

УДК 536.7

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-36-43

## Обеспечение охлаждения в дата-центре сверхвысокой загрузки

А.А. Арбатский, В.С. Глазов

В настоящее время активно разрабатываются различные решения по строительству майнинг-центров (вычислительных центров для добычи крипто-валют), состоящих из вычислительных комплексов на базе видеокарт, либо специальных процессорных модулей. Основной проблемой данных центров является обеспечение эффективного охлаждения вычислительных модулей при максимальной возможной плотности расположения в ограниченном пространстве. Данное требование связано с минимизацией затрат на инфраструктуру при добыче крипто-валют.

Задача эффективного охлаждения актуальна, поскольку при добыче крипто-валют, вычислительные модули работают на предельных режимах и перегреваются значительно сильнее, чем при работе в обычных вычислительных центрах.

Представлена концепция размещения высокопроизводительных вычислительных комплексов для работы с криптовалютами в условиях ограниченного пространства. Описан алгоритм, обеспечивающий устойчивое охлаждение вычислительных комплексов с помощью вентиляторов без привлечения холодильного оборудования с парокомпрессионным циклом. Приведена, разработанная в системе Phoenics, тепловая математическая модель вычислительного комплекса для добычи криптовалюты. Предложен оценочный критерий плотности размещения видеокарт для добычи криптовалюты.

*Ключевые слова:* CFD-моделирование, дата-центр, охлаждение, вентиляция, кондиционирование, криптовалюта.

*Для цитирования:* Арбатский А.А., Глазов В.С. Обеспечение охлаждения в дата-центре сверхвысокой загрузки // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 36—43. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-36-43.

## Providing Adequate Cooling at an Extremely Loaded Data Center

A.A. Arbatsky, V.S. Glazov

Many different structures for mining-centers (computing centers for mining of crypto-currency) is now developing. This computing centers create on the video cards, or special modules on processor. Main problem is efficiency of cooling for computing modules with maximum density in small building volume. This requirement need for cost minimizing for building.

Problem of efficiency cooling for this centers is relevant, because the computing modules work on higher power mode and have most heat emission, than normal computing centers.

The article presents a concept of arranging high-performance computation systems intended for dealing with crypto currencies under the conditions of being placed in a limited space. An algorithm ensuring stable cooling of computation systems solely by means of fans without the need of using vapor-compression cycle based chilling equipment is described. The thermal mathematical model of a computation system for producing crypto currency developed in the Phoenics software package environment is presented. A criterion for estimating the density of placing video cards for producing crypto currency is suggested.

*Key words:* CFD-modeling, data center, cooling, ventilation, air conditioning, crypto currency.

*For citation:* Arbatsky A.A., Glazov V.S. Providing Adequate Cooling at an Extremely Loaded Data Center. MPEI Vestnik. 2018;4:36—43. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-36-43.

## Введение

На сегодняшний день существует множество решений по охлаждению вычислительных модулей, размещенных в ограниченном пространстве [1 — 3]. В [1, 2] рассматриваются системы охлаждения на базе холодильных машин с парокомпрессионным циклом. В [1] это связано с тем, что на тот момент были очень высокие требования к поддержанию перепада температур для вычислительных машин, а в [2] предлагается применение холодильных машин с различной точностью поддержания температур. И ни в одном из указанных источников не затронуто понятие плотности расположения вычислительных машин и не установлена связь между подаваемым расходом воздуха и данной величиной при различных параметрах. Предложены исключительно локальные и типовые инженерные решения для конкретных вычислительных центров. Данный подход хорошо работает для обычных вычислительных машин, где плотность теплового потока редко превышает 500 Вт/юнит (юнит — стандартная геометрическая единица размещения элементов электронно-вычислительного оборудования, равная 44,45 мм или 1,75"), в то время как для майнинг-центров она может быть в 4 — 5 раз больше, а, соответственно, требуется систематический подход с целью выработки ряда стандартных инженерных решений для вычислительных центров по добыче криптовалют.

Предложено, помимо решения новой на данный момент инженерной задачи по охлаждению помещения майнинг-центра, создание стабильного инженерного решения, которое можно будет экстраполировать на помещения схожей компоновки, но иного размера.

## Постановка задачи

В помещении с параметрами, указанными на рис. 1, необходимо расположить максимальное количество серверных станций, при работе которых температура окружающего воздуха будет не более 50 °С.

Инструмент исследования — математическая модель серверной станции, разработанная в системе CFD-моделирования Phoenics.

