

ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО, ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 004.94

DOI 10.12737/4545

Математическое и компьютерное моделирование формирования параметров производственной среды в целях проектирования и оптимизации систем вентиляции помещений*

Б. Ч. Месхи, Ю. И. Булыгин, А. Н. Легконогих, А. Л. Гайдено

Выявлены доминирующие опасные и вредные производственные факторы на участках сварки. Это повышенная загазованность и запылённость. В зависимости от вида сварки концентрации вредных веществ (угарный газ, оксиды железа и магния) превышают санитарно-гигиенические нормы в 7–10 раз. Рассмотрен тепломассоперенос вредных примесей и теплоты в производственной среде с активной вентиляцией и источниками загрязнения. Представлена его нестационарная трёхмерная математическая модель. Она учитывает завихрения газовоздушных потоков, и этим отличается от существующих моделей распространения производственных вредностей. Разработанное программное обеспечение (ПО) позволяет решать различные задачи установки и эксплуатации вентиляционной системы. В частности, речь идёт о рациональном размещении различных технических устройств данной системы, проблемах управления ею и об оптимальном расположении рабочих мест. Для обеспечения безопасных условий труда операторов сварочных производств разработаны рекомендации по рациональной организации работы систем местной вентиляции. Предложены соответствующие конструктивные решения.

Ключевые слова: производственная среда, моделирование, расчёт, вентиляция, опасные и вредные производственные факторы, загазованность, микроклимат, условия труда.

Введение. Определение параметров состояния производственной среды в помещениях с активной вентиляцией является актуальной технической задачей в области обеспечения комфортных условий труда работников различных отраслей промышленности. Важное значение имеют вопросы рационального размещения в производственных помещениях технических устройств, образующих вентиляционную систему, проблемы управления ею, а также оптимальное расположение рабочих мест. При этом следует учитывать большое число разнообразных источников тепла, загрязняющих примесей, устройств воздухообмена.

Постановка задачи. Особую актуальность данная задача приобретает на крупных промышленных предприятиях — с металлургическими печами, прокатными станами, сварочными постами, гальваническими и химическими производствами. Для решения задач проектирования и оптимизации системы вентиляции таких помещений необходимо использовать численное моделирование сложных трёхмерных нестационарных процессов тепломассопереноса производственных вредностей [1–2].

Математическая модель. Авторами рассмотрен тепломассоперенос вредных примесей и теплоты в производственной среде с активной вентиляцией и источниками загрязнения. Предложена его нестационарная трёхмерная математическая модель. Она отличается от существующих моделей распространения производственных вредностей тем, что позволяет учитывать завихрения газовоздушных потоков, а источники загрязнения рассматривает не как точечные экспоненциальные, а как «детализированные» (учитывается геометрическое положение источника, его размеры,

* Работа по теме № 1.1.12 «Разработка фундаментальных основ методологии математического моделирования формирования опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ)» проведена в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России в части НИР.

направление выхода газов, вектор скорости, многокомпонентность выброса вредного вещества и его температура) [3–5]. Математическая модель применима к различным объектам и позволяет определять параметры не только воздушной среды в производственных помещениях на удалении от источников загрязнения, но и в зонах больших скоростей воздуха — у местных отсосов и вблизи воздухораспределительных систем.

Основными уравнениями (1) — (3) являются: уравнение неразрывности (сохранения массы), импульса и переноса энергии (теплоты) [6]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i; \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i H)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \epsilon + S_i u_i + Q_H; \quad (3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2}; \quad (4)$$

здесь t — текущее время, с; x_i — i -я пространственная координата, м; u_i — скорость потока в направлении x_i , м/с; ρ — плотность, кг/м³; p — давление среды, Па; H — удельная энергия, Дж/кг; $S_i = -\rho \cdot g_i$ — гравитационная компонента, кг/м²с²; h — энтальпия, Дж/кг; Q_H — объёмная интенсивность источника теплоты, Вт/м³; τ_{jk} — тензор напряжения вязкого сдвига; ϵ — скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, м²/с³; q_i — изменение теплоты.

