Оценка эффективности системы приточно-вытяжной вентиляции машинного зала энергоцентра методами CFD-моделирования

Коротков Андрей Дмитриевич
магистр, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, korotkov.tech@gmail.com,

Яковлев Виктор Александрович
кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, yakovlevspb@rambler.ru

В статье представлены результаты исследования температурного режима машинного зала энергоцентра, оснащенного газопоршневыми энергетическими установками. Целью исследования является оценка эффективности проектных решений системы вентиляции с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD). Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent с учетом тепловыделений технологического оборудования, параметров приточно-вытяжной вентиляции и естественной конвекции. Построена трехмерная расчетная модель машинного зала, выполнена генерация конечно-объемной сетки и заданы граничные условия, соответствующие расчетному режиму эксплуатации энергоцентра. Получены поля распределения температуры и скорости движения воздуха, выполнен анализ формирования тепловых зон и движения воздушных потоков. Установлено, что максимальные температуры локализуются в непосредственной близости от газопоршневых установок, тогда как в основной части рабочей зоны температурный режим остается в допустимых пределах. Результаты исследования подтверждают эффективность принятой схемы воздухообмена и демонстрируют возможность применения CFD-моделирования для оценки тепловоздушного режима энергоцентров на стадии проектирования.

Ключевые слова: энергоцентр, машинный зал, газопоршневая установка, температурный режим, вентиляция, вычислительная гидродинамика, CFD-моделирование, ANSYS Fluent.

Введение

В условиях возрастающих требований к надежности и энергоэффективности систем энергоснабжения широкое распространение получают автономные энергоцентры, работающие на базе газопоршневых установок [1, 2]. Применение таких комплексов позволяет одновременно вырабатывать электрическую и тепловую энергию, обеспечивая высокий коэффициент использования топлива и независимость объекта от внешних источников энергоснабжения.

Одним из основных факторов, определяющих надежность эксплуатации энергоцентра, является обеспечение требуемого температурного режима в машинном зале [1, 3, 5]. Работа газопоршневых установок сопровождается интенсивными тепловыделениями от двигателей, генераторов, систем охлаждения, выпускных трактов и вспомогательного оборудования [3, 6]. При недостаточной эффективности системы вентиляции это может привести к образованию зон локального перегрева, ухудшению условий эксплуатации оборудования и снижению его ресурса.

На стадии проектирования оценка тепловоздушного режима традиционно выполняется с использованием инженерных методик расчета воздухообмена [1, 4]. Однако такие методы позволяют определить лишь интегральные параметры вентиляции и не дают информации о пространственном распределении температуры и скорости движения воздуха внутри помещения [4, 7].

В настоящее время для решения подобных задач широко применяются методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD), позволяющие моделировать процессы тепло- и массообмена в помещениях сложной геометрии [8-15]. Использование CFD-моделей обеспечивает возможность анализа температурных полей, выявления застойных зон, оценки эффективности работы вентиляционных систем и оптимизации проектных решений без проведения дорогостоящих экспериментальных исследований [9, 10, 13, 14].

Целью настоящей работы является анализ температурного режима машинного зала энергоцентра на основе численного моделирования и оценка эффективности работы системы приточно-вытяжной вентиляции.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– разработана трехмерная расчетная модель машинного зала;

– выполнена генерация конечно-объемной расчетной сетки;

– заданы граничные условия, соответствующие расчетному режиму эксплуатации;

– проведено численное моделирование процессов теплообмена и движения воздуха;

– выполнен анализ распределения температурных полей и скоростей воздушных потоков;

– дана оценка эффективности принятых проектных решений по организации воздухообмена.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является машинный зал энергоцентра с тремя газопоршневыми энергетическими установками. Основными источниками тепловыделений являются поверхности двигателей внутреннего сгорания, генераторов и элементов технологического оборудования. Для удаления избытков теплоты в помещении предусмотрена система приточно-вытяжной вентиляции, включающая механическую приточную вентиляцию, механическую вытяжку, естественную вытяжную вентиляцию и расход воздуха, потребляемый двигателями на горение топлива. Расчетная модель учитывает совместное действие указанных систем вентиляции, а также влияние естественной конвекции, возникающей вследствие различия плотности нагретого и охлажденного воздуха.

Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent [8]. Подготовка расчетной модели включала построение геометрии машинного зала, формирование расчетной области и генерацию конечно-объемной сетки. Для дискретизации воздушного объема использовалась неструктурированная тетраэдрическая сетка, содержащая 2 778 764 конечных объема [8, 9]. В областях расположения приточных устройств, вытяжных решеток и газопоршневых установок выполнялось локальное сгущение сетки, что позволило повысить точность расчета температурных градиентов и структуры воздушных потоков.

Методика численного моделирования

Численное исследование температурного режима машинного зала энергоцентра выполнено методом вычислительной гидродинамики (CFD), позволяющим моделировать процессы тепло- и массообмена в помещениях сложной геометрии с учетом взаимодействия тепловых и аэродинамических процессов.

Расчетная модель разработана в программном комплексе ANSYS Fluent. На первом этапе построена трехмерная геометрическая модель машинного зала, включающая строительные конструкции, газопоршневые

энергетические установки, элементы системы вентиляции и расчетный объем воздуха. Для сокращения вычислительных затрат из модели были исключены второстепенные конструктивные элементы, не оказывающие существенного влияния на формирование воздушных потоков.

После подготовки геометрической модели выполнена генерация конечно-объемной сетки. Для дискретизации расчетной области использовались тетраэдрические элементы с локальным сгущением вблизи поверхностей газопоршневых установок, приточных устройств и вытяжных решеток. Размер конечных элементов изменялся в зависимости от особенностей исследуемой области: для поверхностей приточных устройств принимался размер 15 мм, для поверхностей газопоршневых установок - 250 мм, для элементов воздуховодов - 100 мм, для остальных ограждающих конструкций - 400 мм. Сформированная расчетная сетка содержала 2 778 764 контрольных объемов, что обеспечило необходимую детализацию распределения температур и скоростей воздушных потоков.

При математическом описании движения воздуха использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье—Стокса [9, 10]. Турбулентный характер течения учитывался с применением модели «Realizable k–ε» со стандартными пристеночными функциями [8, 10]. Для расчета температурного поля дополнительно решалось уравнение энергии, позволяющее учитывать процессы конвективного переноса теплоты между воздушной средой и поверхностями оборудования [12]. В качестве рабочей среды принят воздух, свойства которого задавались моделью «air-ideal-gas», обеспечивающей учет изменения плотности в зависимости от температуры.

Одним из основных факторов, определяющих формирование температурного режима машинного зала, является естественная конвекция [11, 12]. В связи с этим при моделировании учитывалось действие силы тяжести, обеспечивающее корректное описание подъема нагретых воздушных масс и формирования температурной стратификации помещения. Учет данного явления позволил воспроизвести физическую картину движения воздуха, характерную для помещений с интенсивными внутренними тепловыделениями.

В качестве граничных условий использовались проектные значения расхода и температуры приточного воздуха, расхода удаляемого воздуха и тепловыделений газопоршневых установок [8, 9]. Для приточных устройств П1–П3 установлен массовый расход воздуха 15,92 кг/с на каждую решетку (что соответствует 44 340 м³/ч) при температуре приточного воздуха 28,5 °С. Для системы П4 массовый расход составлял 0,79 кг/с (2 190 м³/ч) при аналогичной температуре воздуха. Удаление воздуха осуществлялось через механическую и естественную вытяжную вентиляцию, а также через воздухозабор газопоршневых установок, используемый для обеспечения процесса горения топлива.

Тепловое воздействие технологического оборудования моделировалось заданием теплового потока на поверхностях газопоршневых установок.

Суммарная тепловая мощность одной установки принималась равной 155,2 кВт, что соответствует расчетному режиму эксплуатации энергоцентра. Внутренние поверхности ограждающих конструкций вследствие их значительного термического сопротивления рассматривались как адиабатические.

Расчет проводился в стационарной постановке с использованием связанного алгоритма решения (Coupled) и схем второго порядка аппроксимации. Начальная температура приточного воздуха в расчетной области принималась, исходя из климатических характеристик района, равной 28,5°С. Задача - не допустить нагрев воздуха выше 35°С, чтобы избежать возникновение режима “ДИРАЙТ” Контроль сходимости осуществлялся по невязкам уравнений, а также по стабилизации температуры и скорости воздушного потока в контрольных точках. Максимальное количество итераций составляло 200, чего оказалось достаточно для достижения устойчивого решения.

