

УДК 697.921.4:51-74:697.92

© Джин Хевэй, аспирант

© Н. С. Пономарев, доцент

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: jinhewei@163.com, pnmrv17@mail.ru

© Сон Ян Пин, доцент

(Хэнаньский градостроительный университет, Хэнань, Китай)

E-mail: 30040101@hncj.edu.cn

© Т. С. Рогожина, доцент

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: tatiana1703t@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-1-84-94

© Jin Hewei, post-graduate student

© N. S. Ponomarev, Associate Professor (Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: jinhewei@163.com, pnmrv17@mail.ru

© Song Yan Ping, Associate Professor

(Henan University of Urban Construction, Henan, China)

E-mail: 30040101@hncj.edu.cn

© T. S. Rogozhina, Associate Professor

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: tatiana1703t@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ СВАРОЧНЫХ ЦЕХОВ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ

NUMERICAL MODELING OF VENTILATION SYSTEM FOR LARGE VOLUME WELDING SHOPS

Предложена и исследована система вентиляции для сварочного цеха с использованием нового воздухораспределителя с вращающимися решетками. В результате численного моделирования в программе FLUENT получено пространственное распределение концентрации взвешенных частиц при различных направлениях подачи приточного воздуха. Выполнена оценка эффективности удаления из рабочей зоны помещения сварочного аэрозоля с частицами размерами от 1 до 50 мкм при различных скоростях подачи воздуха. Исследования показали, что увеличение скорости подачи воздуха способствует снижению концентрации твердых частиц в рабочей зоне. Выявлено рациональное значение скорости подачи воздуха 10 м/с, соответствующее технологическим требованиям выполнения сварочных работ. Изучено влияние пористости частиц на их концентрацию в рабочей зоне.

Ключевые слова: аэрозоль, сварочный цех, система вентиляции, воздухораспределитель, пылеудаление, концентрация частиц.

A ventilation system for a welding shop using a new air distributor with rotating grilles is proposed and investigated. As a result of numerical modeling in the FLUENT program, there was obtained the spatial distribution of concentration of suspended particles for different flow directions of the supply air. There was carried out an assessment of the efficiency of removing the welding aerosol with particles ranging in size from 1 to 50 microns from the premise working area at different air supply speeds. The implemented research shows that the increasing of the air flow rate helps reducing the concentration of particulate matter in the working area. There has been specified a rational value for the air supply speed of 10 m/s, which corresponds to the technological requirements for welding works. The influence of particles' porosity on their concentration in the working area was studied.

Keywords: aerosol, welding shop, ventilation system, air distributor, dust removal, particle concentration.

Введение

В рабочей зоне сварочного цеха во время технологического процесса выделяются вредные вещества, образующие высокотем-

пературный аэрозоль, насыщающий внутренний воздух [1, 2].

При выполнении сварочных работ выделяются канцерогенные пары и химические

соединения, основными из которых являются: оксид железа с примесью фтористых или марганцевых соединений (3–6 %), фтористый водород, хромовый ангидрид, оксиды и диоксиды азота (при плазменной и газовой сварке), следы оксидов других металлов [3, 4].

Токсичные включения, входящие в состав сварочного аэрозоля, и вредные газы попадают в организм человека через дыхательные пути и оказывают на него неблагоприятное воздействие, а также могут вызывать ряд профзаболеваний. Мелкие частицы пыли размерами от 0,4 до 5 мкм, проникающие глубоко в дыхательные пути, представляют наибольшую опасность для здоровья, пылинки размером до 10 мкм (PM10) и более задерживаются в бронхах, также вызывая их заболевания [5]. Частицы, проникающие в легкие, по мере накопления попадают и в систему кровообращения [6].

Анализируя результаты исследований [3, 7, 8], можно отметить, что в настоящее время практически отсутствуют систематизированные экспериментальные натурные данные по распределению параметров микроклимата в сварочных цехах при использовании систем общеобменной вентиляции для сварочного цеха без фиксированных рабочих мест. В работах [3, 9] выполнена оценка эффективности местных отсосов для сварочных постов. Результаты измерений концентрации оксида и диоксида углерода, диоксида азота на рабочем месте в течение рабочего дня приведены в [8]. В работе [10] представлены результаты измерений концентрации сварочного аэрозоля с целью выявления времени достижения ПДК, а также результаты численного моделирования общеобменной вентиляции сварочного цеха и выявлен рациональный угол подачи приточного воздуха для обеспечения ПДК взвешенных частиц и вредных веществ.

На практике с помощью местной вентиляции можно удалить лишь 2/3 объема

всех выделяемых вредных веществ. Кроме того, оборудование рабочих сварочных мест локальной вытяжной системой эффективно, когда речь идет о стационарных постах [10]. Если сварщикам приходится постоянно перемещаться или выполнять работу на передвижных сварочных столах, система местной вентиляции становится неэффективной. В таких случаях необходимо проектирование общеобменной системы вентиляции [11].

В связи с вышеизложенным задача повышения эффективности вентиляции в сварочном цехе является одной из приоритетных при проектировании вентиляционных систем и планировании сварочных работ [9].

При разработке рациональной схемы общеобменной вентиляции необходимо учесть все важные факторы, в том числе движение конвективных потоков. Эти потоки не отличаются стабильностью и могут быть нарушены циркуляционным движением воздуха или потоком приточного воздуха, поэтому возникают сложности в организации воздухообмена в сварочном цехе [12].

Целью настоящей работы являются разработка эффективной общеобменной системы вентиляции сварочного цеха с использованием нового воздухораспределителя с вращающимися решетками и исследование на основе результатов численного моделирования воздушного режима помещения.

