УДК 697.921.4:51-74:697.92

© В. М. Уляшева, д-р техн. наук, профессор
© С. М. Анисимов, д-р техн. наук, профессор
© А. Н. Шамколович, магистрант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: ulyashevavm@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-3-118-124

© V. M. Ulyasheva, Dr. Sci. Tech., Professor
© S. M. Anisimov, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. N. Shamkolovich, undergraduate
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: ulyashevavm@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СВАРОЧНОМ ЦЕХЕ

NUMERICAL SIMULATION OF VENTILATION PROCESSES IN THE WELDING SHOP

Объектом исследования является сварочный цех, в котором используется ручная и полуавтоматическая сварка при отсутствии фиксированных рабочих мест. Представлены результаты численных исследований распределения параметров воздуха в сварочном цехе, оборудованном общеобменной вентиляцией. Расчеты выполнены для теплого периода года. Постоянными приняты количество и места размещения приточных и вытяжных устройств, варьировался угол подачи приточного воздуха. Приведены поля температуры, скорости движения воздуха и концентраций загрязняющих веществ, таких как оксиды марганца, алюминия, азота и углерода. В результате анализа инженерных и численных расчетов выполнено обоснование выбора расчетной схемы организации воздухообмена и воздухораспределения, определены параметры приточного воздуха.

Ключевые слова: численное моделирование, сварочный цех, общеобменная вентиляция, загрязняющие вещества.

The object of the study is the welding shop, where manual and semi-automatic welding is used and there are no fixed working places. The authors present the results of numerical research of the distribution of the air parameters in the welding shop equipped with general forced ventilation. Calculations are made for the warm period of the year. The number and locations of supply and exhaust devices were accepted as constant, the angle of supply of supply air varied. The fields of temperature, air motion velocities and concentrations of pollutants such as manganese, aluminum, nitrogen and carbon oxides are considered. As a result of the analysis of engineering and numerical calculations, substantiation of the selection of the design scheme for the organization of the air exchange and air distribution is presented, and the parameters of the incoming air are determined.

Keywords: numerical simulation, welding shop, general forced ventilation, pollutants.

Сварочное производство в зависимости от вида сварочных работ характеризуется выделением значительного количества различных вредных веществ, среди которых можно отметить оксиды марганца, азота, углерода и алюминия, озон, фтористые соединения [1]. Известно, что одним из важнейших факторов, обеспечивающих санитарно-гигиенические условия¹ в сварочном цехе [2–4], является организация

эффективного воздухообмена². Исследованиям состояния воздушной среды при выполнении сварочных работ посвящено значительное количество работ, в частности отечественных³ [1–11] и зарубежных⁴ [13, 14] специалистов. Теоретические положения организации воздухообмена

¹ СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 01.10.1996 № 21, введен в действие с 01.10.1996. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1996. 12 с.

² СП 60.13330.2016. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Введ. 17.06.2017. М.: Минрегион России, 2017. 81 с.

³ Рекомендации по проектированию отопления и вентиляции заготовительных и сборочно-сварочных цехов АЗ-499. Производственно-практическое издание / Главпромстройпроект, Союзсантахпроект. М., 1972. 24 с.

⁴ Controlling Hazardous Fume and Gases during Welding. URL: https://www.osha.gov/Publications/OSHA_FS-3647_Welding.pdf

и воздухораспределения заложены учеными Ленинградского института охраны труда ВЦСПС М. И. Гримитлиным, Г. М. Позиным и другими в цикле работ по отоплению и вентиляции машиностроительных и судостроительных заводов [3–7], в дальнейшем эти положения были развиты, в частности, в работах А. М. Гримитлина. Результаты экспериментальных работ представлены, например, в работах [1, 9]. При проектировании систем вентиляции и отопления могут быть использованы рекомендации^{5,6} [10–11, 13–14], устройств очистки от вредных выделений при сварке — данные работ [8, 9]. Основным средством борьбы с газовойдыделениями и сварочными аэрозолями (пылью) является локализация вредных выделений в зоне их образования с помощью местных систем вентиляции. Однако во многих случаях при сварке крупногабаритных изделий, отсутствии фиксированных мест сварки и т. п. используется общеобменная вентиляция, которая требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат. Для таких систем крайне важно выявление наиболее рациональной схемы организации воздухообмена [14].

Объектом исследования является сварочный цех, в котором используется ручная и полуавтоматическая сварка при отсутствии фиксированных рабочих мест.

Доля такой сварки на ремонтных предприятиях нефтегазодобывающей отрасли составляет до 80 % общего объема сварочных работ [9].