Результаты исследования и их обсуждение

После завершения численного моделирования был выполнен анализ пространственного распределения температуры и скорости движения воздуха в машинном зале энергоцентра. Полученные результаты позволили оценить эффективность принятых технических решений вентиляции и определить характер формирования температурного режима при расчетной эксплуатации газопоршневых энергетических установок.

Анализ температурного поля рабочей зоны

На рисунке 1 представлено распределение температуры воздуха в горизонтальном сечении, расположенном на высоте 2 м от уровня пола, соответствующей рабочей зоне обслуживающего персонала.

Результаты моделирования показывают, что температура воздуха в основной части помещения изменяется в диапазоне 27–33°С. Наиболее высокие значения температуры наблюдаются в непосредственной близости от газопоршневых установок [12], где локально достигают 40°С. Такое распределение обусловлено интенсивными тепловыделениями от корпусов двигателей и генераторов, а также ограниченным объемом воздуха в непосредственной близости от оборудования.

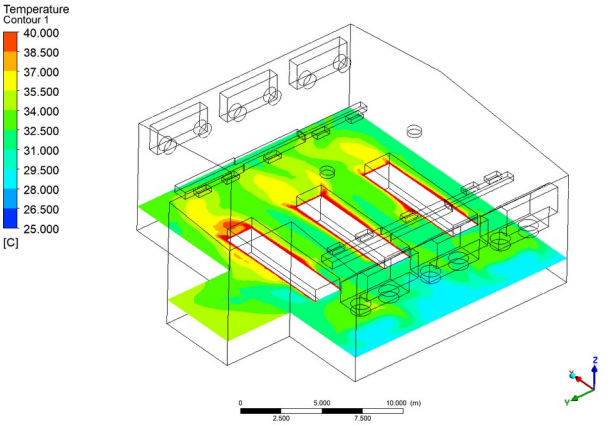


Рисунок 1 - Поле распределения температур. Высота – 2 м

Несмотря на наличие локальных зон повышенной температуры, их влияние ограничивается областью размещения газопоршневых установок [11]. В основной части машинного зала температурное поле характеризуется относительно равномерным распределением, что свидетельствует об эффективном удалении избытков теплоты системой приточно-вытяжной вентиляции.

Следует отметить, что существенного распространения перегретого воздуха в рабочую зону не наблюдается. Это подтверждает правильность выбранной схемы организации воздухообмена, при которой приточный воздух подается непосредственно в нижнюю часть помещения, а удаление нагретых воздушных масс осуществляется через вытяжные устройства верхней зоны.

Анализ распределения скоростей воздушных потоков

Поле скоростей, представленное на рисунке 2, характеризует интенсивность воздухообмена внутри машинного зала.

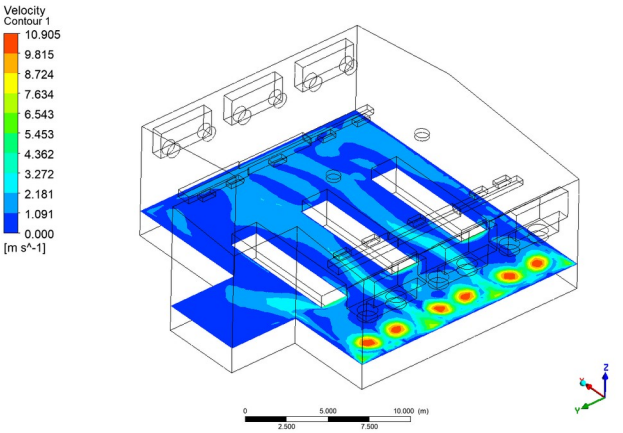


Рисунок 2 - Поле распределения скоростей. Высота – 2 м

Максимальные скорости воздуха наблюдаются в непосредственной близости от приточных устройств, где значения достигают 10 м/с. По мере удаления от воздухораспределителей скорость потока уменьшается и в рабочей зоне стабилизируется на уровне 0,3–0,5 м/с. Полученные значения соответствуют рекомендуемым параметрам движения воздуха для помещений с избытками явной теплоты.

Отсутствие значительных областей с практически неподвижным воздухом свидетельствует об эффективном распределении приточного воздуха по объему помещения [13, 15]. При этом локальные увеличения скорости носят кратковременный характер и ограничиваются зонами непосредственного выхода воздушных струй из приточных устройств.

Анализ температурной стратификации

На рисунках 3 и 4 представлены температурные поля в продольных и поперечных сечениях машинного зала.