Численное моделирование успешно применяется для решения различных гидродинамических задач [13–15], в том числе для сварочных цехов больших объемов [10]. В работе поставлены следующие задачи: получить данные о распределении скорости движения воздуха при изменении направления подачи; оценить эффективность удаления из рабочей зоны помещения сварочного аэрозоля с частицами размерами от 1 до 50 мкм при различных скоростях подачи воздуха; изучить влияние пористости твер-

дых частиц на их концентрацию в рабочей зоне при подаче воздуха со скоростью 10 м/с.

Объектом исследования является крупный сварочный цех, расположенный в провинции Хэнань (Китай), размерами 216×66×13,7 м (рис. 1). В цехе отсутствуют фиксированные рабочие места, сварочные работы могут проводиться в любом месте рабочей зоны. Для предотвращения распространения сварочного аэрозоля в атмосферу при входе и выходе из цеха установлены воздушные завесы.

В связи с размещением в верхней части цеха кран-балок вертикальные воздухопроводы приточных систем вентиляции проложены вдоль колонн цеха для подачи приточного воздуха непосредственно в рабочую зону. Каждый из шести независимых воздухопроводов имеет четыре воздухораспределителя. Два из них в средней части являются четырехсторонними и два — односторонними. Высота выпуска воздуха от 0,5 м до 1,5 м от уровня пола (рис. 2). Во избежание образования зон скопления частиц, вызванных неравномерным движением потоков воздуха в цехе, направление подачи воздуха из воздухораспределителя может изменяться с периодом 60 с. Диапазон изменения направления приточной струи находится в преде-

лах 60° влево и вправо, перпендикулярно направлению плоскости выпуска воздуха.

Конструкция воздухораспределителя с четырехсторонним выпуском показана на рис. 3. Каждый из воздухораспределителей имеет 10 вращающихся решеток, направление подачи регулируется вращением решеток.

Удаление отработанного воздуха осуществляется из верхней зоны помещения. Имеется 21 вытяжное отверстие для удаления воздуха, каждое из которых оснащено электростатическим фильтром.

Методы

Для оценки эффективности принятой схемы организации воздухообмена выполнено численное моделирование распространения сварочного аэрозоля с использованием программы FLUENT [16].

В исследовании используется метод SIMPLE для решения задач о распределении скорости и давления [14], модель RNS для решения уравнений турбулентности и модель DPM для решения уравнений движения твердых частиц [15]. Модель DPM объединяет модели движения жидкости Эйлера и Лагранжа, позволяя определять траекторию частиц в поле потока. Граничное условие скорости подачи воздуха принимает параметр *velocity-inlet* на входе [17], на выходе

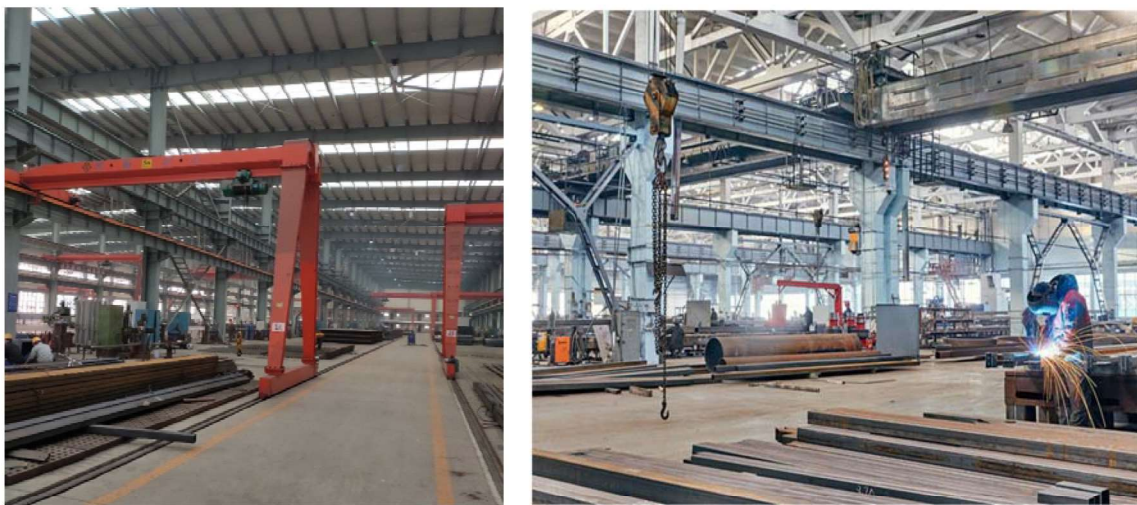


Рис. 1. Сварочный цех

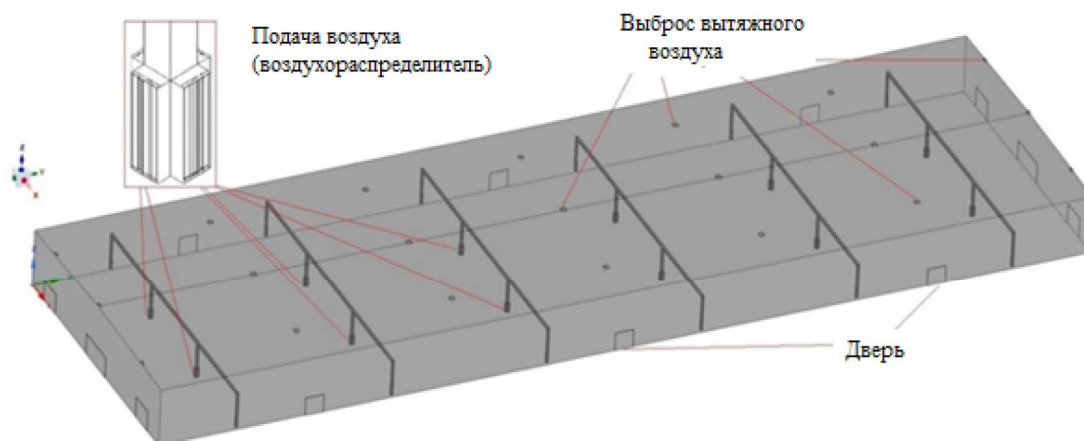


Рис. 2. Системы подачи и удаления воздуха сварочного цеха

выброса используется граничный параметр outflow [18].

