

УДК 519.6

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СЕРВЕРНОГО ШКАФА С НАСАДКОЙ, РАВНОРАСПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ВХОДНОЙ ОХЛАЖДАЮЩИЙ ПОТОК

Э. Г. Байков, Ю. Н. Дерюгин, С. А. Лёвкин, С. М. Устинов, А. А. Холостов  
(РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Описываются конструктивные особенности и схема охлаждения для новой конструкции серверного шкафа с наклонной насадкой призматической формы, благодаря которой обеспечиваются равномерное распределение входного охлаждающего потока воздуха по всей высоте шкафа и высокая плотность размещения оборудования. Это решение является одной из перспективных разработок в проектах РФЯЦ-ВНИИЭФ по созданию высокопроизводительных вычислительных комплексов.

Рассматривается методика, положенная в основу проведения численного моделирования серверного шкафа с наклонной насадкой при решении задачи теплопереноса в твердотельных конструкциях с учетом конвективного теплообмена, которая реализована в пакете программ ЛОГОС. Представлены результаты численного моделирования и их сравнение с экспериментальными измерениями.

*Ключевые слова:* теплопроводность, моделирование, неявный метод, метод SIMPLE, энерговыделение, вычислительный сервер, конструктив, суперкомпьютер.

### Введение

Быстрорастущие потребности в использовании суперкомпьютерных вычислительных комплексов требуют от разработчиков увеличения плотности размещения оборудования в серверных шкафах, что соответствующим образом приводит к росту тепловой нагрузки. Следовательно, проблема охлаждения устройств становится все более важной при разработке суперкомпьютеров.

Для решения этой проблемы предлагается применить конструкцию серверного шкафа, дополненную наклонной насадкой, способную обеспечить эффективное охлаждение оборудования с помощью охлажденного воздуха и более плотное размещение его компонентов.

В работе описывается методика расчета конвективного теплообмена и распространение тепла в твердотельной конструкции, в частности новой конструкции шкафа с наклонной насадкой, которая реализована в многофункциональном пакете программ ЛОГОС.

### Конструкция серверного шкафа с наклонной насадкой

Конструкция шкафа проектировалась с учетом централизованного воздушного охлаждения, которое применяется в машинном зале. Каркас шкафа изготавливается из стального профиля и имеет сварную конструкцию, благодаря чему обладает высокой механической прочностью и жесткостью.

Внешний вид шкафа изображен на рис. 1'. Это типовой серверный шкаф под оборудование 19" (483 мм), но дополненный наклонной насадкой. Высота шкафа — 2 м, что составляет 42 U\*.

Наклонная насадка призматической формы выполняет роль канала для подачи холодного воздуха. Передняя стенка шкафа (насадки) выполнена в виде двухстворчатой двери, а задняя имеет перфорацию, обеспечивая беспрепятственный отвод тепла от электронного оборудования за пределы шкафа.

Угол наклона передней плоскости насадки подобран таким образом, чтобы обеспечить равно-

\* Юнит (U) — единица измерения количества монтажных мест для оборудования в шкафу, 1 U = 44,45 мм.

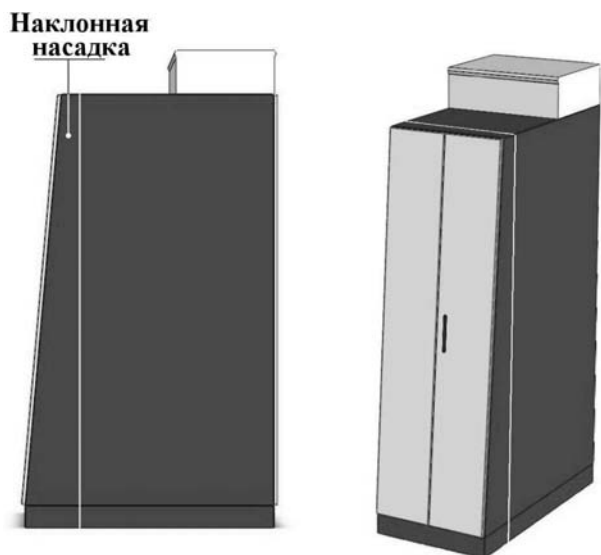


Рис. 1. Серверный шкаф с наклонной насадкой

мерное статическое давление воздуха по высоте насадки [1].