Отсутствие подробных исходных данных зачастую не позволяет проектировать системы обеспечения микроклимата в соответствии с особенностями технологических процессов. Сложность физических явлений, протекающих при выполнении сварочных работ, связана, помимо наличия технологического оборудования и значительного количества выделяющихся вредных (примесей), с турбулентностью воздушных потоков. В настоящее время разработан ряд прикладных гидродинамических программных комплексов, использование которых позволяет провести численное моделирование различных физических процессов. Исходя из вышеизло-

женного в данной работе предпринята попытка использовать численный эксперимент, широко распространенный в современных исследованиях различных физических процессов [12].

Для изучения полей концентраций загрязняющих веществ, выделяющихся при сварочных работах в помещении цеха, использован метод численного моделирования процессов циркуляции воздушных потоков и переноса примесей с помощью программы Star-CCM+, на основе решения систем дифференциальных уравнений Навье–Стокса в осреднении Рейнольдса, неразрывности, а также уравнений переноса примесей и теплоты, описывающих исследуемые процессы. Граничные условия — это характеристики приточных и вытяжных отверстий, потоки теплоты и вредных веществ от зоны сварки. В качестве модели турбулентности принята стандартная k – ϵ модель турбулентности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i + \bar{\rho}' u_i') &= S_m; \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) &= - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + S_i; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a} u_i)}{\partial x_j} &= - \frac{\partial (\bar{\rho} u_i' a')}{\partial x_j} + \bar{J}_a, \end{aligned} \quad (1)$$

где t — время; ρ — плотность; μ — коэффициент динамической вязкости; $\bar{u}_j$ — компоненты вектора осредненной скорости по осям координат; τ'_{ij} — турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса); u_i' , u_j' , T' , C' — локальные пульсации скорости, температуры и примеси потока; $\bar{a}$ — осредненные значения удельной плотности скалярной величины; S_m , S_i — интенсивность источников массы и импульса; $\bar{J}_a$ — интенсивность источников примеси.

На рис. 1 приведена трехмерная модель сварочного цеха размерами 36,0×11,7×7,5 м. В модели помещения указано место установки приточных устройств типа ВГК и вытяжных устройств (крышные вентиляторы ТКК960С1). Также указаны зоны сварки размерами 5,0×2,0×2,0 м. Принято, что в помещении одновременно работают четыре сварочных аппарата. Теплопоступление от каждого из них составляет $Q = 10\,000$ Вт. Удельный поток тепла зоны сварки 258,1 Вт/м². В расчет приняты данные для теплого периода. Приточный воздух подается в помещение на

⁵ Рекомендации по проектированию отопления и вентиляции заготовительных и сборочно-сварочных цехов АЗ-499.

⁶ Protecting Welders From Dangerous Weld Fumes with Welding Booth Ventilation. URL: https://www.osha.gov/Publications/OSHA_FS-3647_Welding.pdf

Рис. 1. 3D-модель помещения сварочного цеха: 1 — приточные устройства; 2 — вытяжные устройства; 3 — зона сварки

выходе из воздухораспределителя со скоростью 9,2 м/с и температурой 18,9 °С. Температура вытяжного воздуха 27 °С.

Рассмотрено три варианта подачи воздуха. В первом варианте подача осуществляется под углом 90°, во втором — под углом 45°, в третьем — 20°.

При построении геометрической модели цеха применена базовая кубическая ячейка (длина ребра 0,05 м). В области приточных и вытяжных отверстий, а также в зоне сварки и вблизи внутренней поверхности стен в помещении выполнено сгущение расчетной сетки. Количество ячеек в расчетной сетке составляет 1 113 312.

В процессе расчета приняты постоянными количество и места размещения приточных и вытяжных устройств, варьировался угол подачи приточного воздуха с целью выбора наиболее рационального, исходя из требований обеспечения нормируемых параметров микроклимата^{7,8}. Параметры микроклимата помещения выбраны в зависимости от категории тяжести выполняемых работ⁹.

При проведении численного расчета выполнена оценка сходимости. Расчет считался законченным при достижении стационарности отслеживаемых параметров.

⁷ СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

⁸ ГН 2.2.5.3532–18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ № 25 от 13.02.2018.

⁹ СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

На рис. 2 приведены результаты численного эксперимента полей распределения скорости воздуха. Из полученных результатов можно сделать вывод, что при подаче под углом 90° почти весь объем приточного воздуха попадает в зону всасывания вытяжных устройств (рис. 2, а). Наиболее целесообразным способом подачи с точки зрения распределения скорости движения воздуха можно считать вариант на рис. 2, в.