В течение 1 с в цех равномерно распыляется 1 кг частиц Fe_2O_3 размером 10 мкм с плоскости на отметке 0,500 м, скорость распыления 1 м/с (вертикально вверх).

Всего в модели 7 995 869 сеточных элементов, а качество интегрированных элементов превышает 0,6. Maximum Aspect Ratio 36, Maximum Skewness 0,799.

Сложность данного численного исследования заключается в моделировании приточной струи из воздухораспределителя. Для упрощения выполнена эквивалентная замена воздухораспределителя с решеткой на отверстие без решетки с равным расходом. Изменение направления скорости, вызванное вращением пластин решетки, имитировано путем задания направления скорости в ПК FLUENT, в частности, путем разложения

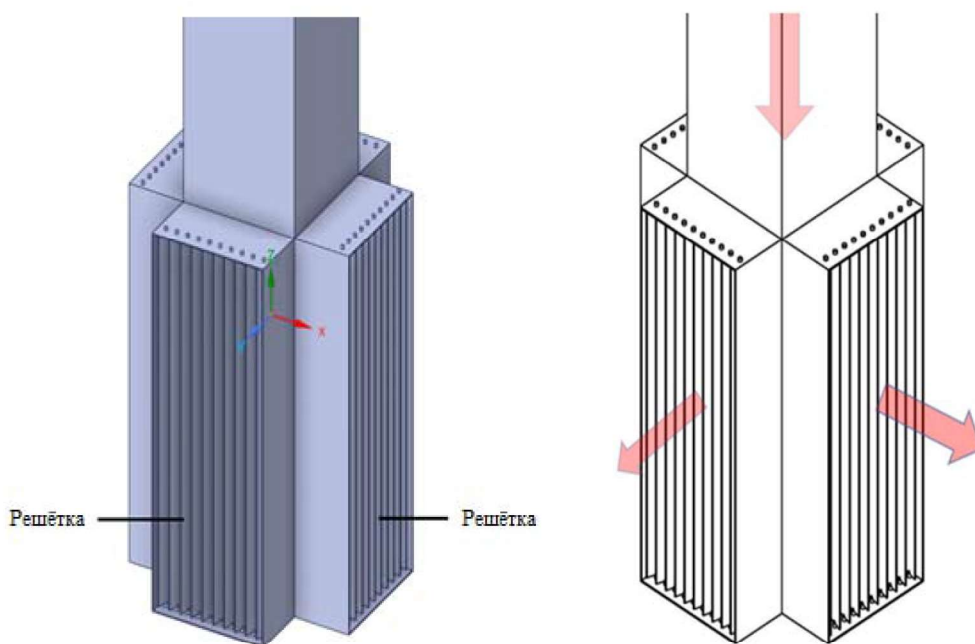


Рис. 3. Схема конструкции воздухораспределителя с четырехсторонним выпуском

вектора скорости на составляющие V_x вдоль направления потока и V_y перпендикулярно направлению потока, и записи соответствующих выражений и условий в программе FLUENT. Соответствующие уравнения и условия выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} V &= V_x + V_y; \\ V_x &= V|\sin \alpha|; \\ V_y &= V|\cos \alpha|, \end{aligned} \quad (1)$$

где α — угол между направлением воздушного потока и плоскостью, в которой расположен выходной патрубков воздухораспределителя, диапазон изменения α составляет от 30° до 150° ; α связан с «flow-time» формулой $\alpha = \text{«flow-time»} \times \pi/60$.

В этой системе диапазон колебаний решетки составляет $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$, поэтому на V_x и V_y должны быть наложены следующие ограничения:

- при $0 \leq \sin \alpha \leq 0,5$ $\sin \alpha = 0,5$;
- при $0,5 < \sin \alpha \leq 1$ $\sin \alpha = \sin \alpha$;
- при $-1 \leq \cos \alpha < -0,5 \cdot \sqrt{3}$ $\cos \alpha = -0,5 \cdot \sqrt{3}$;
- при $-0,5 \cdot \sqrt{3} \leq \cos \alpha < 0,5 \cdot \sqrt{3}$ $\cos \alpha = \cos \alpha$;
- при $0,5 \cdot \sqrt{3} < \cos \alpha \leq 1$ $\cos \alpha = 0,5 \cdot \sqrt{3}$.

Известно, что средняя концентрация твердых частиц в рабочей зоне (на высоте 1,5 м) и средняя концентрация твердых частиц в цехе изменяются во времени [18]. Не учитываются объем частиц; силы, действующие между частицами; эффекты столкновения и слияния частиц; термофоретические силы из-за градиентов температуры [19]; влияние электрических и магнитных полей на движение частиц. Учитывается влияние турбулентности и «Saffman Lift Force» (подъемная сила) [20].

Результаты

Для иллюстрации схемы подачи воздуха на рис. 4 показан результат численного моделирования скорости движения воздуха вблизи воздухораспределителя для трех различных моментов времени (2,5 с; 30 с; 57,5 с) при максимальной скорости подачи воздуха 20 м/с. Благодаря вращению решетки обеспечивается равномерное распределение воздуха на 360° .