Применение наклонной насадки обеспечивает равномерное распределение холодного потока воздуха по всей высоте шкафа, что позволяет максимально использовать внутреннее пространство шкафа и более плотно устанавливать оборудование. Кроме того, применение насадки способствует более эффективному использованию охлаждающей среды (воздуха), что приводит к сокращению затрат при эксплуатации.

Насадку можно отсоединять от шкафа — это позволяет использовать его как открытую стойку при других схемах воздушного охлаждения.

### Схема охлаждения вычислительного комплекса с новой конструкцией серверных шкафов

Правильный выбор схемы охлаждения, позволяющий обеспечить климатические требования эксплуатации, является гарантией надежной работы вычислительного комплекса. Охлаждение устройств осуществляется с помощью охлажденного воздуха, при этом используется принцип сквозного целенаправленного продува. Встроенные вентиляторы сервера засасывают холодный воздух через переднюю стенку, затем, прогоняя его через компоненты, нуждающиеся в охлаждении, выводят наружу через заднюю стенку. Исходя из этого принципа для охлаждения вычислительного комплекса используется система с *изолированным холодным коридором*. В этой системе приняты специальные меры для того, чтобы холодный воздух подавался непосредственно к серверам, в изолированный передний канал шкафа — его роль выполняет наклонная насадка. Таким образом, потоки холодного воздуха не смешиваются с потоками нагретого, отводимого с задней стороны шкафа в пространство машинного зала. Это позволяет добиться эффективно использования системы охлаждения.

По предложенной схеме спроектирован и успешно работает ряд вычислительных комплексов. На рис. 2 представлена схема охлаждения мультипроцессорного комплекса.

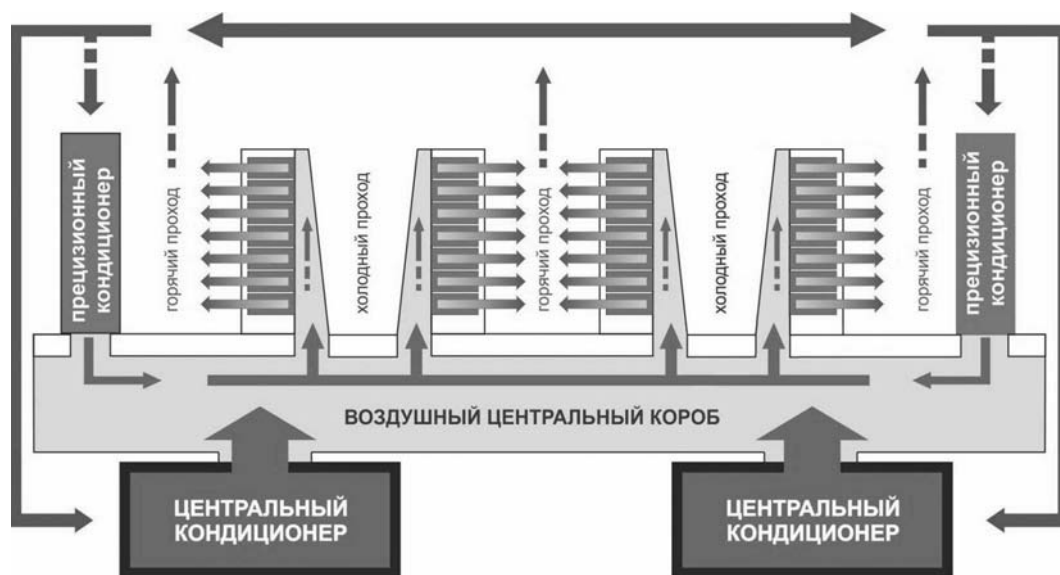


Рис. 2. Схема охлаждения ВЦ

## Математическая модель

Математическая модель, используемая для описания конвективного теплообмена, включает уравнения движения несжимаемого вязкого газа в приближении Буссинеска, уравнения  $k\varepsilon$ -модели турбулентности и уравнения теплопроводности в твердом теле с учетом заданных источников энерговыделения. Сопряженный теплообмен между твердотельной конструкцией и газовым (воздушным) потоком рассматривается в нестационарной постановке. Начальное распределение параметров воздушного потока определяется из решения стационарной задачи без учета теплообмена с твердотельной конструкцией. В граничные условия для воздушного потока на входе в тракт включаются расход воздуха и углы входа потока. Выходная граница считается *свободной*, на ней нормальные производные величин полагаются равными нулю.