Для определения полей концентраций компонентов смеси в воздушной среде решается уравнение конвективно-диффузионного переноса вещества (5):

$$\frac{\partial(\rho y_m)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i y_m) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(D_{mm} + D_{mm}^t) \frac{\partial y_m}{\partial x_i} \right] + S_m, \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (5)$$

где D_{mn}, D_{mn}^t — молекулярные и турбулентные матрицы диффузии m -го компонента в n -ю среду, м²/с; S_m — интенсивность выделения в n -ю среду m -го компонента вещества, г/с.

Перенос кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации турбулентной энергии учтены двумя дополнительными уравнениями (6) и (7):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k; \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + S_\epsilon; \quad (7)$$

здесь характеристики S_k и S_ϵ определяются из выражений (8), (9):

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \mu_t P_B; \quad (8)$$

$$S_\epsilon = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k}; \quad (9)$$

здесь μ — коэффициент динамической вязкости, кг/м·с; μ_t — коэффициент турбулентной динамической вязкости, кг/м·с; k — турбулентная кинетическая энергия (в случае ламинарных потоков $k = 0$), м²/с². P_B — величина, учитывающая влияние сил плавучести на турбулентное течение:

$P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$, где g_i — величина гравитационного ускорения (м/с^2) в направлении координаты x_i . Константа $\sigma_B = 0,9$. Константа $C_B = 1$, когда $P_B > 0$, и 0 в противном случае: $f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu}\right)^3$, $f_2 = 1 - \exp(-R_T^2)$, Константы C_μ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k , σ_ϵ определяются эмпирически, и в модели их величины приняты: $C_\mu = 0,09$, $C_{\epsilon 1} = 1,44$, $C_{\epsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\epsilon = 1,3$. При числе Льюиса $Le = 1$ уравнения диффузии и теплопроводности становятся идентичными, профили избыточных концентраций и температур оказываются подобными, и $q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right) \cdot \frac{\partial h}{\partial x_i}$.

Здесь $i = 1, 2, 3$; константа $\sigma_c = 0,9$; Pr — число Прандтля; h — теплосодержание (энтальпия).

Программное обеспечение. Модельные уравнения описывают как ламинарные, так и турбулентные потоки и решаются при определённых начальных и граничных условиях с использованием численного метода конечных элементов в современной программной среде SolidWorks Flow Simulations.

Программное обеспечение позволяет рассчитать поля концентраций вредных веществ (ВВ), твёрдой составляющей сварочных аэрозолей (ТССА), температур, подвижности воздуха рабочей зоны и относительной влажности. С помощью данного ПО можно также определить опасные зоны загазованности воздуха и зоны неблагоприятных параметров микроклимата в помещении, а также количество рабочих мест операторов, не удовлетворяющих санитарно-гигиеническим нормативам.

Экспериментальные исследования. Рассматривался перенос ВВ и избытков теплоты в производственных помещениях с местной вытяжной вентиляцией. Была предложена соответствующая математическая модель. Чтобы подтвердить её адекватность, проведены исследования систем вентиляции и параметров, определяющих условия труда операторов на рабочих местах. В качестве объекта исследования был выбран сварочный цех Ростовского автобусного завода — РоАЗ (рис. 1).

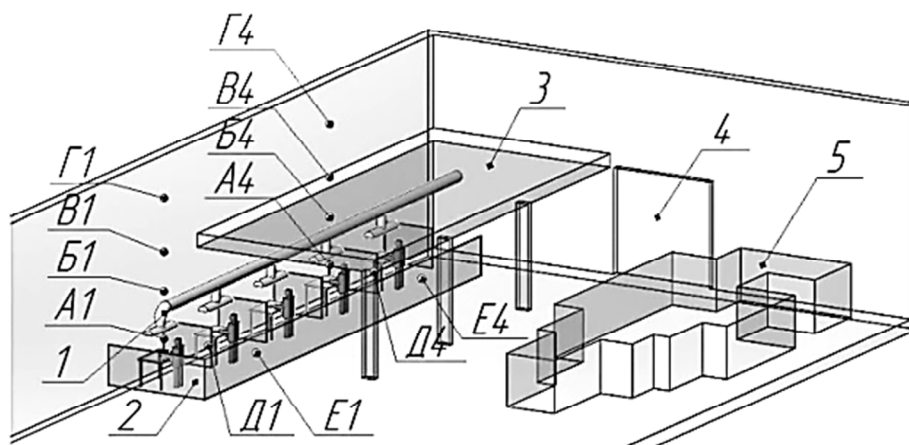


Рис. 1. Сварочный цех со схемой размещения измерительных точек: 1 — система вентиляции; 2 — ширмы; 3 — железобетонная плита; 4 — входные ворота; 5 — участок лазерной резки