Предельные параметры наружного воздуха: температура  $t_{нар} = 30$  °С; влажность  $\varphi_{нар} = 50...55$  %. Помещение

длиной 25 м, шириной 6 м, высотой 3,8 м находится в торце здания, на потолке имеются ригели высотой 200 мм (рис. 1).

На рис. 1 представлена разделительная перегородка по оси 2 для поэтапного ввода площадей в эксплуатацию, поэтому предусмотрен отдельный вход для каждого помещения;

Вычислительный модуль состоит из 6 видеокарт и 2 блоков питания (рис. 2). Размеры серверной станции (д×ш×в) — 650×350×300 мм; параметры электропитания одной видеокарты — 12 В, 200 Вт; примерные габариты видеокарты (д×ш×в) — 200×150×50 мм.

## Построение тепловой модели вычислительного модуля

Поскольку точные теплоступления от одной серверной станции заранее неизвестны, был проведен термографический анализ, при этом учитывались энергопотребление, состав компонентов серверной станции и характеристика каждого компонента, связанного с движением воздуха, либо тепловым выделением.

Термографический анализ выполнен тепловизором Testo 875-1i со следующими техническими характеристиками:

- температурная чувствительность 50 мК;
- погрешность  $\pm 2$  °С;
- диапазон измерений  $-30...+100$  °С;
- характеристики отражения задаются вручную.

Полученные термографические изображения серверной станции представлены на рис. 3 и получены при температуре окружающей среды (отраженной температуре)  $t_{опр} = 39...40$  °С, потоке освещенности 25 Вт/м<sup>2</sup> (люминисцентные лампы), степени черноты поверхности  $\epsilon = 0,8...0,9$  и температуре на чипе 62 °С.

Анализ термограмм рис. 3 показал, что максимальная температура на плате достигает 90 °С (рис. 3, б). Кроме того, основные тепловые выделения наблюдаются на задней правой, верхней и нижней частях видеокарт. Это объясняется тем, что выход охлаждающего воздуха, нагнетаемого вентиляторами (кулерами) видеокарт, осуществляется из нижней и верхней частей каждой видеокарты (рис. 4), поэтому в модели поверхность задней стенки рассматривается как теплоотдающая в соответствии с принимаемыми граничными условиями, а выход и вход нагреваемого воздуха — как

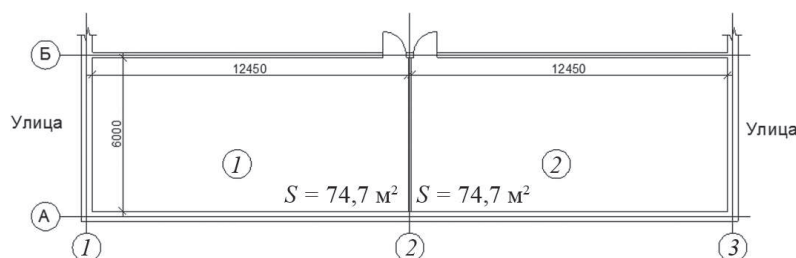


Рис. 1. План помещения



Рис. 2. Общий вид вычислительного модуля

outlet (источник воздуха с постоянной температурой) и inlet (забор воздуха вентиляторами).

Расход воздуха, перегоняемого вентиляторами видеокарт (для любой модели видеокарт), принимается, исходя из данных по энергопотреблению и сравнению с близкими моделями охлаждающих вентиляторов для элементов вычислительной техники (напряжение 12 В; ток 0,8 А; мощность: 9,6 Вт).

На основании анализа моделей кулеров со схожим энергопотреблением (табл. 1) расход воздуха через одну видеокарту  $L_{BK} = 300 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при этом предполагается, что на каждой видеокарте установлено два кулера.

Заметим, что табличные данные расходов воздуха удовлетворительно сочетаются с классической формулой

$$Q = LP/\eta,$$

где  $L$  — расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $P$  — избыточное давление, Па;  $\eta$  — КПД вентилятора (составляет 0,8).

Тепловые выделения блоков питания незначительны (1...2 % от величины энергопотребления) (рис. 3, а, з), поэтому при построении тепловой модели серверной станции блоки питания считаются адиабатными. Что касается граничных условий теплообмена для CFD-модели, то можно воспользоваться граничными условиями 1-го рода на том основании, что известно температурное поле поверхности, а также примерное значение температуры воздуха, исходящего от видеокарты. Для реализации данного предложения проведен последовательный пересчет параметров температуры поверхности на условия модели.