Для исследования влияния скорости подачи воздуха на эффективность системы общеобменной вентиляции при удалении пыли в сварочном цехе были заданы скорости подачи воздуха 5, 10, 15 и 20 м/с. Наблюдения за уменьшением концентрации твердых частиц в рабочей зоне и общей массы в цехе в течение 120 с после начала их выброса показали результаты, представленные на рис. 5 и 6.

Концентрация твердых частиц в рабочей зоне быстро снижается (см. рис. 5), а общее количество частиц в цехе уменьшается медленно (см. рис. 6). При скорости на выходе из решетки 10 м/с необходимо 120 с, чтобы снизить концентрацию PM10 в рабочей зоне цеха на 55 %. Увеличение скорости движения воздуха с 10 до 20 м/с способствует снижению концентрации твердых частиц в два раза.

Для обеспечения качества воздуха в рабочей зоне скорость его подачи должна быть максимально увеличена, но слишком высокая скорость может привести к ухудшению качества сварочных работ и увеличению потребления энергии. Исходя из этого, рекомендуется принимать скорость приточного воздуха 10 м/с, а для снижения концентрации вредных веществ в период технологических перерывов организовать усиленное проветривание помещения при скорости воздуха до 20 м/с. Увеличивать производительность систем вентиляции для достижения эффективного удаления пыли нецелесообразно.

Обсуждение

Для изучения влияния общеобменной системы вентиляции на эффективность удаления частиц различных размеров был изучен процесс удаления шести типов частиц: PM50, PM20, PM10, PM5, PM2.5 и PM1. Зависимости уменьшения концентрации и общей массы частиц от времени приведены на рис. 7 и 8.

Расчеты показывают, что размер частиц оказывает значительное влияние на скорость оседания частиц. Частицы с размером

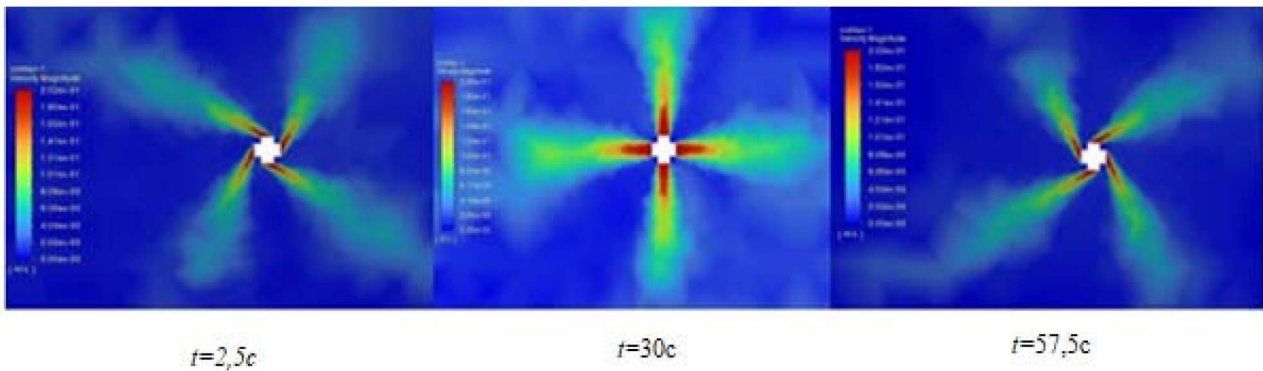


Рис. 4. Изменение направления распределения воздуха в системе подачи в промежутки времени 2,5 с, 30 с и 57,5 с