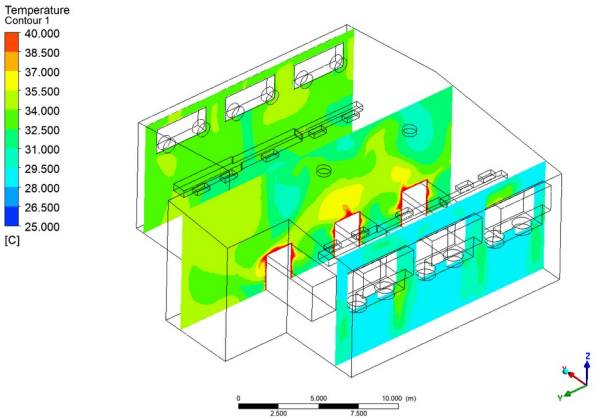


Рисунок 3 - Поле распределения температур. Продольные сечения

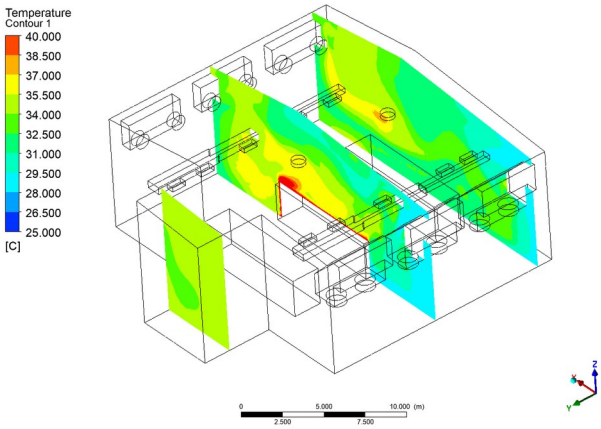


Рисунок 4 - Поле распределения температур. Поперечные сечения

Полученные результаты позволяют установить наличие выраженной температурной стратификации воздушной среды [13, 15]. Под действием естественной конвекции нагретый воздух поднимается в верхнюю часть помещения [12], где формируется область повышенной температуры. Одновременно более холодный приточный воздух распространяется вдоль пола и в рабочей зоне, обеспечивая охлаждение оборудования и предотвращая перегрев помещений.

Наиболее интенсивные восходящие конвективные потоки формируются непосредственно над газопоршневыми установками. После достижения верхней зоны помещения нагретый воздух удаляется системой вытяжной вентиляции, что исключает его накопление под покрытием здания и способствует поддержанию стабильного температурного режима.

Полученная картина движения воздушных масс соответствует физическим закономерностям теплообмена в помещениях с интенсивными внутренними источниками теплоты и подтверждает корректность принятой расчетной модели.

Анализ распределения скоростей воздушного потока в продольных и поперечных сечениях

Для оценки эффективности организации воздухообмена выполнен анализ распределения скоростей воздушного потока в продольных и поперечных сечениях машинного зала (рисунки 5 и 6).

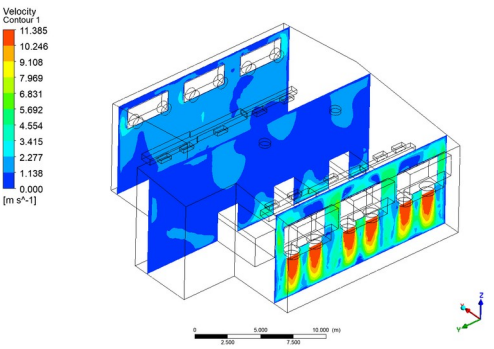


Рисунок 5 - Поле распределения скоростей. Продольные сечения

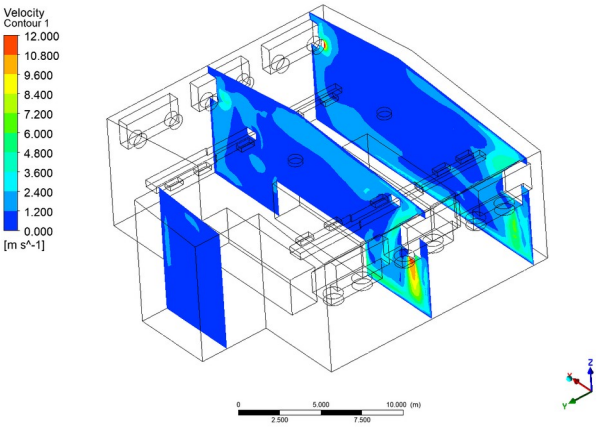


Рисунок 6 - Поле распределения скоростей. Поперечные сечения

Анализ полей скоростей в продольных сечениях показывает, что после подачи приточного воздуха формируются направленные воздушные потоки [11, 13], обеспечивающие охлаждение газопоршневых установок. При взаимодействии с нагретыми поверхностями оборудования скорость воздушного потока возрастает вследствие развития естественной конвекции [12]. Нагретые воздушные массы перемещаются в верхнюю часть помещения и далее удаляются через вытяжные устройства, формируя устойчивую схему воздухообмена.