Суть данной операции состояла в том, чтобы по результатам тепловизионной съемки серверной станции определить следующие базовые параметры теплообмена по методике [5] в условиях естественной конвекции

$$Gr = 9,98\beta(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр}}) \frac{d^3}{\nu^2},$$

где  $Gr$  — критерий Грасгофа;  $\beta$  — коэффициент температурного расширения;  $t_{\text{пов}}$  — средняя температура поверхности,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\nu$  — кинематическая вязкость (для воздуха при средней температуре),  $\text{м}^2/\text{с}$ .

$$Nu = 0,75(GrPr)^{0,25},$$

здесь  $Nu$  — критерий Нуссельта;  $Pr$  — критерий Прандтля (для воздуха при средней температуре).

$$\alpha = \lambda \frac{Nu}{d},$$

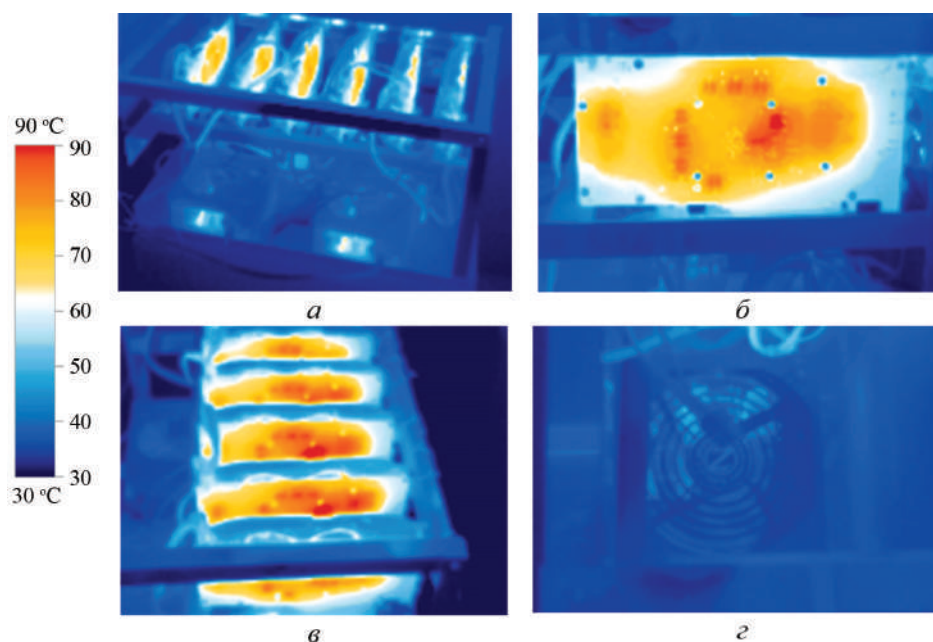


Рис. 3. Термографические изображения серверной станции:

а — общий вид; б — вид задней стенки платы видеокарты; в — вид сверху на систему плат; г — вид на блок питания

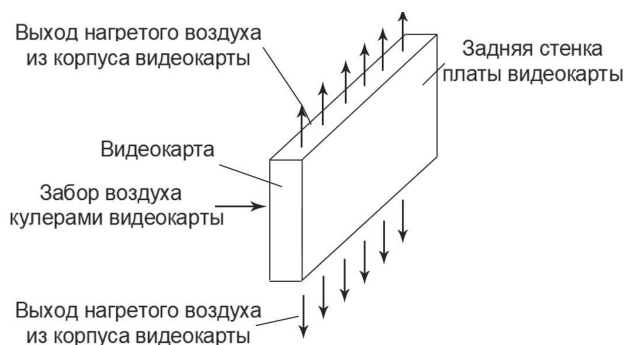


Рис. 4. Условное изображение потоков воздуха через видеокарты

где  $\alpha$  — искомый коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воздуха при средней температуре, Вт/м·К.

Принимая удельный тепловой поток от поверхности платы видеокарты  $q$  постоянным, можно пересчитать его для любых условий теплоотдачи

$$q = \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр}}).$$

На рис. 5 приведены профили температур по срезам задней стенки платы видеокарты. С помощью них установлены значения для удельного теплового

потока и коэффициента теплоотдачи  $q = 550$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha = 15,8$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

Заметим, что на базе полученных данных можно построить модели как с граничными условиями 1-го, так и 3-го рода.