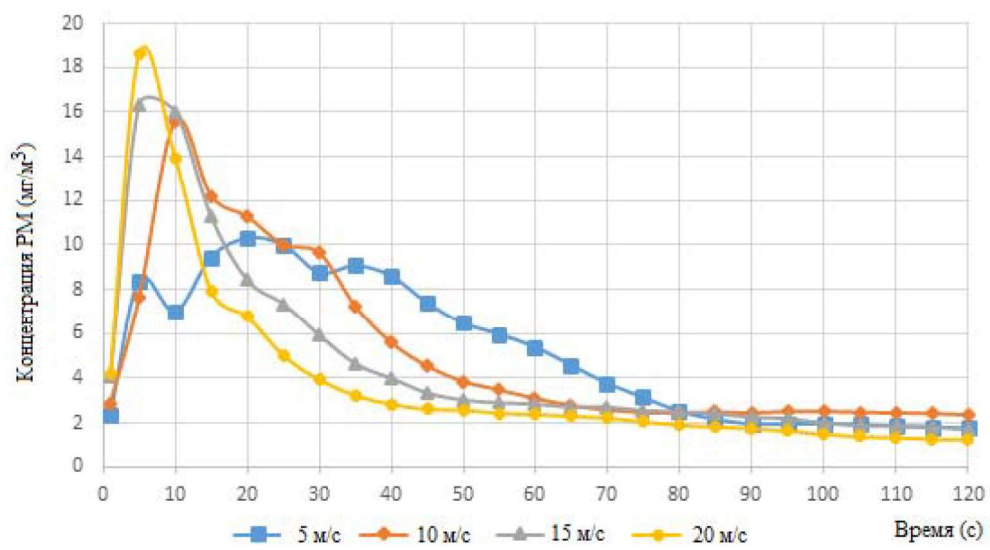


Рис. 5. Изменение концентрации PM10 в рабочей зоне

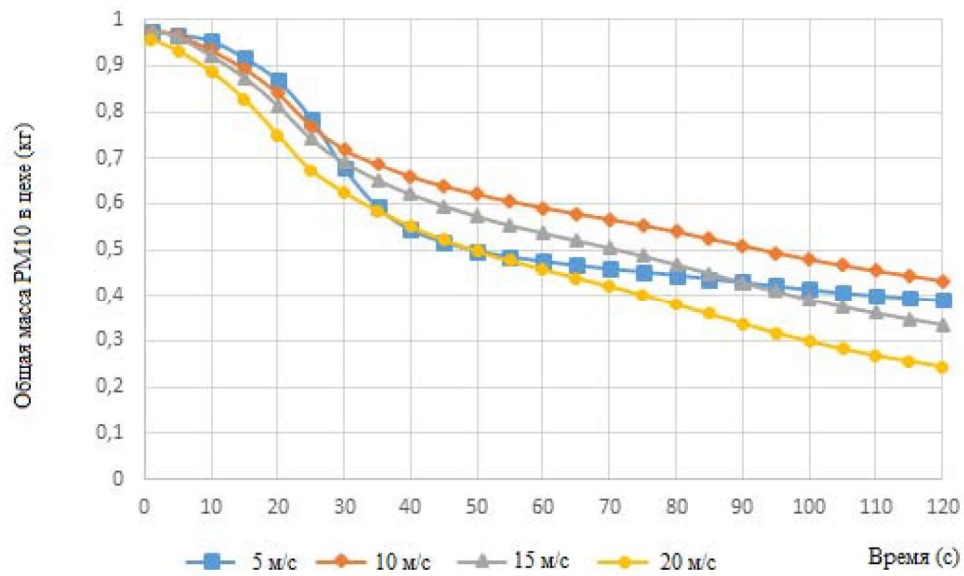


Рис. 6. Изменение общей массы PM10 в цехе

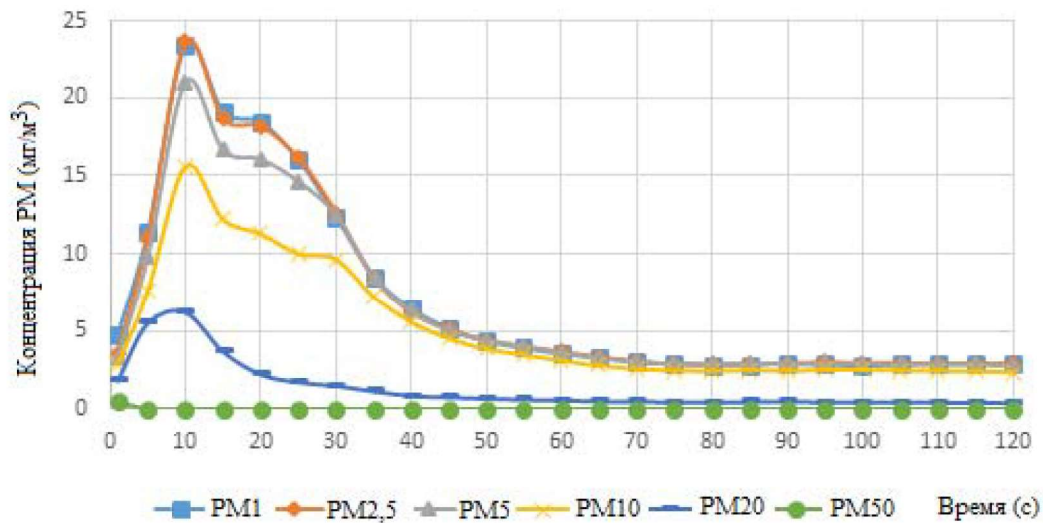


Рис. 7. Изменение концентрации PM в рабочей зоне

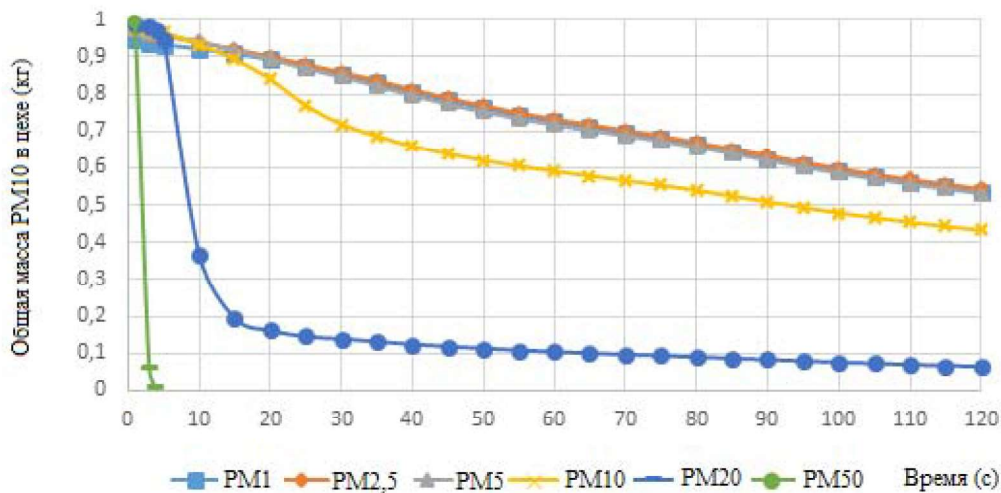


Рис. 8. Изменение общей массы PM в цехе

50 мкм под влиянием силы тяжести оседают на поверхностях в течение 5 с, их концентрация в воздухе рабочей зоны за это время снижается практически до нуля. Частицы с размером 20 мкм также быстро удаляются из рабочей среды, при этом их концентрация уменьшается на 80 % за 15 с. Однако частицы размером менее 10 мкм (PM10, PM5, PM2.5, PM1) слабо подвержены влиянию сил гравитации, и их трудно удалить из воздуха помещения без применения электрических, магнитных или других физических полей. За 30 с удаляется 30 % PM10 и 15 % PM5, PM2.5,

PM1. Эти частицы могут попасть в легкие через дыхательные пути и являются наиболее опасными для человеческого организма. Для их удаления могут быть использованы системы вакуумной пылеборки [21].