Анализ выполненных модельных расчётов показал, что на формирование полей концентраций, температур и подвижности воздуха оказывают воздействие следующие факторы:
— схема организации воздухообмена;

- эффективность работы местной вентиляции цеха;
- период года (тёплый, холодный);
- интенсивность и расположение источников загрязнения;
- вид технологического процесса сварки;
- работа систем отопления, вентиляции и др.

Выбор измерительных точек определялся необходимостью доказать наличие сильных конвективных потоков газов. Причём скорость этих потоков в 3–4 раза выше рядом с источниками загрязнения (рис. 2, а). Точки А расположены в зоне дыхания сварщика (0,5 м от лица) на высоте 1,7 м от пола. Точки Б, В, Г расположены над точками А на высоте соответственно 3,5 м; 5,0 м и 7,0 м от пола. На одной высоте с точками А расположены точки Д и Е. Они удалены от рабочего места сварщика соответственно на 2 и 4 м.

Как видно из графиков (рис. 2, а), на рабочем месте сварщика в зоне дыхания образуется устойчивый конвективный поток со скоростью 0,4–0,5 м/с. Очевидно, что такой поток увлекает за собой газы и ТССА и рассеивает их по помещению. При удалении от точек А1, А4 конвективные потоки ослабевают. На расстоянии 2–4 м их средняя скорость равна 0,1 м/с, что соответствует скорости витания ТССА. Образующийся при электросварке аэрозоль конденсации характеризуется мелкой дисперсностью. Более 90 % частиц размером 0,15 мкм (в массовых долях) имеют скорость витания менее 0,1 м/с. Поэтому частицы аэрозоля легко следуют за воздушными потоками, аналогично газам. Эксперименты показали удовлетворительную точность предлагаемой математической модели процессов конвективного переноса воздушных потоков. Полученные значения относительной погрешности не превышают максимальной погрешности используемых измерительных средств.

Адекватность предложенной модели проверялась также в отношении определения концентраций ВВ и ТССА, температур и относительной влажности воздуха в рабочей зоне сварщиков (аналогично исследованиям тепломассопереноса ВВ, сварочного аэрозоля и избытков теплоты — ИТ). На рис. 2, б показаны результаты натурных экспериментов и модельных расчётов концентраций СО для полуавтоматической сварки плавящейся проволокой в среде углекислого газа.

Как следует из рис. 2, б максимальная концентрация СО в рабочей зоне (РЗ) находится в точках А (зона дыхания сварщиков) и превышает ПДК в 7–8 раз. Такое превышение ПДК способно вызвать хронические профессиональные заболевания органов дыхания [7]. Увеличение концентрации СО в зоне дыхания сварщика 4-го поста обусловлено наличием железобетонной плиты над постами 3–5 (см. рис. 1). Это способствует снижению скорости движения конвективных потоков, и выветривание газов здесь замедляется. На удалении от рабочего места (в точках Б, В, Г) концентрация снижается до предельно-допустимой. Показатели превышения уровня ПДК получены из модельных расчётов, поскольку используемые газоанализаторы не способны определять концентрации выше 2,5 ПДК. Снижение концентрации СО в горизонтальной плоскости выражено сильнее, и на расстоянии 2–4 м от рабочего места она составляет всего 0,5 ПДК. Значения относительной погрешности по концентрациям угарного газа в РЗ не превышают величины максимальной погрешности измерений газоанализатора Dräger X-am 5000.