### Размещение стоек серверов

На рис. 6 дана схема расстановки стоек серверных станций (ферм) с максимальной плотностью их размещения в помещении. Расстановка серверов выполнена с учетом их теплотехнических характеристик. Для обеспечения охлаждения предусмотрены осевые вентиляторы, расположенные в наружных стенах и обеспечивающие равномерный продув коридоров, образующих свободное пространство вокруг серверных станций.

Подобное размещение предполагает максимальное использование полезного пространства путем установки стоек в 3 ряда, при этом мощность вентиляторов позволяет обеспечить разбавление теплых потоков, идущих от видеокарт, до конца коридора. Свободное пространство в верхней части помещения служит для релаксации горячего воздуха.

В серверах видеокарты располагаются вертикально, обеспечивая свободный выход воздуха в коридоры (рис. 6, б), расстояние между видеокартами 60...80 мм.

Таблица 1

Данные по расходам воздуха различных моделей охлаждающих вентиляторов (кулеров) для элементов вычислительной техники [5]

Модель	Напряжение, В	Мощность, Вт	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч
Enermax T.B. Vegas Trio UCTVT12P	12	8,40	114
Noiseblocker Multiframe S-Series M12	12	5,50	100
Scythe Slip Stream SY1225SSL12SH	12	6,36	180

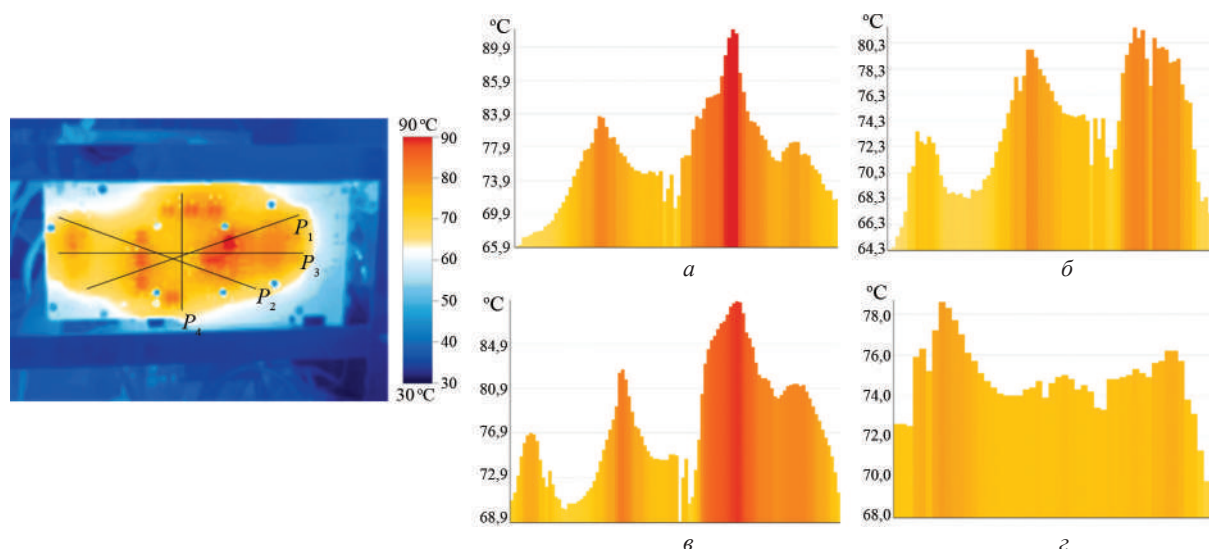


Рис. 5. Профили температур по срезам:

$a$  —  $P_1$ , минимум 66,0 °С, максимум 92,0 °С, среднее значение 76,6 °С;  $b$  —  $P_2$ , минимум 64,4 °С, максимум 81,5 °С, среднее значение 73,6 °С;  $в$  —  $P_3$ , минимум 69,0 °С, максимум 88,7 °С, среднее значение 77,6 °С;  $г$  —  $P_4$ , минимум 68,1 °С, максимум 78,6 °С, среднее значение 74,7 °С