Дискретизация дифференциальных уравнений осуществляется на основе метода расщепления по физическим процессам, метода конечного объема и использования неструктурированных сеток. Система исходных уравнений записывается в дивергентной форме в декартовой системе координат относительно компонент вектора скорости и температуры. Решение на новом временном слое расщепляется на решение уравнений Навье—Стокса и решение уравнения теплопереноса в твердотельной конструкции.

Методика расчета конвективного течения несжимаемого вязкого газа основана на алгоритме SIMPLE [2]. В этом алгоритме согласованное распределение компонент вектора скорости и поля давления, удовлетворяющих уравнению неразрывности, находится методом итераций. Каждая итерация состоит из двух этапов: предиктора и корректора.

На этапе *предиктор* интегрированием уравнений движения вычисляются предварительные значения компонент вектора скорости. На этом этапе уравнения относительно компонент вектора скорости аппроксимируются неявной разностной схемой, в которой градиент давления определяется явно по известному полю давления с предыдущей итерации. Разностные уравнения решаются относительно приращений переменных. Монотонизация градиента давления, входящего в уравнения движения, осуществляется по алгоритму Рхи—Чоу [3].

На этапе *корректор* сначала решается уравнение для давления, которое получается из уравне-

ния неразрывности для скорректированных компонент вектора скорости. По найденному новому полю давления производится коррекция компонент вектора скорости. Для увеличения скорости сходимости этап *корректор* на каждой итерации может выполняться несколько раз.

После определения новых компонент вектора скорости и давления определяются новые значения температуры и параметров турбулентности. В этой схеме влияние вентиляторов на параметры потока описывается заданными источниками объемных сил в области расположения вентиляторов. В отдельных расчетах воспроизводилась работа вентиляторов с учетом их геометрии. Мощность источников определялась по паспортным характеристикам вентиляторов.

Распределение температуры в твердотельной конструкции, включающей платы, находится из решения уравнения теплопроводности с заданными источниками энерговыделения. Мощность источников энерговыделения определялась экспериментально. Уравнение теплопроводности аппроксимировалось неявной разностной схемой на неструктурированной сетке. При моделировании сопряженного теплообмена между конструкцией и воздушным потоком на границе твердого тела (при решении уравнения теплопроводности) ставилось граничное условие первого рода. Температура на границе с воздушным потоком полагалась равной температуре потока. В воздушной области на этой границе задавался тепловой поток, который определялся по распределению температуры в твердом теле.

Расчетные сетки в твердотельной конструкции и в воздушном потоке получались из структурированных сеток, построенных для отдельных блоков конструкции или воздушного потока методом тройной интерполяции по границам области, которые затем объединялись в одну расчетную модель.

Системы алгебраических уравнений, которые получались при неявной аппроксимации уравнений, решались с использованием решателей СЛАУ из библиотеки параллельных решателей PMLP/ParSol [4]. Для визуализации результатов счета использовался программный продукт Scientific View.

## Результаты расчетов

С использованием расчетной методики были проведены исследования газодинамических

и тепловых потоков внутри новой конструкции серверного шкафа. Численное моделирование реализовано в пакете программ ЛОГОС [5], предназначенном для решения трехмерных задач гидродинамики и тепломассопереноса в твердотельных конструкциях на *параллельных* ЭВМ. Программа обеспечивает счет в режиме распараллеливания, тем самым позволяя значительно увеличивать размеры моделей и сокращать время решения задачи.

Расчетная модель шкафа с насадкой изображена на рис. 3. Она воспроизводит конструкцию шкафа с 40 серверами. Расход воздуха в сервере моделировался исходя из суммарной производительности вентиляторов.

Источник тепла задавался на наиболее тепловыделяющих элементах сервера: процессорах с радиаторами, модулях памяти и материнской плате. Суммарное тепловыделение шкафа составляло 32 кВт.