Частицы сварочного аэрозоля представляют собой сотовые пористые структуры, содержащие множество мелких пор внутри. Пористость обычно используется в качестве косвенного показателя объема, занимаемого пустотами внутри частиц. В данном исследовании рассмотрены четыре различные величины пористости частицы с размером

10 мкм с пористостью 75, 50, 25 и 0 %, что соответствует плотности 1/4, 1/2, 3/4 и 1 от плотности стандартных частиц Fe_2O_3 . Как и в предыдущем эксперименте, частицы равномерно распылялись в рабочей зоне цеха на уровне 0,5 м от пола, скорость приточного воздуха 10 м/с. Влияние пористости на характеристики движения твердых частиц анализировалось путем наблюдения за массой общего количества твердых частиц в рабочей зоне цеха.

Результаты показаны на рис. 9 и 10, они позволяют сделать вывод, что чем больше пористость, тем труднее удалить частицы РМ10. Причина этого явления заключается в том, что чем выше пористость, тем меньше

плотность частиц, чем меньше плотность, тем труднее обеспечить осаждение частиц. Но для частиц размером менее 10 мкм пористость практически не влияет на эффект удаления частиц (см. рис. 10). Разница между эффектом удаления частиц РМ10 с пористостью 75 и 0 % находится в пределах 10 %, поэтому влияние пористости можно не учитывать при проектировании систем местной вентиляции.

Выводы

Результаты численного моделирования доказывают, что использование нового воздухораспределителя с вращающимися решетками обеспечивает за 60 с поворот каждого потока приточного воздуха на угол 60° ,

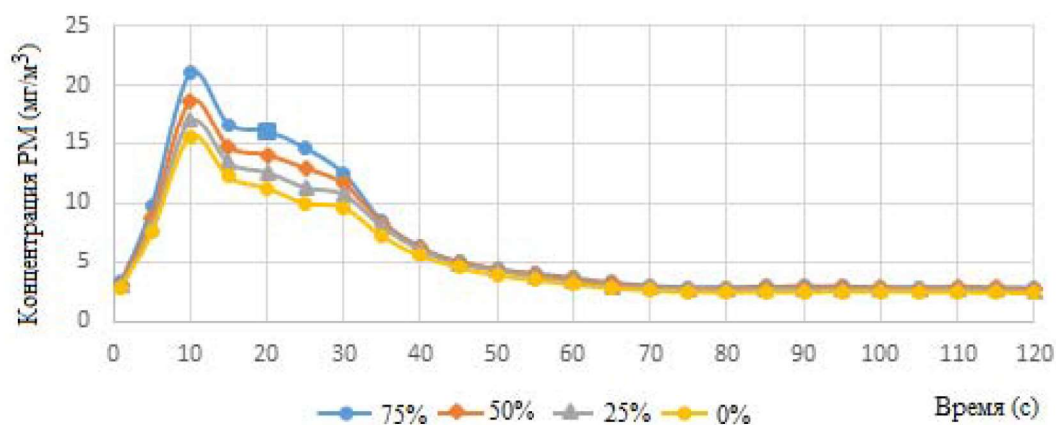


Рис. 9. Изменение концентрации РМ в рабочей зоне

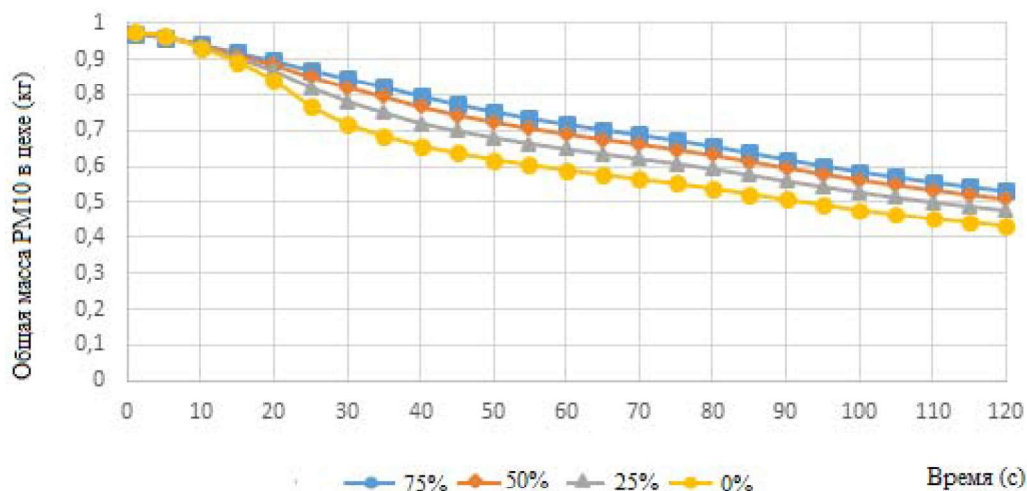


Рис. 10. Изменение общей массы РМ в цехе

что создает равномерное распределение воздушного потока.

Оценка эффективности удаления из рабочей зоны помещения сварочного аэрозоля с частицами размерами от 1 до 50 мкм при различных скоростях подачи воздуха показывает, что увеличение скорости подачи воздуха способствует снижению концентрации твердых частиц в рабочей зоне. Получено рациональное значение скорости подачи воздуха 10 м/с, соответствующее технологическим требованиям выполнения сварочных работ.

Установлено, что разница между эффектом удаления частиц PM10 с пористостью 75 и 0 % находится в пределах 10 %, таким образом, влиянием пористости частиц можно пренебречь.

Для снижения концентрации вредных веществ в период технологических перерывов рекомендуется организовать усиленное проветривание помещения при скорости воздуха до 20 м/с.