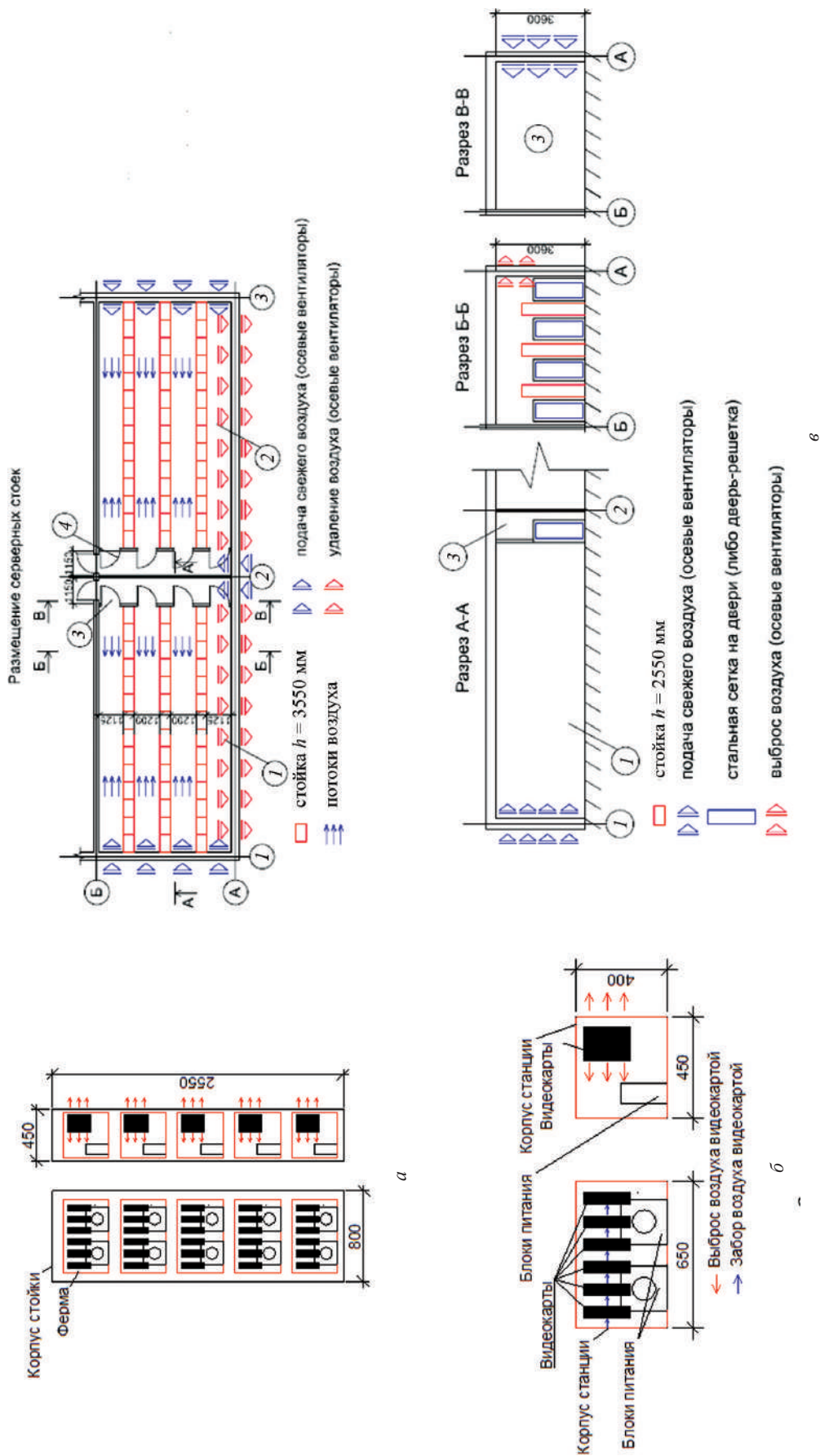


Рис. 6. Размещение серверных стоек: 1, 2 — стоек в помещении; 3, 4 — помещения размещения стоек  $S = 67,2$  м<sup>2</sup>; 3, 4 — сервисные коридоры  $S = 6,9$  м<sup>2</sup>

## Расчет системы охлаждения

В состав системы охлаждения входят приточные (38 шт. расположены по осям 1 и 3, не менее трех по всей высоте стойки) и вытяжные (32 шт., не менее двух по высоте) осевые вентиляторы, а также переточные решетки в дверях (рис. 6).

Перед расчетом необходимой мощности вентиляторов и размера переточных решеток проведено CFD-моделирование одного расчетного кластера, состоящего из серверной станции и двух коридоров для кругового обдува. Важно, чтобы перепад температур по длине обдува серверной станции не превышал 4,1 °С.

Данная величина получена из следующих соображений. Поскольку количество стоек, размещенных в один ряд, равно 14 и продувка осуществляется с двух сторон, то поступающий воздух омывает 7...9 стоек с каждой стороны. Температура воздуха на входе 30 °С, а на выходе — 40 °С, т.е. допустимый температурный перепад составляет 10 °С. При релаксации воздуха по высоте (2 °С на 1 м [6]), суммарный дополнительный перепад температуры составит 3 °С, таким образом,  $10/9 + 3 = 4,1$  °С.