Призматическая форма насадки (рис. 4), а именно угол наклона  $\theta$ , оказывает влияние на равномерность распределения воздушного потока. Для оценки влияния геометрии входного канала шкафа были построены четыре расчетные модели с углами наклона передней плоскости, равными 0, 3, 5 и 7°.

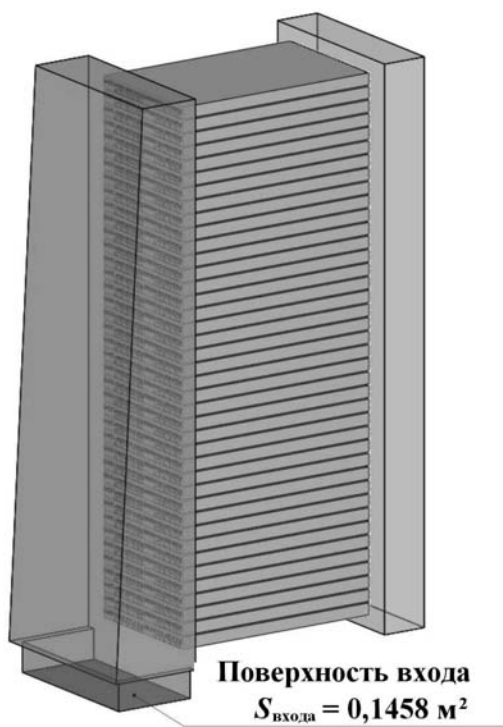


Рис. 3. Расчетная модель серверного шкафа с насадкой

Расчетные модели содержали ~ 40 млн ячеек. Расчеты проводились на параллельных кластерах с числом процессоров 100.

На рис. 5 (см. также цветную вкладку) представлены результаты распределения полей температур в сечении, проходящем через продольную плоскость симметрии шкафа, соответственно для углов наклона передней плоскости входного канала 0, 3, 5 и 7°.

На основе проведенных численных расчетов на рис. 6 (см. также цветную вкладку) представлены кривые распределения объемных расходов охлаждающего потока для указанных углов. Значения расходов воздуха определены в сечении, проходящем через переднюю (или лицевую) поверхность серверов, а именно через его входные отверстия.

При углах наклона, отличных от нулевого, расходы воздуха изменяются в более узком диапазоне. Для модели с нулевым углом диапазон отклонений расходов составляет 1,1 % от расхода холодного воздушного потока на входе в шкаф, а наименьший диапазон отклонений соответствует углу в 5° и составляет 0,6 %.

На рис. 7 (см. также цветную вкладку) представлены расчетные кривые распределения температур на выходе из вычислительных серверов для моделей шкафа с теми же углами наклона передней плоскости насадки.

