераций. Мониторинг невязок (Residuals) зафиксировал следующие уровни:

- Импульс (U_x, U_y, U_z) и турбулентность (k, ω): **1e-3 — 1e-4**;
- Энергия (Температура T): **1e-5**.

Отсутствие осцилляций на графиках подтверждает готовность модели к сценарному анализу.

2. Сценарии проведения испытаний и граничные условия

Стресс-тестирование системы охлаждения проводилось для оценки запаса живучести при отклонении внешних параметров от номинала и частичной деградации активных систем.

Матрица сценариев

Сценарий	Т входа (T_{in})	Внешний подпор (dP)	Мощность вентиляторов
DC_CFD_1 (Базовый)	20 °C	20 Па	100%
DC_CFD_2 (Аварийный)	22 °C	15 Па	80%

Обоснование нагрузок Суммарная нагрузка 25 кВт распределена в пропорции: 20 кВт на вычислительный блок и 5 кВт на систему бесперебойного питания, что соответствует максимальному заполнению согласно исходным данным.

3. Анализ результатов: Тепловые поля и градиенты

Стабильность температурного градиента является определяющим фактором долговечности микропроцессорных компонентов. Анализ полей подтвердил отсутствие критических hot spots во всем объеме шкафа DC.

Температурные показатели

- **Сценарий DC_CFD_1:** Максимальная температура (T_{max}) зафиксирована на уровне **34,35 °C**, при этом 95% объема воздуха на выходе (P95) имеет температуру **33 °C**.
- **Сценарий DC_CFD_2:** При росте входной температуры и снижении расхода T_{max} составила **38,34 °C**, а P95 — **37,75 °C**.

Эффективность охлаждения Детальный анализ выявил наличие **локальной вихревой зоны** в тыловой части шкафа над верхним сервером со стороны горячего коридора. Однако глубокая проверка подтвердила, что данный вихрь не приводит к байпасированию нагретого воздуха на вход: физическое разделение сред остается эффективным. Даже в аварийном режиме градиент температур сохраняет линейность, обеспечивая надежный теплосъем.

4. Аэродинамические показатели и распределение давления

Динамика потоков в шкафу DC характеризуется четкой направленностью и отсутствием паразитных утечек.

Скоростные характеристики (Velocity)

- **Сценарий 1:** Средняя скорость в серверной зоне составляет **2,3–2,5 м/с**.

- **Сценарий 2:** Зафиксировано снижение скорости до **1,8 м/с**. Скорость струи ИБП в аварийном режиме стабилизировалась на отметке **6,75 м/с**.

Анализ зон рециркуляции Благодаря использованию фальшпанелей (blanking panels) и герметичности конструктива DC, коэффициент рециркуляции в обоих сценариях составил **0%**. Все турбулентные образования локализованы в горячем коридоре и не влияют на забор холодного воздуха.

Поля статического давления Снижение внешнего подпора с 20 Па до 15 Па является критическим порогом. Анализ показал, что при 15 Па вентиляторы оборудования вынуждены преодолевать сопротивление дверей и внутренних узлов практически самостоятельно. Однако расчет подтвердил отсутствие **эффекта обратной тяги (reverse draft)**: собственного напора кулеров даже при 80% мощности достаточно для поддержания однонаправленного потока.

5. Оценка рисков и инженерные рекомендации

Результаты моделирования позволяют перейти от численных данных к регламентам эксплуатации.

Реестр рисков для конструкции DC

Риск	Вероятность	Влияние	Меры по минимизации
Отказ части вентиляторов	Средняя	Среднее	Интеграция в BMS алгоритма мониторинга падения оборотов (RPM drop) .
Просадка давления в коридоре	Низкая	Низкая	Мониторинг работы прецизионных кондиционеров.

При выходе из строя одного вентилятора в блоке 20U локальный показатель Tmax может совершить скачок, даже если общий P95 останется в норме, что требует оперативного реагирования BMS.

Оптимизация настроек Рекомендуемый диапазон давления в холодном коридоре: **15–20 Па**. Снижение ниже 15 Па недопустимо, так как это лишает систему запаса отказоустойчивости. Повышение свыше 20 Па признано экономически нецелесообразным, так как штатные вентиляторы серверов обладают достаточным избыточным напором для работы в шкафу DC.

6. Итоговое заключение

Проведенное CFD-моделирование верифицировало высокую эксплуатационную надежность шкафа DC при нагрузке 25 кВт.

Сводный статус:

1. **Сценарий DC_CFD_1 (20 °C, 20 Па):** PASS (Низкий риск).
2. **Сценарий DC_CFD_2 (22 °C, 15 Па, -20% Fan):** PASS (Средний риск).

Вердикт: Конструкция шкафа DC успешно разрешает задачу разделения потоков и обеспечения целевого расхода воздуха. Перегревы оборудования исключены во всех расчетных режимах. Объект **рекомендован к штатной эксплуатации.**