

УДК 697.9

Вопросы микроклимата термоконстантных помещений в цехах обработки и сборки изделий

Марков Никита Алексеевич

mnikita.markovm@gmail.com

SPIN-код: 1792-1479

Угорова Светлана Вениаминовна

ughorova@mail.ru

SPIN-код: 2675-0095

Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

Аннотация. Представлены результаты комплексного исследования по оптимизации микроклимата в производственных помещениях точной обработки с использованием методов компьютерного моделирования. На примере типового цеха проведен детальный анализ влияния тепловыделений технологического оборудования на температурный режим рабочей зоны. С применением программного комплекса разработана и верифицирована эффективная схема воздухораспределения, обеспечивающая поддержание стабильной температуры. Особое внимание уделено обоснованию ключевых параметров системы: температуры приточного воздуха, конфигурации воздухораспределения. Результаты моделирования подтвердили равномерность распределения температурных полей (колебания не более 0,5 °С в рабочей зоне) и подвижности воздуха (скорость воздуха 0,2–0,4 м/с). Практическая значимость работы заключается в разработке готовых к внедрению инженерных решений, позволяющих одновременно обеспечить требуемые параметры микроклимата. Предложенная методика может быть адаптирована для производственных помещений различной конфигурации и технологического оснащения.

Ключевые слова: микроклимат, вентиляция, точное производство, тепловой баланс, воздухообмен

Microclimate issues in thermally stable environments for machining and assembly workshops

Markov Nikita Alekseevich

mnikita.markovm@gmail.com

SPIN-code: 1792-1479

Ugorova Svetlana Veniaminovna

ughorova@mail.ru

SPIN-code: 2675-0095

Vladimir State University, Vladimir, Russia

Abstract. This article presents the results of a comprehensive study on optimizing the microclimate in precision manufacturing facilities using computational modeling methods. Using a typical workshop as an example, a detailed analysis was conducted on the influence of heat emissions from technological equipment on the temperature regime of the working area. An effective air distribution scheme was developed and verified using specialized software, ensuring stable temperature maintenance. Particular attention was paid to justifying the system's key parameters: supply air temperature and air distribution con-

figuration. The modeling results confirmed uniform temperature distribution (fluctuations not exceeding 0.5°C in the working area) and optimal air movement (velocity of $0.2\text{--}0.4\text{ m/s}$). The practical significance of this work lies in the development of ready-to-implement engineering solutions that simultaneously ensure the required microclimate parameters. The proposed methodology can be adapted for production facilities with various configurations and technological equipment.

Keywords: microclimate, ventilation, precision manufacturing, heat balance, air exchange

Введение. Современные производства точной обработки металлов и других материалов предъявляют исключительно высокие требования к параметрам микроклимата в рабочих зонах. Температурные колебания, превышающие $\pm 1^{\circ}\text{C}$, способны вызывать недопустимые деформации обрабатываемых деталей, снижать точность позиционирования оборудования и в конечном итоге существенно ухудшать качество выпускаемой продукции [1–3]. Особую актуальность эта проблема приобретает в условиях интенсивного тепловыделения от современного технологического оборудования, включающего мощные шпиндельные узлы, системы ЧПУ и вспомогательные механизмы. Традиционные подходы к проектированию вентиляционных систем зачастую не учитывают неравномерность распределения тепловых нагрузок в производственных помещениях, что приводит к возникновению локальных перегревов и нестабильности температурного режима [4–6]. В данной работе представлен комплексный анализ возможностей поддержания оптимального микроклимата с применением современных методов компьютерного моделирования, позволяющих учитывать все значимые факторы теплового и воздушного режимов производственного помещения [7–9].

Материалы и методы. Исследование проводилось на примере типового производственного помещения площадью 16 м^2 с высотой 4 м с использованием программного комплекса SolidWorks Flow Simulation (рис. 1) [10–12].