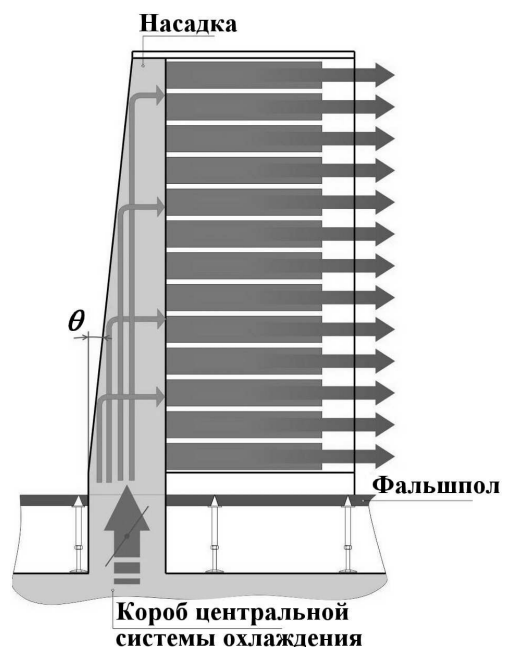


Рис. 4. Схема охлаждения серверного шкафа с насадкой

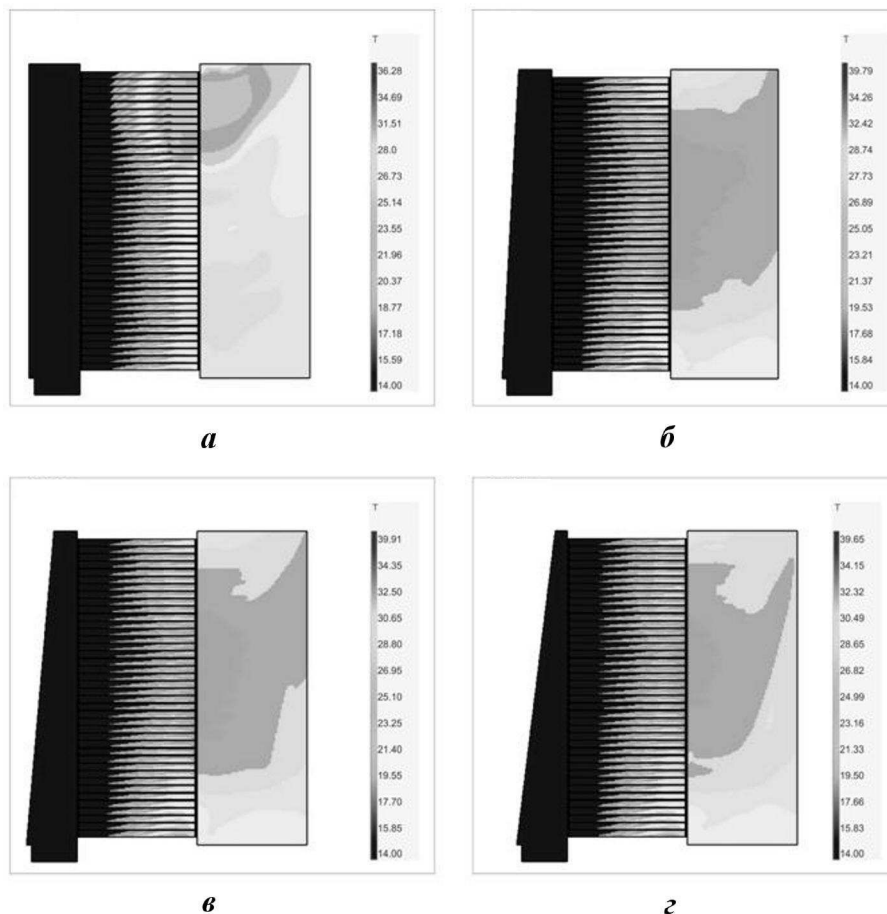


Рис. 5. Распределение полей температур при разных углах наклона насадки: а —  $\theta = 0^\circ$ ; б —  $\theta = 3^\circ$ ; в —  $\theta = 5^\circ$ ; г —  $\theta = 7^\circ$

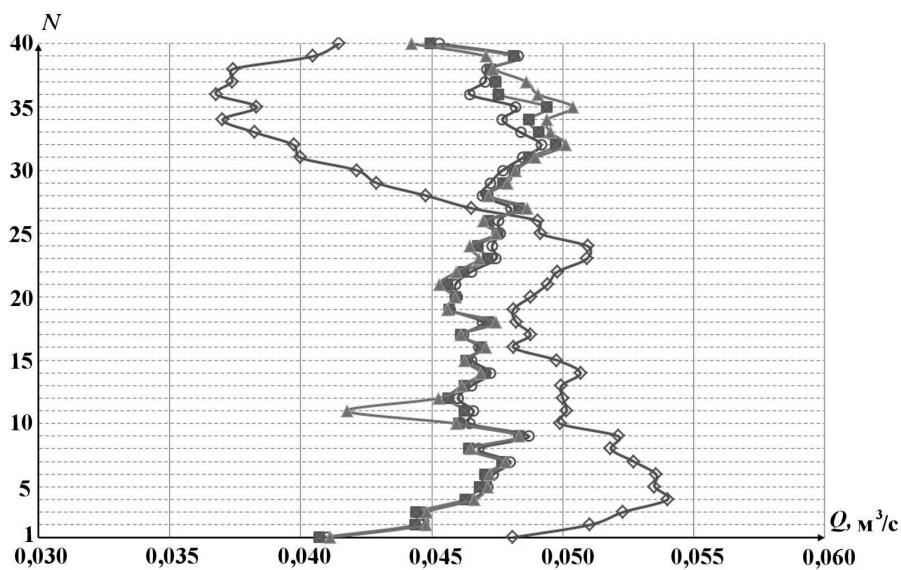


Рис. 6. Объемные расходы охлаждающего потока на выходе из входного канала:  $\diamond$  —  $\theta = 0^\circ$ ;  $\circ$  —  $\theta = 3^\circ$ ;  $\blacksquare$  —  $\theta = 5^\circ$ ;  $\blacktriangle$  —  $\theta = 7^\circ$  ( $N$  — номера вычислительных серверов)