Результаты модельных расчётов параметров производственного микроклимата и полей концентрации ВВ и ТССА. На рис. 3 представлены поля подвижности воздуха в помещении в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях непосредственно в зоне дыхания сварщика и на расстоянии от рабочих мест. Как видно из результатов расчёта (рис. 3), величина вектора скорости в вертикальном срезе выше, чем в горизонтальном. Это доказывает, что вертикальные конвективные потоки определяют структуру движения воздуха около рабочих мест.

На рис. 4, а, б представлены результаты модельных расчётов полей температуры и концентрации угарного газа в рассматриваемом помещении.

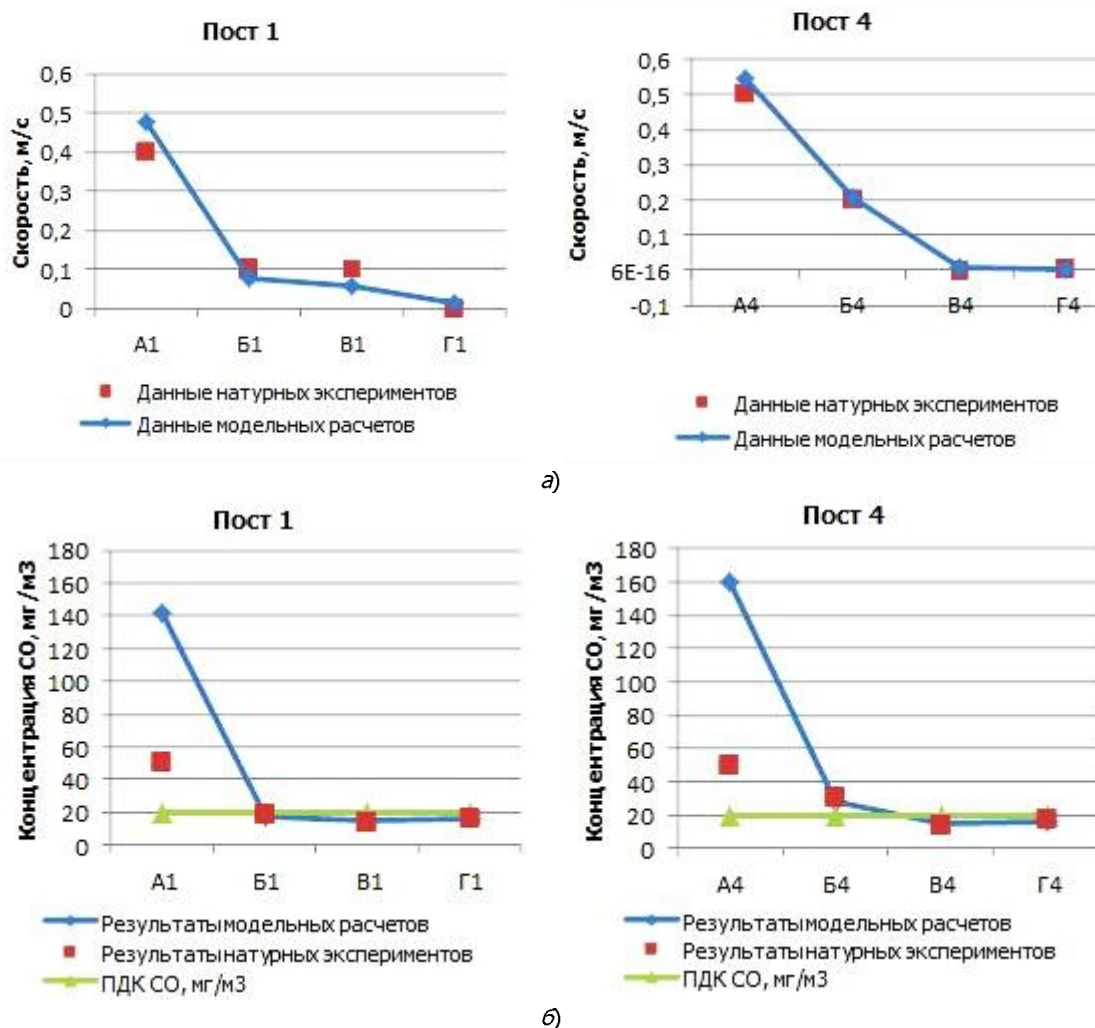


Рис. 2. Результаты исследований параметров вентиляционной системы: скорость движения газоздушных потоков (а); концентрация CO в зоне дыхания сварщиков и возле рабочих мест (б)