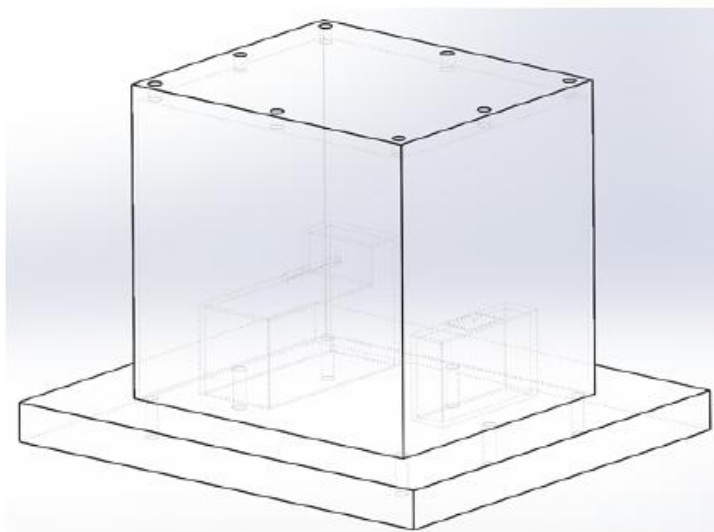


Рис. 1. Цифровая модель термоконстантного помещения

В качестве объекта моделирования было выбрано помещение для точной механической обработки с установленными токарными и одним фрезерным станком. Тепловые характеристики оборудования задавались на основе реальных эксплуатационных данных: токарные станки — 1800 Вт каждый, фрезерный станок — 2200 Вт.

Система вентиляции моделировалась с использованием восьми воздухо-распределителей типа СДК1 диаметром 160 мм, расположенных на высоте 3 м от пола. При моделировании применялась стандартная k - ε модель турбулентности с адаптивным шагом по времени. Особое внимание уделялось построению оптимальной расчетной сетки — в зонах воздухо-распределителей и тепловыделяющего оборудования размер ячейки составлял 50 мм, в остальном объеме — 200 мм.

Граничные условия включали: объемный расход воздуха через каждое сопло 560 м³/ч при температуре 20 °С, статическое давление на вытяжке 0 Па, коэффициент излучения поверхностей от 0,3 (металлические детали станков) до 0,9 (бетонные стены).

Результаты. Проведенное моделирование позволило получить детальную картину распределения температурных полей и воздушных потоков в рабочем помещении. В установившемся режиме работы оборудования было зафиксировано поддержание температуры в рабочей зоне (на высоте 1,5 м от пола) в диапазоне 19,8–20,3 °С при температуре приточного воздуха 20 °С. Максимальные температурные отклонения наблюдались в непосредственной близости от станков, однако они не оказывали влияния на общий температурный режим помещения.

Анализ векторных полей скорости воздуха показал равномерное распределение воздушных потоков со средней скоростью 0,25 м/с в рабочей зоне, что соответствует комфортным условиям для персонала. Особый интерес представляют данные о динамике выхода системы на стационарный режим — стабилизация температурного поля происходила в течение 1,5 часов после включения оборудования (рис. 2).

Расчеты показали, что предложенная система вентиляции с кратностью воздухообмена 70 обеспечивает эффективное удаление тепловыделений. Дополнительным положительным эффектом стало отсутствие зон застоя воздуха и образование устойчивых конвективных потоков, способствующих равномерному распределению температуры по всему объему помещения.

Обсуждение полученных результатов. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность применения методов компьютерного моделирования для решения задач оптимизации микроклимата производственных помещений. Проведенное исследование позволило выявить несколько ключевых факторов, определяющих успешность реализации предложенного технического решения. Проведенные расчеты на различных временных интервалах подтвердили надежность поддержания заданных параметров микроклимата при колебаниях внешней температуры в пределах ± 1 °С. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований, включая

разработку адаптивных систем управления вентиляцией на основе данных реального мониторинга температурных полей.