Распределение скоростей в поперечных сечениях свидетельствует о равномерном движении приточного воздуха по ширине машинного зала [11, 15]. Наибольшие значения скорости наблюдаются в непосредственной близости от приточных устройств, после чего воздушные потоки постепенно замедляются по мере распространения в объеме помещения. При этом существенных застойных зон в рабочей области не выявлено.

Локальные вихревые образования формируются вблизи газопоршневых установок и отдельных конструктивных элементов, что обусловлено изменением направления движения воздушных потоков при их взаимодействии с оборудованием. Однако размеры этих зон незначительны и не оказывают существенного влияния на общий характер воздухообмена.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что принятая схема организации вентиляции обеспечивает равномерное распределение воздушных потоков в объеме машинного зала и эффективное удаление нагретого воздуха из зоны расположения технологического оборудования.

Анализ структуры воздушных потоков

Для оценки эффективности организации воздухообмена дополнительно выполнен анализ линий тока воздушных потоков (рисунок 7).

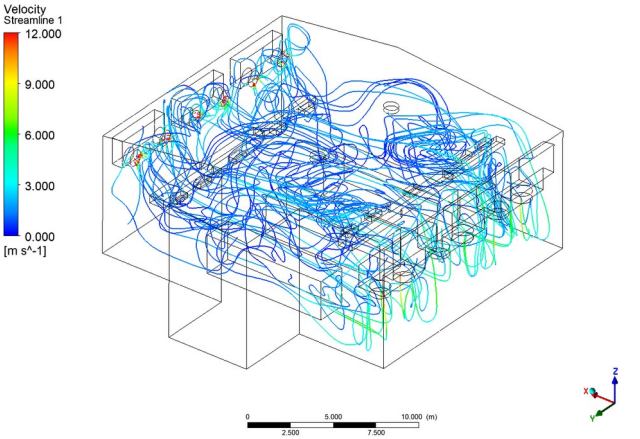


Рисунок 7 - Линии тока

Результаты моделирования показывают, что приточный воздух, поступающий через щелевые напольные воздухораспределители, равномерно заполняет рабочую зону помещения, после чего направляется к источникам тепловыделения. Нагреваясь при контакте с поверхностями оборудования, воздушные массы приобретают положительную плавучесть [12] и перемещаются в верхнюю часть машинного зала, где удаляются вытяжной вентиляцией.

Следует отметить отсутствие крупных рециркуляционных зон, способных привести к накоплению теплоты. Формирующиеся локальные вихревые образования имеют небольшие размеры и не оказывают существенного влияния на общий температурный режим помещения.

Анализ результатов

Полученные результаты свидетельствуют о том, что принятая схема организации воздухообмена обеспечивает эффективное удаление избыточной теплоты от газопоршневых энергетических установок. Локальные зоны повышенной температуры формируются только в непосредственной близости от оборудования и не распространяются на основную часть рабочей зоны.

Сравнение результатов моделирования с нормативными требованиями показывает, что скорость движения воздуха в рабочей зоне соответствует рекомендуемым значениям 0,2–0,5 м/с, а температура воздуха в основной части помещения сохраняется в пределах расчетного диапазона. Локальное превышение температуры обусловлено технологическими особенностями работы энергетического оборудования и не оказывает существенного влияния на условия эксплуатации энергоцентра (Таблица).

Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают эффективность принятых проектных решений по организации вентиляции машинного зала и демонстрируют высокую информативность методов CFD-моделирования при оценке температурного режима энергоцентров.