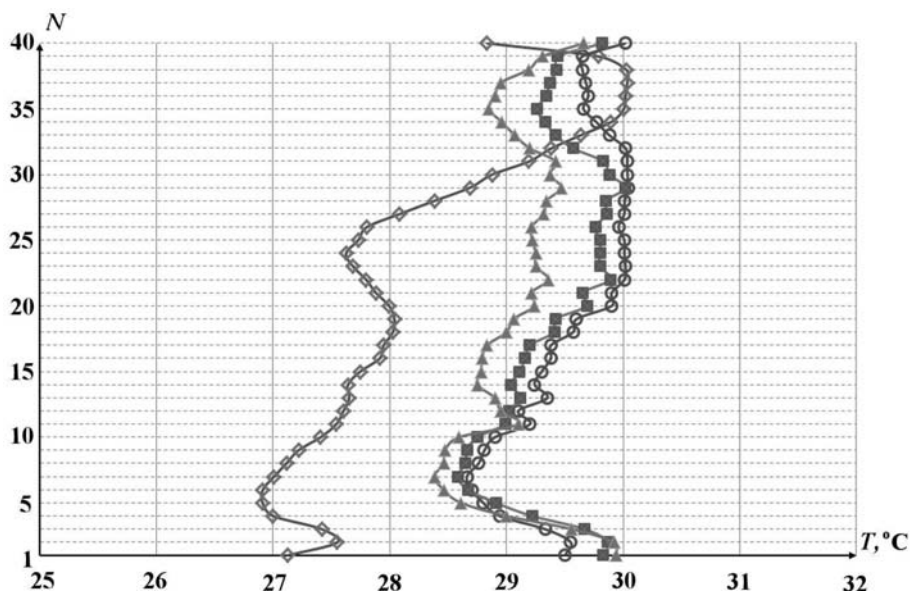


Рис. 7. Температура воздушного потока на выходе из вычислительных серверов: —◇— —  $\theta = 0^\circ$ ; —○— —  $\theta = 3^\circ$ ; —■— —  $\theta = 5^\circ$ ; —▲— —  $\theta = 7^\circ$  ( $N$  — номера вычислительных серверов)

Анализ результатов показал, что при принятых модели шкафа и исходных данных значения температур нагретого воздуха на выходе из серверов (по всей высоте шкафа) варьируются в диапазоне от 28 до 30 °С, что свидетельствует о сравнительно равномерном распределении воздушного потока по высоте. Кроме того, диапазон температур на выходе из серверов в модели шкафа с углом наклона насадки 3, 5 и 7° более узкий, чем при отсутствии наклона, что тоже свидетельствует о лучшем и равномерном распределении воздушного потока. Таким образом, все серверы находятся в равных условиях.

Нагрев воздушного потока — разница между температурой входного потока в шкаф (14 °С) и максимальной температурой на выходе из вычислительных серверов (30 °С) — составляет 16 °С, что характерно для нормально охлаждаемого шкафа.

### Сравнение результатов моделирования с результатами эксперимента

Для сравнения результатов расчета с результатами эксперимента был изготовлен опытный образец серверного шкафа с насадкой, имеющей угол наклона — 5°; в шкаф установили 40 вычислительных серверов. Но смоделировать ситуацию, полностью совпадающую с расчетной, не удалось: в момент проведения эксперимента в наличии имелись серверы с меньшей мощно-

стью энергопотребления — 0,7 кВт (при моделировании — 0,8 кВт).

При использовании международного теста Linpack проводились измерения параметров (скорости и температуры) воздушного потока на входе и выходе из серверов и полной потребляемой мощности серверов. Измерения параметров воздушной среды проводились с помощью датчика метеометра МЭС-200А. Для измерения потребляемой мощности использовался мультиметр FLUKE-123.