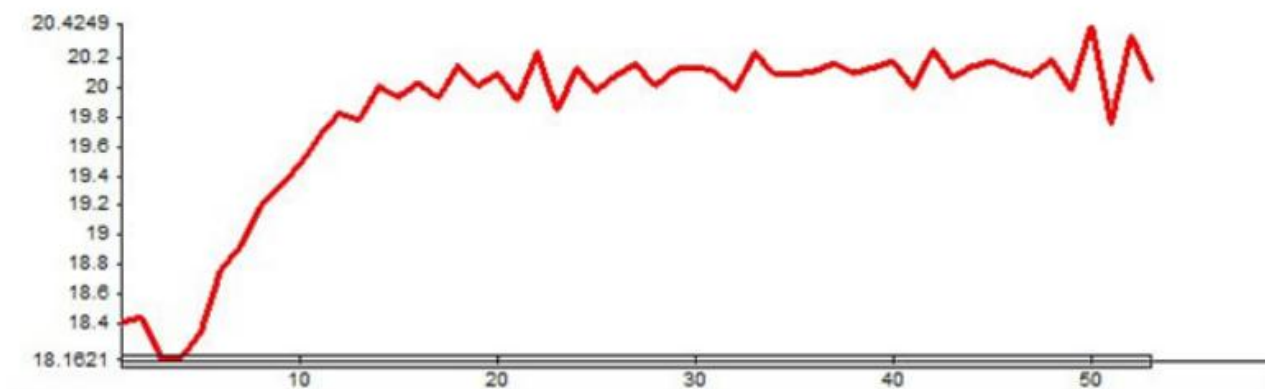


Рис. 2. Стабилизация температуры воздуха в помещении

Заключение. Проведенное исследование позволило разработать комплексное решение по организации микроклимата в производственных помещениях точной обработки, обеспечивающее стабильное поддержание температурного режима в пределах $20\pm 1^{\circ}\text{C}$. Использование методов CFD-моделирования в среде SolidWorks Flow Simulation продемонстрировало свою высокую эффективность для решения задач такого класса, позволяя с высокой точностью прогнозировать распределение температурных полей и воздушных потоков в условиях сложного теплового воздействия от технологического оборудования.

Выявленная зависимость между пространственным расположением тепловыделяющего оборудования и конфигурацией воздухораспределительной сети. Проведенные расчеты показали, что предложенная система обеспечивает:

- равномерное распределение температуры в рабочей зоне — колебания не превышают $0,5^{\circ}\text{C}$;
- отсутствие сквозняков — скорость воздуха $0,2\text{--}0,4\text{ м/с}$;
- быстрый выход на стационарный режим — $1,5$ часа;
- устойчивость к изменениям внешних условий.

Полученные результаты имеют важное значение для повышения точности обработки деталей, улучшения условий труда персонала и снижения энергозатрат на предприятиях машиностроительного комплекса. Представленные решения могут быть рекомендованы к внедрению на производствах, где требования к стабильности микроклимата являются критически важными для обеспечения качества продукции.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, Госзадание ВлГУ).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Sui X., Zhang X. Analysis on combinations of indoor thermal microclimate parameters in radiant cooled residential buildings and drawing of new thermal comfort charts. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2015, vol. 37, no. 1, pp. 66–84. <https://doi.org/10.1177/0143624415596924>
- [2] Wu X., Fang L., Olesen B. W., Zhao J., Wang F. Comparison of indoor air distribution and thermal environment for different combinations of radiant heating systems with mechanical ventilation systems. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2017, no. 1, vol. 39, pp. 81–97. <https://doi.org/10.1177/0143624417710105>
- [3] Xia Y., Yan H., Deng S., Chan M.Y. A new capacity controller for a direct expansion air conditioning system for operational safety and efficiency. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2017, vol. 39, no. 1, pp. 21–37. <https://doi.org/10.1177/0143624417717203>
- [4] Богословский В.Н. *Внутренние санитарно-технические устройства. Вентиляция и кондиционирование воздуха*. Москва, Стройиздат, 1977, 142 с.
- [5] Hu J.S. Air handling processes of the cleaning air conditioning system for hospital operating rooms. *Journal of HVAC*, 2001, vol. 31, pp. 73–75.
- [6] Федотов А. Е. *Чистые помещения*. Москва, «АСИНКОМ», 2003, 576 с.
- [7] Hu S.C., Chuah Y.K., Huang S.C. Performance comparison of axial fan and fan-filter unit type clean rooms by CFD. *ASHRAE Trans.*, 2002, vol. 108, no. 1, pp. 1014–1022.
- [8] Flaherty R. Clean rooms: Continuing evolution of fan filter units for clean rooms. *Filtration and Separation*, 2011, vol. 48, no. 4, pp. 33–37.
- [9] Xu T. Airflow design for cleanroom its economic implication. *Proceedings of the 5th China International Academic Forum & Products Exposition on Contamination Control Technology, Construction Sub-Council of China Council for the Promotion of International Trade and Chinese Contamination Control Society*. Beijing, Chin, 2002, 7 p.
- [10] Арзамасцева Л.В., Афанасьев С.С., Григорьев В.В., Жемчугов В.Е. *Изолированное чистое помещение гибкой технологической системы*. Патент № 2017525 С1 РФ, 1994.
- [11] Волынцева А.Б., Ощепков А.Ю., Калинин С.П. *Термостатированное помещение для работы высокоточного измерительного оборудования*. Патент № 2478766 С2 РФ, бюл. № 10, 2011.
- [12] Угорова С.В., Садов В.С. *Изолированное чистое помещение*. Патент № 137926 U1 РФ, бюл. № 6, 2014.