На рис. 3 приведены температурные поля, диапазон изменения температуры составляет от 18,9 до 25 °С, что связано с выделением теплоты при проведении сварочных работ. Наиболее рациональным также является вариант при подаче воздуха под углом 20°.

В результате расчета были получены поля распределения концентраций: марганца и его соединений (рис. 4), оксида углерода (рис. 5) и оксида алюминия (рис. 6). Концентрации всех исследуемых вредных веществ при углах подачи 90° и 45° на уровне рабочей зоны превышают ПДК¹⁰ и только при угле подачи 20° соответствуют требованиям нормативного документа.

Данные, полученные в результате расчета температуры и скорости воздуха, а также концентрации загрязняющих веществ по рабочей зоне приведены в таблице в виде диапазона значений в сравнении с ПДК.

Выводы

1. По результатам расчетов может быть сделан вывод, что из всех рассмотренных вариан-

¹⁰ ГН 2.2.5.3532–18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

Рис. 2. Поля скоростей движения воздуха в сечениях (плоскости XZ, Y = 8,9 м) при подаче воздуха под углом: а — 90°; б — 45°; в — 20°

Рис. 3. Температурные поля в сечениях (плоскости XZ, Y = 8,9 м) при подаче воздуха под углом: а — 90°; б — 45°; в — 20°

тов подачи приточного воздуха наиболее рациональным является вариант с углом подачи воздуха 20°.

2. Для уточнения целесообразности использования способа подачи воздуха необходимо

выполнить численный эксперимент по другим вредным веществам, а также для холодного периода года при использовании системы приточной вентиляции в режиме воздушного отопления.

Рис. 4. Поле распределения концентрации марганца и его соединений в сечениях (плоскости XZ, Y = 8,9 м) при подаче воздуха под углом: а — 90°; б — 45°; в — 20°

Рис. 5. Поле распределения концентрации оксида углерода (плоскости XZ, Y = 8,9 м) при подаче воздуха под углом: а — 90°; б — 45°; в — 20°

Библиографический список

1. Борисов А. А. Распределение сварочного аэрозоля в воздухе арматурного цеха завода ЖБИ // Грамота. 2011. № 7. С. 19–23.
2. Гримитлин А. М., Знаменский Р. Б., Крупкин Г. Я., Луканина М. А. Исследование подавления и локали-

зации конвективных потоков от тепловыделяющего технологического оборудования с использованием метода математического моделирования // Инженерные системы. 2011. № 2. С. 36–40.

3. Гримитлин А. М., Позин Г. М. Вентиляция и отопление судостроительных производств // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 6. С. 7–11.

Рис. 6. Поле распределения концентрации оксида алюминия (плоскости XZ, Y = 8,9 м) при подаче воздуха под углом: а — 90°; б — 45°; в — 20°

Результаты численного расчета параметров воздуха рабочей зоны

Подача воздуха под углом	Скорость воздуха в рабочей зоне v , м/с	Температура t , °C	Концентрация вредных веществ/ПДК, мг/м³		
			Соединения марганца	Оксид углерода	Оксид алюминия
90°	0,0–0,6	22,9–25,0	0,105–0,12/0,1	10–30/20	1,5–8,0/6
45°	0,0–5,0	22,2–25,0	0,09–0,105/0,1	4,5–23/20	0,5–7,2/6
20°	0,0–5,0	21,5–25,0	0,075–0,09/0,1	0,5–6,0/20	0,1–5,5/6

4. Гримитлин М. И. Вентиляция и отопление цехов машиностроительных заводов. М.: Машиностроение, 1978. 272 с.

5. Гримитлин М. И., Тимофеева О. Н., Эльтерман Е. М., Эльянов Л. С. Вентиляция и отопление цехов судостроительных заводов. Л.: Судостроение, 1978. 240 с.

6. Гримитлин М. И., Забавский А. Н., Позин Г. М. Вентиляция и отопление судостроительных цехов. Л.: ВНИИ охраны труда ВЦСПС в Ленинграде, 1981. 105 с.

7. Гримитлин М. И., Позин Г. М., Тимофеева О. Н. Вентиляция и отопление цехов машиностроительных предприятий. М.: Машиностроение, 1993. 288 с.

8. Маринина О. Н., Сидякин П. А., Нестерчук А. В., Алексенко Д. Н. Улавливание твердых частиц сварочного аэрозоля разработанным сорбционно-

фильтрующим материалом // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 183.