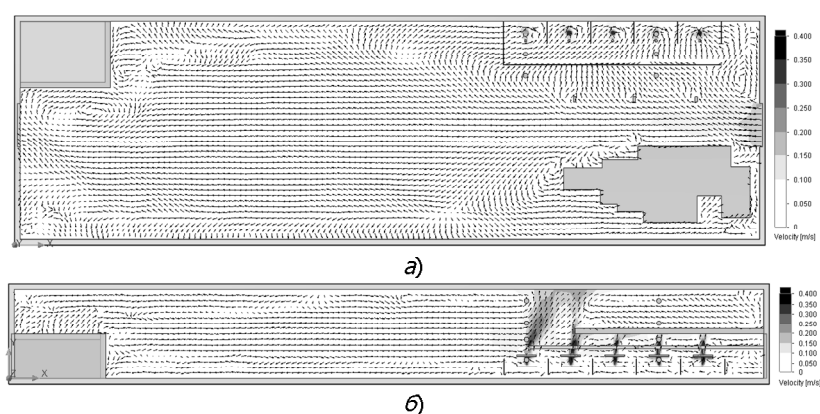


Рис. 3. Поля подвижности воздуха в помещении сварочного цеха PoAZ в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях (градация от 0 до 0,6 м/с — чем темнее, тем скорость выше)

Как видно из рис. 4, а, б, поля концентраций температур и CO подобны. Отходящие от сварочных постов тёплые газы за счёт конвекции поднимаются вверх и быстро накапливаются под плитой и у потолка. Соответственно, в этих местах мы имеем наибольшую концентрацию ВВ, превышающую ПДК. Аналогичные результаты даёт исследование температур. Вертикальное рас-

слоение температур достигает 3 °C (рис. 4, а). Как следует из расчётов, опасные зоны загазованности располагаются рядом с зоной дыхания сварщиков. На удалении 2–4 м опасные зоны отсутствуют. Аналогичные расчёты были произведены и по ТССА, основной составляющей которой являются оксиды железа. Из рис. 4, в видно, что превышение ПДК по «запылённости» значительно более выражено и, соответственно, опаснее, чем превышение ПДК СО. Максимальная концентрация ТССА (10 ПДК) приходится на зону дыхания сварщиков. Определяющую роль в формировании полей подвижности воздуха, температур и концентраций играет конструктивное решение (наличие железобетонной плиты над 3–5 постами). Кроме того, посты ограждены тканевыми ширмами. Они преграждают поступление свежего воздуха к сварочным постам. Эти факторы приводят к ухудшению вентилируемости помещения, и как следствие — к ухудшению условий труда сварщиков.

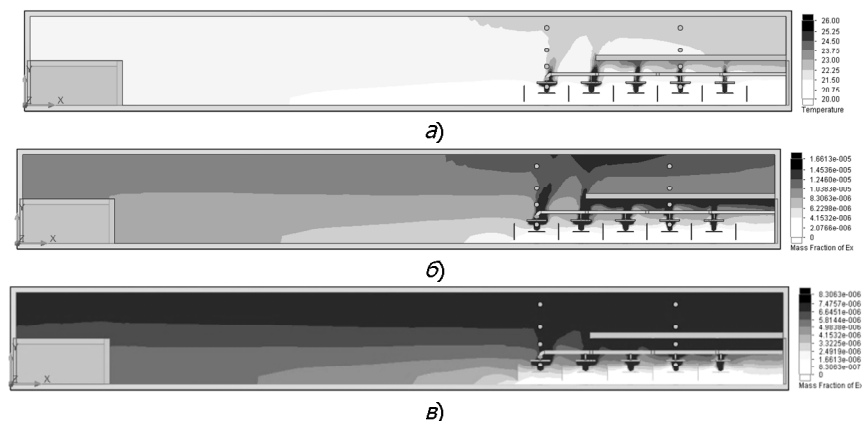


Рис. 4. Вертикальные срезы полей: температуры воздуха в помещении (чёрным цветом показаны зоны, где температура более 26 °C) (а); концентрации СО в воздухе помещения (чёрным цветом показаны зоны, где концентрация выше ПДК) (б); ТССА в воздухе помещения (чёрным цветом показаны зоны, где концентрация выше ПДК) (в)