Скорость охлаждающего воздушного потока на уровне входа в насадку составляла 9 м/с, температура — 14 °С. Значения температур на выходе из серверов находились возле отметки 28 °С. Потребляемая мощность не превышала 16,8 кВт.

В связи с изменением исходных данных был проведен дополнительный численный расчет. Сравнение экспериментальных и расчетных температур на выходе из серверов представлено на рис. 8.

Температурные значения, полученные в результате численного моделирования, согласуются с экспериментально измеренными данными, что подтверждает равномерность распределения холодного потока воздуха по всей высоте серверного шкафа. А имеющиеся отклонения обусловлены тем, что процессоры в серверах при одинаковой счетной нагрузке (тест Linpack) имеют разные тепловыделения вследствие различных технологических параметров кристаллов.

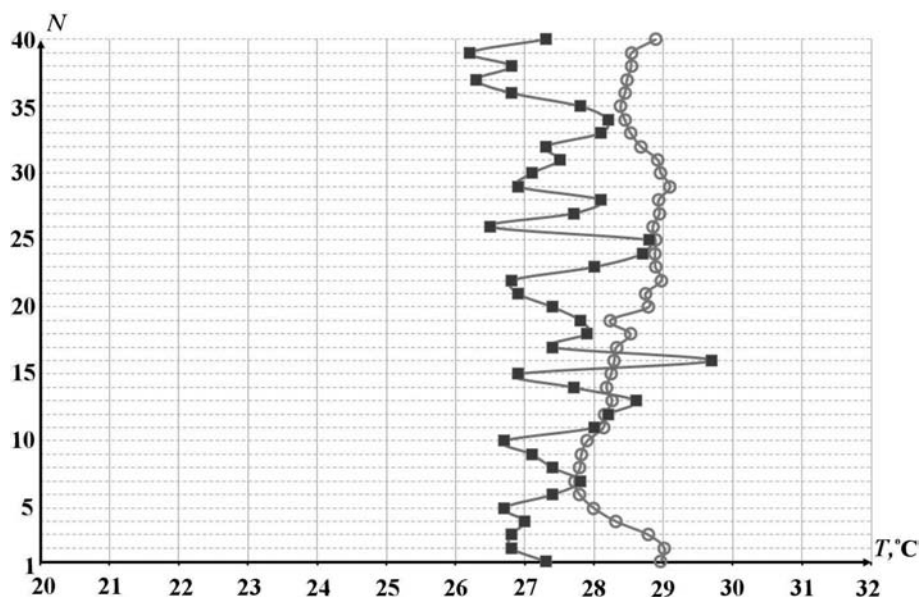


Рис. 8. Расчетные и экспериментальные значения температуры воздушного потока на выходе из вычислительных серверов: —○— — расчет; —■— — эксперимент

### Заключение

Представим основные результаты расчета:

1. Разработанная методика расчета позволяет с удовлетворительной точностью описывать течения газодинамических и тепловых потоков внутри конструктивных элементов мультипроцессорной системы, в частности, внутри новой конструкции серверного шкафа.
2. На основании анализа результатов предложена новая конструкция шкафа, дополненная наклонной насадкой, применение которой при заданных исходных данных позволяет равномерно распределять охлаждающий поток по всей высоте шкафа, т. е. для всего оборудования обеспечивается необходимый температурный режим. В дополнение к этому обеспечивается более плотное размещение компонентов в пространстве шкафа при тех же занимаемых площадях.

2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоиздат, 1984.

3. Рхи С. М., Чоу У. Л. Численный расчет турбулентного обтекания профиля с отрывом у задней кромки // Аэрокосмическая техника. 1984. Т. 2, № 7. С. 33—43.

4. Артемьев А. Ю., Бартенев Ю. Г., Бондаренко Ю. А. и др. Библиотека решателей разреженных систем // Труды ВНИИЭФ. 2004. Вып. 7. С. 80—95.

5. Козелков А. С., Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К. и др. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС для расчета задач гидродинамики и тепломассопереноса на суперЭВМ: базовые технологии и алгоритмы // XII Межд. семинар "Супервычисления и математическое моделирование": Саров, 11—15 октября 2010 г. Тез. докл. С. 53.

### Список литературы

1. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции: Учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1979.

Статья поступила в редакцию 24.10.11.