9. Писаренко В. Л., Рогинский М. Л. Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве. М.: Машиностроение, 1981. 120 с.

10. Полушкин В. И., Анисимов С. М., Васильев В. Ф. и др. Аэродинамика вентиляции / под ред. В. И. Полушкина. М.: Издательский центр «Академия», 2013. 208 с.

11. Торговников Б. М., Табачник В. Е., Ефанов Е. М. Проектирование промышленной вентиляции. Киев: Будівельник, 1983. 256 с.

12. Уляшева В. М., Гримитлин А. М., Черников Н. А. Повышение эффективности способов очистки вентиляционных выбросов на предприятиях строительной индустрии // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 4. С. 92–98.

13. Howell B. A welding ventilation overview // The Fabricator. 2015. September. URL: <https://www.thefabricator.com/article/safety/a-welding-ventilation-overview>.

14. Könnig M. Dimensioning of workshop ventilation: What welding companies need to know before installation. URL: <https://safe-welding.com/dimensioning-of-workshop-ventilation-what-welding-companies-need-to-know-before-installation>.

References

1. Borisov A. A. *Raspreделение svarochnogo aehrozolya v vozdukh armaturnogo tsekha zavoda ZhBI* [Distribution of the welding fumes in the air valve factory shop ZHBI]. *Gramota – Diploma*, 2011, no. 7, pp. 19–23.

2. Grititlin A. M., Znamenskiy R. B., Krupkin G. Ya., Lukanina M. A. *Issledovanie podavleniya i lokalizatsii konvektivnykh potokov ot teplovyydelyayushchego tekhnologicheskogo oborudovaniya s ispol'zovaniem metoda matematicheskogo modelirovaniya* [The study of the suppression and containment of the convective flows from heat-generating process equipment using the method of mathematical modeling]. *Inzhenernye sistemy – Engineering Systems*, 2011, no. 2, pp. 36–40.

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

4. Grititlin M. I. *Ventilyatsiya i otoplenie tsekhov mashinostroitel'nykh zavodov* [Ventilation and heating of shops of machine-building plants]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 272 p.

5. Grititlin M. I., Timofeeva O. N., Ehl'terman E. M., Ehl'yanov L. S. *Ventilyatsiya i otoplenie tsekhov sudostroitel'nykh zavodov* [Ventilation and heating of shipbuilding plants]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978, 240 p.

6. Grititlin M. I., Zabavskiy A. N., Pozin G. M. *Ventilyatsiya i otoplenie sudostroitel'nykh tsekhov*

[Ventilation and heating of shipyard shops]. Leningrad, VNII okhrany truda VTsSPS Publ., 1981, 105 p.

7. Grititlin M. I., Pozin G. M., Timofeeva O. N. *Ventilyatsiya i otoplenie tsekhov mashinostroitel'nykh predpriyatiy* [Ventilation and heating of shops of machine-building enterprises]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 288 p.

8. Marinina O. N., Sidyakin P. A., Nesterchuk A. V., Aleksenko D. N. *Ulavlivanie tverdykh chastits svarochnogo aehrozolya razrabotannym sorbtsionno-fil'truyushchim materialom* [Catching of welding solid particles by sorption-filtering aerosol material]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2014, no. 5, 183 p.

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

10. Polushkin V. I., et al. *Aerodinamika ventilyatsii* [Aerodynamics of ventilation]. Ed. by Polushkin V. I. Moscow, Akademiya Publ., 2013, 208 p.

11. Torgovnikov B. M., Tabachnik V. E., Efanov E. M. *Proektirovanie promyshlennoy ventilyatsii* [Design of industrial ventilation]. Kiev, Budivelnik Publ., 1983, 256 p.

12. Ulyasheva V. M., Grititlin A. M., Chernikov N. A. *Povyshenie ehffektivnosti sposobov ochistki ventilyatsionnykh vybrosov na predpriyatiyakh stroitel'noy industrii* [Improving the efficiency of methods for processing ventilation emissions in the construction industry enterprises]. *Voda i ehkologiya: problemy i resheniya – Water and ecology: problems and solutions*, 2018, no. 4, pp. 92–98.

13. Howell B. A welding ventilation overview. *The Fabricator*, 2015, Sept. Available at: <https://www.thefabricator.com/article/safety/a-welding-ventilation-overview>.

14. Könnig M. *Dimensioning of workshop ventilation: What welding companies need to know before installation*. Available at: <https://safe-welding.com/dimensioning-of-workshop-ventilation-what-welding-companies-need-to-know-before-installation>