Таким образом, на первом этапе работ была предложена трёхмерная нестационарная $k-\varepsilon$ модель турбулентного теплопереноса. Она учитывает вихревые газозагрязнённые потоки и позволяет определять поля концентраций ВВ, ТССА, температур, подвижности воздуха и относительной влажности в помещениях с активной вентиляцией и источниками загрязнения. В среде SolidWorks было создано программное обеспечение, позволившее реализовать математическую модель. Эти разработки могут быть использованы на стадии планирования физической модели процессов. Кроме того, представленная выше модель нашла практическое применение как инструмент прогноза состояния производственной среды на участках с повышенной загазованностью. Её использование позволило также разработать конкретные мероприятия по улучшению условий труда операторов.

Обеспечение допустимых параметров производственного микроклимата на участках повышенной загазованности машиностроительных предприятий. Была модернизирована система местной вентиляции участка сварки ООО «Ростовский автобусный завод» (рис. 1, а). Проведены экспериментальные и теоретические исследования загазованности воздуха участка сварки. Установлено, что концентрация угарного газа и твёрдых составляющих сварочного аэрозоля достигала недопустимо высокого уровня — 7–10 ПДК. Выявлена существенная недоработка в местной вентиляции. Она организована таким образом, что вредные газы и аэрозоли движутся к отсосам через зону дыхания сварщиков. Газы и сварочный аэрозоль (СА) — «тёплые». Поэтому в рабочей зоне сварщика нарушаются параметры производственного микроклимата (температура воздуха выше допустимой). Кроме того, существенным недостатком этой системы вентиляции является неравномерная скорость вытяжки газозагрязнённой смеси (скорости вытяжки на первом и

последнем посту могут различаться в 3–4 раза). Это обусловлено наличием единственного вентилятора на пять сварочных постов. В результате отмечен средний объёмный расход воздуха на вентиляцию ниже рекомендованных величин.

Для исключения комплексного негативного воздействия опасных и вредных производственных факторов на сварщиков были предложены варианты модернизации существующей системы местной вентиляции. Суть модернизации заключается в следующем. Местную вентиляцию предложено либо вмонтировать в рабочий стол сварщика («вытяжка снизу»), либо установить перед сварочным столом напротив оператора («вытяжка спереди»). А общий трубопровод, объединяющий посты, проложить под полом.

При таком расположении отсосов зона дыхания сварщиков оказывается изолированной от вредных газов и аэрозолей. Также предполагается наличие вентилятора на каждом посту. Величина объёмного расхода воздуха для каждого поста увеличена до 1800 м³/ч на основании проведённых модельных расчётов. Предложенная модернизация позволяет не задействовать энергозатратную общеобменную вентиляцию. При организации «вытяжки спереди» сохраняется некоторое расстояние между источником и местным отсосом, в результате чего часть конвективных потоков с загрязняющими веществами распространяется по рабочей зоне. Это приводит к снижению эффективности вентиляции. Для данного варианта можно рекомендовать более производительные вентиляторы.

На рис. 5, а, б представлены результаты модельных расчётов полей температур в рабочей зоне сварщиков. Наличие железобетонной плиты над рабочим местом сварщика четвёртого поста приводит к накоплению газов и повышению температуры на 2–3 °С. На рабочем месте сварщика первого поста газы хорошо выветриваются — и повышения температуры не наблюдается. На рис. 5, в, г представлены данные модельных расчётов полей концентраций ТССА в рабочей зоне сварщиков. Здесь так же, как в случае с температурой, наличие железобетонной плиты над рабочим местом сварщика четвёртого поста приводит к накоплению сварочного аэрозоля — его концентрации в зоне дыхания превышают ПДК. Итак, сварщик первого поста находится в лучших условиях.