При построении CFD-модели использованы граничные условия 1-го рода и данные, полученные при исследовании тепловой модели серверной станции. Расчет выполнен по алгоритму [7].

Сначала вычисляется критерий Рейнольдса для первого контрольного объема (вблизи поверхности, омываемой воздухом):

$$Re_1 = U_1 y_1 / \nu, \quad (1)$$

где  $U_1$  — скорость течения в первом контрольном объеме (из результатов моделирования), м/с;  $y_1$  — координата  $y$  в первом контрольном объеме, м;  $\nu$  — кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Затем методом последовательных приближений получается значение пристенной функции SKIN

$$SKIN = \left( \frac{0,41}{\ln(9 Re_1 \sqrt{SKIN})} \right)^2. \quad (2)$$

Полученное значение SKIN используется для определения критерия Стантона для пристенной области по формуле

$$STAN = \frac{SKIN}{Pr_T (1 + P \sqrt{SKIN})}, \quad (3)$$

где  $P = 9 \left( \frac{Pr}{Pr_T} - 1 \right) \left( \frac{Pr}{Pr_T} \right)^{1/4}$  — функция для расчета

STAN;  $Pr_T$  — турбулентное число Прандтля.

Среднемассовая температура расчетного участка равна

$$t_{cp,m} = \frac{\sum_0^i U_i T_i}{\sum_0^i U_i}. \quad (4)$$

Безразмерный коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле

$$Nu = STAN \frac{T_w - T_1}{T_w - T_{cp,m}} \frac{U_1}{U_{cp}} Re Pr, \quad (5)$$

где  $T_w$  — среднее значение температуры стенки расчетного участка, К;  $T_1$  — температура первого контрольного объема, К;  $U_{cp}$  — средняя по сечению скорость, м/с;  $Re$  — критерий Рейнольдса для первого контрольного объема,  $Re = (U_{cp} D_T) / \nu$ ;  $D_T$  — гидравлический диаметр.

Искомый коэффициент теплоотдачи выглядит следующим образом

$$\alpha = Nu \lambda / D_T, \quad (6)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности теплоносителя Вт/(м·К).

В качестве первого приближения используются данные тепловой модели серверной станции (табл. 2).

На рис. 7 приведен общий вид модели, а также температурные поля в первом и заключительном приближениях.

Расход воздуха обтекающего серверную станцию в первом приближении определяется из формулировки первого закона термодинамики

$$G = Q / (c_p \Delta t), \quad (7)$$

где  $Q$  — суммарное тепловыделение серверной станции, Вт;  $c_p$  — удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);  $\Delta t$  — требуемый перепад температур между входом и выходом воздуха (4,1 °С).

Таким образом, для одной серверной станции  $G = 2300$  м<sup>3</sup>/ч:

Для модели, представленной на рис. 7, в, средняя температура по последнему сечению составила 36,9 °С, следовательно, общий перепад температур превысил расчетный в 1,7 раза. Поэтому, перед тем как строить модель во втором приближении, необходимо пересчитать температуру поверхности платы видеокарты по уравнениям (6) — (12) (табл. 3).

Таблица 2

### Тепловые характеристики элементов модели для задания граничных условий 1-го рода в первом приближении

Элемент	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Тепловыделение, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности в первом приближении, °С
Плата видеокарты	15,8	550	75