Таблица

Сравнительная таблица

Параметр	Расчетное значение	Нормируемое значение	Прим.
1	2	3	4
Температура, °С	27-33	не более 28	Категория IIа по СанПиН 1.2.3685-21. Во избежание режима ДИРАЙТ температура принимается не должна превышать 35°С
Скорость, м/с	0,3-0,5 10-12	0,2–0,5	Для постоянных рабочих мест при наличии избытков тепла по СанПиН 1.2.3685-21 Скорость 10-12 м/с достигается локально около решеток.
Относительная влажность, %	-	15-75	Нормируемое значение принимается по СанПиН 1.2.3685-21

Практическое значение результатов исследования

Полученные результаты численного моделирования подтверждают целесообразность применения методов вычислительной гидродинамики при проектировании энергоцентров [9, 10, 13] с газопоршневыми энергетическими установками. Использование CFD-моделирования позволяет выполнить комплексную оценку температурного режима машинного зала еще на стадии проектирования и выявить потенциальные недостатки системы вентиляции до ввода объекта в эксплуатацию.

Проведенный анализ показал, что пространственное распределение температуры определяется не только величиной тепловыделений оборудования, но и взаимным расположением приточных и вытяжных устройств. При рациональной организации воздухообмена обеспечивается эффективное удаление нагретого воздуха из верхней зоны помещения, что способствует поддержанию допустимых параметров микроклимата в рабочей зоне.

Применение численного моделирования позволяет определить участки возможного локального перегрева [13, 14], оценить интенсивность конвективных потоков и проанализировать влияние конструктивных решений на формирование температурного режима. Полученная информация может быть использована при выборе параметров вентиляционного оборудования, корректировке схемы воздухораспределения и оптимизации расположения воздухораспределительных устройств.

Следует отметить, что использование методов CFD существенно сокращает объем дорогостоящих натурных испытаний [9, 14] и позволяет выполнить сравнительную оценку нескольких вариантов проектных решений без необходимости строительства опытных образцов. Это особенно актуально при проектировании энергоцентров большой мощности, где стоимость последующей реконструкции вентиляционных систем значительно превышает затраты на проведение численного моделирования.

Таким образом, результаты проведенного исследования подтверждают, что применение методов вычислительной гидродинамики является эффективным инструментом инженерного анализа температурного режима энергоцентров и способствует повышению надежности эксплуатации энергетического оборудования.

Заключение

В работе выполнен анализ температурного режима машинного зала энергоцентра с использованием методов вычислительной гидродинамики. Разработана трехмерная расчетная модель, учитывающая геометрию помещения, расположение технологического оборудования, параметры системы приточно-вытяжной вентиляции и тепловыделения газопоршневых энергетических установок.

По результатам численного моделирования получены поля распределения температуры и скорости движения воздуха, позволившие оценить особенности формирования теплового режима в расчетных условиях эксплуатации. Установлено, что максимальные температуры локализуются в непосредственной близости от газопоршневых установок, тогда как в основной части рабочей зоны температура воздуха находится в диапазоне 27–33 °С. Локальное повышение температуры обусловлено интенсивными тепловыделениями оборудования и не оказывает существенного влияния на температурный режим всего помещения.

Анализ структуры воздушных потоков показал, что принятая схема приточно-вытяжной вентиляции обеспечивает эффективное удаление избытков теплоты за счет формирования устойчивых восходящих конвективных потоков и организованного отвода нагретого воздуха через вытяжные устройства. Скорость движения воздуха в рабочей зоне соответствует нормативным требованиям, а значительные застойные зоны в объеме помещения отсутствуют.

Полученные результаты подтверждают эффективность принятых проектных решений и демонстрируют возможность применения CFD-моделирования как инструмента оценки температурного режима энергоцентров на стадии проектирования [9, 10, 13]. Использование численного моделирования позволяет повысить обоснованность инженерных решений, снизить вероятность возникновения зон локального перегрева и обеспечить надежную эксплуатацию технологического оборудования.

Перспективным направлением дальнейших исследований является проведение серии расчетов при различных режимах работы газопоршневых установок, изменении параметров наружного воздуха и варьировании характеристик системы вентиляции с целью определения оптимальных условий эксплуатации энергоцентра.