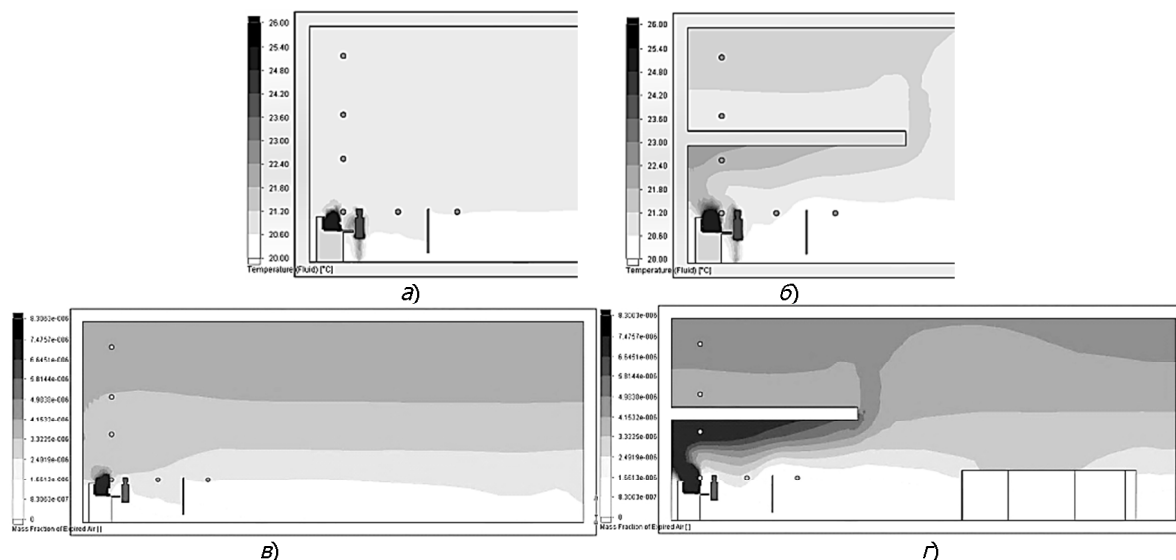


Рис. 5. Рабочая зона сварщиков («вытяжка спереди»). Вертикальные срезы полей: температуры воздуха на посту I (а) и IV (б) (чёрным выделены зоны, где температура выше 26 °С); концентрации ТССА на посту I (в) и IV (г) (чёрным выделены зоны превышения ПДК)

Модернизация системы вентиляции («вытяжка снизу») существенно изменила структуру полей движения воздуха. Это касается как абсолютных значений скоростей потоков, так и струк-

туры вихрей в помещении. В целом подвижность воздуха на высоте 1,7 м от пола снизилась, что является положительным фактором, так как снижается вероятность распространения ТССА по всему помещению. Предлагаемая система местной вентиляции «вытяжка снизу» достаточно эффективно удаляет из рабочей зоны сварочных постов «тёплые» потоки газов и аэрозоля, выделяющиеся в процессе сварки. Превышение ПДК было отмечено на значительно меньшей площади — на небольшой зоне непосредственно у самого источника. Таким образом, модернизация нормализовала состояние производственной среды в соответствии с санитарно-гигиеническими нормативами [8, 9].

Определение эффективности удаления вредных веществ местными отсосами. Один из важнейших показателей эффективности работы всей системы местной вентиляции — эффективность местного отсоса $\Phi_{от}$ [10]. Её корректное определение влияет на итоговую картину исследуемых параметров во всём помещении. В [2, 3] эффективность отсосов задавалась по паспортным данным и расчёты не проводились. В настоящей же статье разработана методика численного определения $\Phi_{от}$. Рассмотрены наиболее распространённые на производствах типы местных отсосов и предлагаемые модернизированные системы.

Модельные расчёты эффективности при сварке проволокой Св-08Г2С $d = 0,8$ мм в среде углекислого газа производились по формуле:

$$\Phi_{от} = (q_{ист} / q_{уд}) \cdot 100\%,$$

где $q_{ист}$ — количество ВВ, выделяемых источником в рабочую зону, кг/с; $q_{уд}$ — количество ВВ, удаляемых системой вентиляции, кг/с.