Практическая значимость исследования заключается в разработке технических решений, повышающих надежность и эффективность систем вентиляции сварочных цехов больших объемов. Полученные данные могут быть использованы при проектировании систем вентиляции.

Библиографический список

1. Wang Y.-F., Kuo Y.-C., Wang L.-C. Long-term metal fume exposure assessment of workers in a shipbuilding factory // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. 790.
2. Kim D., Kim A. R., Kim H. et al. Nickel dust-induced occupational contact dermatitis by welding and grinding work in shipyard workers: a report of nine cases // *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. 2022. Vol. 34. e7.
3. Шантала В. В., Хукаленко Е. Е., Северин Н. Н., Гусев Ю. М. Устройства и процессы вентиляции при выполнении электросварочных работ // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2020. № 9. С. 21–29. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-9-21-29.
4. Grahn K., Gustavsson P., Andersson T., et al. Occupational exposure to particles and increased risk of developing chronic obstructive pulmonary disease (COPD): A population-based cohort study in Stockholm, Sweden // *Environmental Research*. 2021. Vol. 200. 111739.
5. Борскивер И. А. Воздействие сварочного аэрозоля на организм электросварщика (ручная дуговая сварка). Рекомендации по измерению // *Безопасность и охрана труда*. 2016. № 4 (69). С. 67–70.
6. Cediel-Ulloa A., Isaxon C., Eriksson A., et al. Toxicity of stainless and mild steel particles generated from gas-metal arc welding in primary human small airway epithelial cells // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. 21846.
7. Месхи Б. Ч., Корончик Д. А., Булыгин Ю. И., Черевань Ю. С., Стрекоз М. Н. Экспериментальные исследования состояния качества воздуха рабочей зоны сварщика при работе в полукрытых пространствах ограниченного объема // *Безопасность техногенных и природных систем*. 2017. № 1. С. 4–17.
8. Корончик Д. А., Булыгин Ю. И., Рогозин Д. В., Гайденко А. Л., Легконогих А. Н. Методология и принципы поиска решений, обеспечения безопасности работы сварщиков в стесненных условиях и на труднодоступных объектах // *Вестник Донского гос. техн. ун-та*. 2016. Т. 16, № 3 (86). С. 141–147.
9. Борисов А. А. Распределение сварочного аэрозоля в воздухе арматурного цеха завода ЖБИ // *Альманах современной науки и образования*. 2012. № 7 (62). С. 19–23.
10. Гримитлин А. М., Позин Г. М. Вентиляция и отопление судостроительных производств // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 6 (41). С. 7–11.
11. Уляшева В. М., Анисимов С. М., Шамколович А. Н. Численное моделирование вентиляционных процессов в сварочном цехе // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 3 (74). С. 118–124.
12. Писаренко В. Л., Рогинский М. Л. Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве. М.: Машиностроение, 1981. 120 с.
13. Кожухова Н. А., Трофимчук С. Н., Сайфуллин Т. И. Численное моделирование процессов распространения вредных веществ при проведении сварочных работ в производственном помещении с общеобменной и местной вентиляцией // *Medline.ru. Российский биомедицинский журнал*. 2020. Т. 21. С. 1106–1114.
14. Месхи Б. Ч., Булыгин Ю. И., Легконогих А. Н., Гайденко А. Л. Математическое и компьютерное моделирование формирования параметров производственной среды в целях проектирования и оптимизации систем вентиляции помещений // *Вестник Донского гос. техн. ун-та*. 2014. Т. 14, № 2 (77). С. 46–55.
15. Турубаев Р. Р., Шваб А. В. Численное исследование аэродинамики закрученного потока в вихревой

камере комбинированного пневматического аппарата // Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2017. № 47. С. 87–98.

16. Морозов И. И., Ляскин А. С. Введение в численные методы вычислительной газодинамики. Самара: СГАУ, 2010. 60 с.

17. Хазбулатов А. И. Выбор оптимальных параметров прямоточно-центробежного сепаратора для очистки газа от механических примесей: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2013. 166 с.

18. Черняков Е. В. Влияние скорости приточного воздуха на перенос и удаление аэрозольных загрязнений из рабочей зоны // Технология чистоты. 2013. № 4. С. 23–27.

19. Chen X., Li A., Gao R. Effects of near-wall heat source on particle deposition // Building Simulation. 2012. № 5 (4). Pp. 371–382.

20. Shimada M., Okuyama K., Kousaka Y., et al. Turbulent and Brownian diffusive deposition of aerosol particles onto a rough wall // Journal of chemical engineering of Japan. 1987. № 20 (1). Pp. 57–64.

21. Васильев В. Ф., Мартынова А. Ю., Суханова И. И., Уляшева В. М. Совершенствование методов расчета вентиляции предприятий по производству строительных материалов. СПб.: СПбГАСУ, 2019. 259 с.

References

1. Wang Y.-F., Kuo Y.-C., Wang L.-C. Long-term metal fume exposure assessment of workers in a shipbuilding factory. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, 790.

2. Kim D., et al. Nickel dust-induced occupational contact dermatitis by welding and grinding work in shipyard workers: a report of nine cases. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 2022, vol. 34, e7.

3. Shaptala V. V., Khukalenko E. E., Severin N. N., Gusev Yu. M. *Ustroystva i protsessy ventilyatsii pri vypolnenii elektrosvarochnykh rabot* [Devices and processes of ventilation during electric welding works]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2020, no. 9, pp. 21–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-9-21-29.

4. Grahn K., et al. Occupational exposure to particles and increased risk of developing chronic obstructive pulmonary disease (COPD): A population-based cohort study in Stockholm, Sweden. *Environmental Research*, 2021, vol. 200, 111739.

5. Borskiver I. A. *Vozdeystvie svarochnogo aerolya na organizm elektrosvarshchika (ruchnaya dugovaya svarka). Rekomendatsii po izmereniyu* [Impact of welding aerosol on the health of the electric welder (at manually performed welding). Recommendations for measurement].