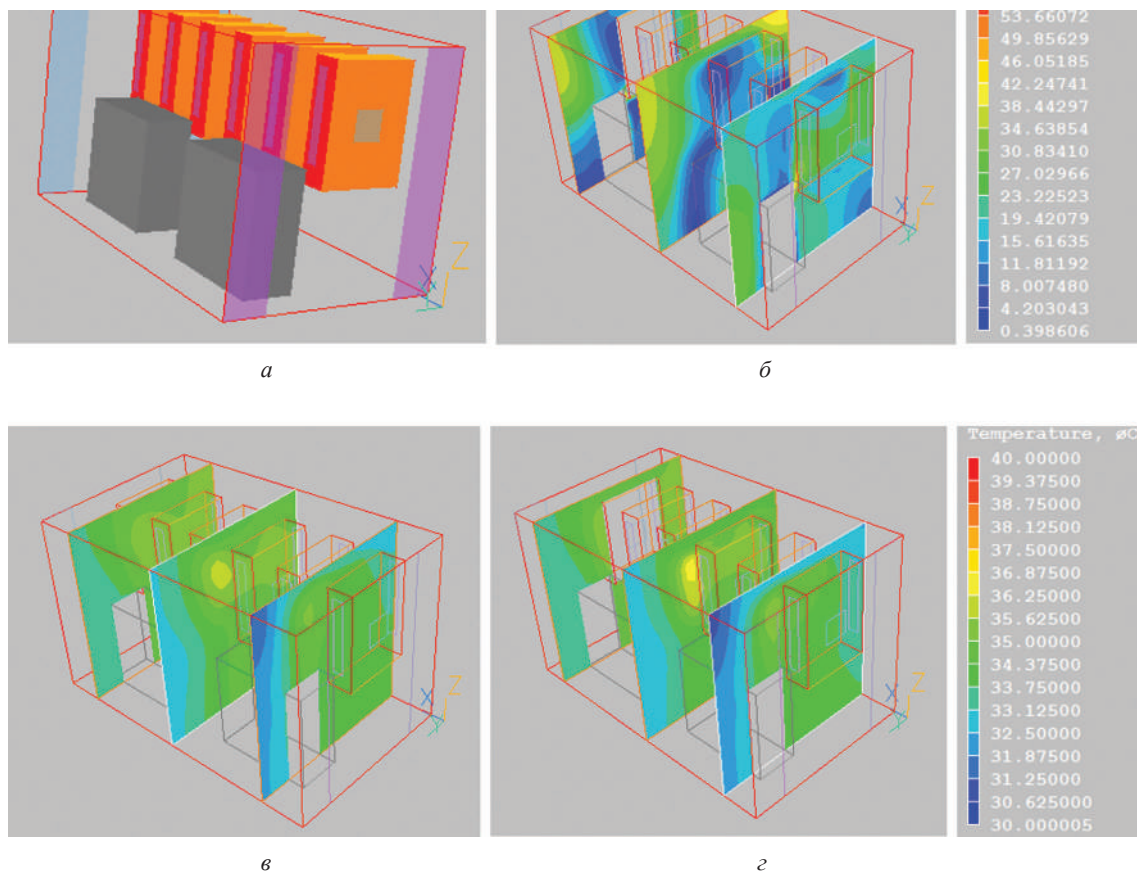


Рис. 7. Расчетная модель серверной станции:

*a* — общий вид модели; *b* — распределение скоростей в заключительном приближении; *в, г* — температурные поля в первом и заключительном приближениях

Таблица 3

#### Тепловые характеристики элементов модели, для задания граничных условий 1-го рода во втором приближении

Элемент	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Тепловыделение, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности в заключительном приближении, °С
Плата видеокарты	35	550	56

Таким образом, по результатам многократного моделирования и с учетом уменьшения температуры на плате за счет появления активной продувки оставляем расход прежним.

Анализ поля скоростей показал отсутствие застойных зон с нулевыми скоростями воздуха или близкими к ним значениями. Согласно рис. 7, *б* минимальное значение скорости воздуха 2,1 м/с, что позволяет получить следующие параметры расхода воздуха:

- для одной фермы — 2300 м<sup>3</sup>/ч;
- на один приточный вентилятор по оси 1 — 20 000 м<sup>3</sup>/ч;
- на один приточный вентилятор по оси 2 — 30 000 м<sup>3</sup>/ч;
- на один вытяжной вентилятор — 30 000 м<sup>3</sup>/ч.

#### Заключение

Предложена концепция размещения максимального количества ферм в заданном объеме. В рассмотренном

варианте общее количество размещенных ферм составило 420 шт. в двух помещениях (по 210 шт. в каждом). С учетом организации сервисных пространств плотность размещения видеокарт — 17 шт./м<sup>2</sup>. Данная величина получена впервые и является оценочной для этого вида серверных станций. Она может быть подвергнута дальнейшему уточнению по результатам детального исследования локальных особенностей теплообмена в майнинг-центрах.

Для представленного типа размещения создана регулируемая система охлаждения, состоящая из множества элементов (табл. 4) и позволяющая получить устойчивые значения расходов и скоростей воздуха для охлаждения вычислительных модулей на видеокартах. Регулировка системы охлаждения осуществляется по показаниям датчиков температуры воздуха и специальному ПИД-алгоритму, заложенному в контроллер.