Литература

1. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003 (актуализированная редакция). – М.: Минстрой России, 2020.
2. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. СНиП 23-01-99* (актуализированная редакция). – М.: Минстрой России, 2021.
3. Богословский В.Н. Отопление и вентиляция. В 2 ч. Ч. 2. Вентиляция. – М.: Стройиздат, 1976. – 439 с.
4. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
5. Кувшинов Ю.Я. Теоретические основы обеспечения микроклимата помещений. – М.: Издательство АСВ, 2007. – 184 с.
6. Сканави А.Н., Махов Л.М. Отопление. – М.: Издательство АСВ, 2002. – 576 с.
7. Староверов И.Г., Шиллер Ю.А. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. – М.: Стройиздат, 1992. – 319 с.
8. ANSYS Fluent User's Guide. Release 2024 R1. Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2024.
9. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2nd ed. Pearson Education Limited, 2007. 503 p.
10. Tu J., Yeoh G.H., Liu C. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2018. 452 p.
11. Awbi H.B. Ventilation of Buildings. 3rd ed. Routledge, 2017. 366 p.
12. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 8th ed. John Wiley & Sons, 2017. 1104 p.
13. Chen Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications // Building and Environment. 2009. Vol. 44. No. 4. P. 848–858.
14. Nielsen P.V. Fifty Years of CFD for Room Air Distribution // Building and Environment. 2015. Vol. 91. P. 78–90.
15. Etheridge D., Sandberg M. Building Ventilation: Theory and Measurement. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. 554 p.

Evaluation of the efficiency of the supply and exhaust ventilation system of the power plant turbine hall using CFD modeling methods

Korotkov A.D., Yakovlev V.A.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

JEL classification: L61, L74, R53

The article presents the results of a thermal analysis of the engine hall of an energy center equipped with gas engine power units. The study was carried out using Computational Fluid Dynamics (CFD) methods implemented in ANSYS Fluent. A three-dimensional numerical model was developed taking into account the geometry of the engine hall, heat emissions from technological equipment, and the operating parameters of the supply and exhaust ventilation system. Temperature fields and airflow velocity distributions were analyzed in horizontal, longitudinal, and transverse sections of the engine hall. Local overheating zones were identified, and the efficiency of the adopted ventilation scheme was evaluated. The results demonstrate that CFD simulation is an effective tool for assessing the thermal conditions of energy centers at the design stage and for optimizing ventilation system parameters.

Keywords: energy center, gas engine unit, thermal regime, CFD simulation, computational fluid dynamics, ANSYS Fluent, ventilation, heat transfer.

References

1. SP 60.13330.2020. *Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha. SNiP 41-01-2003 (aktualizirovannaya redaktsiya)* [Heating, Ventilation and Air Conditioning. Updated Edition of SNiP 41-01-2003]. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation, 2020.

2. SP 131.13330.2020. *Stroitel'naya klimatologiya. SNiP 23-01-99* (aktualizirovannaya redaktsiya)* [Building Climatology. Updated Edition of SNiP 23-01-99*]. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation, 2021.
3. Bogoslovskiy V.N. *Otoplenie i ventilyatsiya. Chast' 2. Ventilyatsiya* [Heating and Ventilation. Part 2. Ventilation]. Moscow: Stroyizdat, 1976.
4. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teplovoi effektivnosti zdanii* [Mathematical Modeling and Optimization of Building Thermal Performance]. Moscow: AVOK-PRESS, 2002.
5. Kuvshinov Yu.Ya. *Teoreticheskie osnovy obespecheniya mikroklimata pomeshchenii* [Theoretical Foundations of Indoor Microclimate Control]. Moscow: ASV Publishing House, 2007.
6. Skanavi A.N., Makhov L.M. *Otoplenie* [Heating]. Moscow: ASV Publishing House, 2002.
7. Staroverov I.G., Shiller Yu.A. *Vnutrennie sanitarno-tekhnicheskie ustroistva. Chast' 3. Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha* [Internal Sanitary Engineering Systems. Part 3. Ventilation and Air Conditioning]. Moscow: Stroyizdat, 1992.
8. ANSYS Fluent User's Guide. Release 2024 R1. Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2024.
9. Versteeg H.K., Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Pearson Education Limited, 2007.
10. Tu J., Yeoh G.H., Liu C. *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2018.
11. Awbi H.B. *Ventilation of Buildings*. 3rd ed. Routledge, 2017.
12. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 8th ed. John Wiley & Sons, 2017.
13. Chen Q. Ventilation Performance Prediction for Buildings: A Method Overview and Recent Applications. *Building and Environment*. 2009;44(4):848–858.
14. Nielsen P.V. Fifty Years of CFD for Room Air Distribution. *Building and Environment*. 2015;91:78–90.
15. Etheridge D., Sandberg M. *Building Ventilation: Theory and Measurement*. Chichester: John Wiley & Sons; 1996.