Bezopasnost' i okhrana truda – Occupational Safety and Health, 2016, no. 4 (69), pp. 67–70.

6. Cediell-Ulloa A., et al. Toxicity of stainless and mild steel particles generated from gas–metal arc welding in primary human small airway epithelial cells. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, 21846.

7. Meskhi B. Ch., et al. *Eksperimental'nye issledovaniya sostoyaniya kachestva vozdukhа rabochey zony svarshchika pri rabote v poluotkrytykh prostranstvakh ogranichennogo ob'yoma* [Experimental studies of the air quality of the working zone of the welder when working in semi-open spaces of limited volume]. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh sistem – Safety of Technogenic and Natural Systems*, 2017, no. 1, pp. 4–17.

8. Koronchik D. A., et al. *Metodologiya i printsipy poiska resheniy, obespecheniya bezopasnosti raboty svarshchikov v stesnyonnykh usloviyakh i na trudnodostupnykh ob'ektakh* [Methodology and principles of solution search, ensuring the safety of welders' work in confined spaces and at hard-to-reach objects]. *Vestnik Donskogo gos. tekhn. un-ta – Bulletin of Don State Technical University*, 2016, vol. 16, no. 3 (86), pp. 141–147.

9. Borisov A. A. *Raspredelenie svarochnogo aerolya v vozdukhе armaturnogo tsekha zavoda ZhBI* [Distribution of welding aerosol in the air of the reinforcement shop of the reinforced concrete products plant]. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya – Almanac of Modern Science and Education*, 2012, no. 7 (62), pp. 19–23.

10. Grititlin A. M., Pozin G. M. *Ventilyatsiya i otoplenie sudostroitel'nykh proizvodstv* [Ventilation and heating of shipbuilding enterprises]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering and Construction Journal*, 2013, no. 6 (41), pp. 7–11.

11. Ulyasheva V. M., Anisimov S. M., Shamkolovich A. N. *Chislennoe modelirovanie ventilyatsionnykh protsessov v svarochnom tsekhe* [Numerical modeling of ventilation processes in a welding shop]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 3 (74), pp. 118–124.

12. Pisarenko V. L., Roginskiy M. L. *Ventilyatsiya rabochikh mest v svarochnom proizvodstve* [Ventilation of workplaces in welding production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 120 p.

13. Kozhukhova N. A., Trofimchuk S. N., Sayfullin T. I. *Chislennoe modelirovanie protsessov rasprostraneniya vrednykh veshchestv pri provedenii svarochnykh rabot v proizvodstvennom pomeshchenii s obshcheobmennoy i mestnoy ventilyatsiey* [Numerical modeling of processes of spreading harmful substances during welding works in production premises with general and local ventilation]. *Medline.ru. Rossiyskiy biomeditsinskiy zhurnal – Medline.ru. Russian Biomedical Journal*, 2020, vol. 21, pp. 1106–1114.

14. Meskhi B. Ch., Bulygin Yu. I., Legkonogikh A. N., Gaydenko A. L. *Matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie formirovaniya parametrov proizvodstvennoy sredy v tselyakh proektirovaniya i optimizatsii sistem ventilyatsii pomeshcheniy* [Mathematical and computer modeling of formation of industrial environment parameters for design and optimization of ventilation systems of premises]. *Vestnik Donskogo gos. tekhn. un-ta – Bulletin of the Don State Technical University*, 2014, vol. 14, no. 2 (77), pp. 46–55.

15. Turubaev R. R., Shvab A. V. *Chislennoe issledovanie aerodinamiki zakruchennogo potoka v vikhrevoy kamere kombinirovannogo pnevmaticheskogo apparata* [Numerical study of aerodynamics of the swirled flow in the vortex chamber of the combined pneumatic apparatus]. *Vestnik Tomskogo gos. un-ta. Matematika i mekhanika – Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics*, 2017, no. 47, pp. 87–98.

16. Morozov I. I., Lyaskin A. S. *Vvedenie v chislennyye metody vychislitel'noy gazodinamiki* [Introduction to numerical methods of computational gas dynamics]. Samara, SGAU, 2010, 60 p.

17. Khazbulatov A. I. *Vybor optimal'nykh parametrov pryamotokhno-tsentrobezhnogo separatora dlya ochistki*

gaza ot mekhanicheskikh primesey. Diss. kand. tekhn. nauk [Selection of optimal parameters of a direct-flow centrifugal separator for gas purification from mechanical impurities. PhD in Sci. Tech. diss.]. Kazan', 2013, 166 p.

18. Chernyakov E. V. *Vliyanie skorosti pritochnogo vozdukh na perenos i udalenie aerazol'nykh zagryazneniy iz rabochey zony* [Influence of the supply air velocity on the transfer and removal of aerosol contaminants from the working area]. *Tekhnologiya chistoty – Technology of Purification*, 2013, no. 4, pp. 23–27.

19. Chen X., Li A., Gao R. Effects of near-wall heat source on particle deposition. *Building Simulation*, 2012, no. 5 (4), pp. 371–382.

20. Shimada M., et al. Turbulent and Brownian diffusive deposition of aerosol particles onto a rough wall. *Journal of chemical engineering of Japan*, 1987, no. 20 (1), pp. 57–64.

21. Vasil'ev V. F., Mart'yanova A. Yu., Sukhanova I. I., Ulyasheva V. M. *Sovershenstvovanie metodov rascheta ventilyatsii predpriyatiy po proizvodstvu stroitel'nykh materialov* [Improvement of ventilation calculation methods of enterprises producing construction materials]. St. Petersburg, SPbGASU, 2019, 259 p.