Таблица 4

## Состав системы охлаждения серверной (на две очереди)

Элемент	Количество, шт.
Вентилятор осевой (приток по оси 1)	32
Вентилятор осевой (приток по оси 2)	6
Вентилятор осевой (вытяжка)	32
Датчик наружной температуры	2
Датчик внутренней температуры	16
Свободно-программируемый контроллер с релейными модулями управления вентиляторами	2

Размещение датчиков температуры определяется конструкторской документацией на систему охлаждения.

Наличие регулируемой системы охлаждения позволяет в период резкого похолодания выполнять работу только вытяжными осевыми вентиляторами, которые создают разрежение в сервисном коридоре и, тем самым, обеспечивают плавное подтягивание холодного воздуха. В этом случае при отрицательных наружных температурах не будет локального переохлаждения воздухом на входе серверных помещений.

Рекомендуется (по мере заполнения стоек серверов) установку вентиляторов вести по симметричной схеме.

## Литература

1. СН 512—78. Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин.
2. **Занегин И.Н.** Охлаждение ЦОД. М.: Риттал Академия, 2009.
3. **Барсков А.** От PUE к WUE // Журнал сетевых решений/LAN. 2014. № 1. [Официальный сайт] <https://www.osp.ru/lan/2014/01/13039318> (дата обращения 10.09.2017).
4. **Основы** корпусного охлаждения: вентиляторы [Электронный ресурс] [http://www.thg.ru/desktop/vybor\\_komponentov\\_dlya\\_kompyutera\\_2/print.html](http://www.thg.ru/desktop/vybor_komponentov_dlya_kompyutera_2/print.html) (дата обращения 01.09.2017).
5. **Исаченко В.П. и др.** Теплопередача. М.: Энергия, 1975.
6. **Баркалов Б.В. и др.** Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. М.: Стройиздат, 1992.
7. **Сергиевский Э.Д., Хомченко Н.В., Овчинников Е.В.** Расчет локальных параметров течения и теплообмена в каналах. М.: Изд-во МЭИ, 2001.

## References

1. SN 512—78. Instruksiya po Proektirovaniyu Zdaniy i Pomeshcheniy dlya Elektronno-vychislitel'nyh Mashin. (in Russian).
2. **Zanegin I.N.** Ohlazhdenie TSOD. M.: Rittal Akademiya, 2009. (in Russian).
3. **Barskov A.** Ot PUE k WUE. Zhurnal setevykh resheniy/LAN. 2014;1. [Ofits. Sayt] <https://www.osp.ru/lan/2014/01/13039318> (Data Obrashcheniya 10.09.2017). (in Russian).
4. **Osnovy** Korpusnogo Ohlazhdeniya: Ventilyatory [Elektron. Resurs] [http://www.thg.ru/desktop/vybor\\_komponentov\\_dlya\\_kompyutera\\_2/print.html](http://www.thg.ru/desktop/vybor_komponentov_dlya_kompyutera_2/print.html) (data Obrashcheniya 01.09.2017). (in Russian).
5. **Isachenko V.P. i dr.** Teploperedacha. M.: Energiya, 1975. (in Russian).
6. **Barkalov B.V. i dr.** Vnutrennie Sanitarno-tekhnicheskie Ustroystva. Ch. 3. Ventilyatsiya i Konditsionirovanie Vozduha. M.: Stroizdat, 1992. (in Russian).
7. **Sergievskiy E.D., Homchenko N.V., Ovchinnikov E.V.** Raschet Lokal'nyh Parametrov Tcheniya i Teploobmena v Kanalakh. M.: Izd-vo MPEI, 2001. (in Russian).

## Сведения об авторах

**Арбатский Андрей Андреевич** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теплообменных процессов и установок НИУ «МЭИ», e-mail: [arbatsky1985@mail.ru](mailto:arbatsky1985@mail.ru)

**Глазов Василий Степанович** — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры теплообменных процессов и установок НИУ «МЭИ», e-mail: [mamurik@bk.ru](mailto:mamurik@bk.ru)

## Information about authors

**Arbatsky Andrey A.** — Ph.D. (Techn.), Senior Lecturer of Heat-and-Mass Exchange Processes and Installations Dept., NRU MPEI, e-mail: [arbatsky1985@mail.ru](mailto:arbatsky1985@mail.ru)

**Glazov Vasily S.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor, Leading Researcher of Heat-and-Mass Exchange Processes and Installations Dept., NRU MPEI, e-mail: [mamurik@bk.ru](mailto:mamurik@bk.ru)

Статья поступила в редакцию 22.09.2017