Как следует из результатов модельных расчётов, с увеличением объёмного расхода всасывания эффективность удаления вредных веществ увеличивается. Из всех рассмотренных типов местных отсосов наиболее эффективным является предлагаемый нами вариант «вытяжка снизу». В этом случае обеспечивается высокая эффективность удаления ВВ даже при небольших величинах объёмного расхода воздуха. Также было исследовано влияние технологических параметров сварки на параметры состояния условий труда. Результаты численных расчётов для полуавтоматической сварки в среде углекислого газа плавящейся проволокой Св-08Г2С показали, что уменьшение диаметра свариваемой проволоки с 2,0 мм до 0,8 мм существенно снижает загазованность в помещении и нормализует параметры производственного микроклимата.

Выводы.

1. Установлено, что для участков сварки доминирующими опасными и вредными производственными факторами являются повышенная загазованность и запылённость. В зависимости от вида сварки концентрации угарного газа, оксидов железа и магния превышают ПДК в 7–10 раз.
2. Трёхмерная нестационарная модель тепломассопереноса учитывает вихревые газовоздушные потоки в помещениях с активной вентиляцией и источниками загрязнения и позволяет в таких условиях определять поля температур, концентраций ВВ, ТССА.
3. Разработанное в среде SolidWorks программное обеспечение, реализующее предложенную математическую модель, может быть использовано и на стадии планирования физической модели процессов, и как инструмент прогноза состояния производственной среды на участках с повышенной загазованностью.
4. Предложена методика определения эффективности удаления вредных веществ местными отсосами.
5. Разработаны рекомендации по обеспечению безопасных условий труда операторов сварочных производств. Предложены соответствующие конструктивные решения и рациональная организация работы систем местной вентиляции.

6. Предлагаемая модель позволяет решать различные задачи оптимизации в рабочей зоне участков с повышенной загазованностью и избытками тепловыделений. Таким образом, можно выбирать рациональные режимы работы вентиляционных устройств, обеспечивать необходимое качество воздуха и его подвижность, а также добиваться благоприятного температурного режима.

Библиографический список

1. Cline, M. C. Computation of two-dimensional, viscous nozzle flow / M. C. Cline // *AIAA Journal*. — 1976. — Vol. 14, № 3. — Pp. 295–296.
2. Shuen, J. S. A time-accurate algorithm for chemical non-equilibrium viscous flows at all speeds / J. S. Shuen, K.-H. Chen, Y. Choi // *AIAA Papers*. — 1992. — № 92-3639. — Pp. 5–14.
3. Конечноеэлементное моделирование процессов массопереноса загрязнений в производственной среде с учётом завихрений воздушных потоков / Б. Ч. Месхи [и др.] // *Вестник Дон. гос. техн. ун-та*. — 2012. — № 6 (67). — С. 10–16.
4. Математическое и экспериментальное моделирование процессов распространения оксидов углерода и избытков теплоты в газовоздушной среде помещения / Б. Ч. Месхи [и др.] // *Вестник Дон. гос. техн. ун-та*. — 2011. — Т. 11, № 6 (57). — С. 862–874.
5. Модель массопереноса тяжёлых примесей в вентилируемых помещениях участков обкатки и определение опасных зон загазованности по канцерогенам / Б. Ч. Месхи [и др.] // *Вестник Дон. гос. техн. ун-та*. — 2010. — Т. 10, № 4 (47). — С. 534–544.
6. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.]. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2008. — С. 228–245.
7. Гримитлин, А. М. Вентиляция сварочного производства / А. М. Гримитлин // *Арктический СНиП*. — 2006. — № 19. — С. 34–39.
8. ГОСТ 12.1.005-88. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны / Министерство здравоохранения СССР, Всесоюзный центральный совет профессиональных союзов, Государственный комитет СССР по стандартам. — Москва : Изд-во стандартов, 1988. — 49 с.
9. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [Электронный ресурс] / Госкомсанэпиднадзор России. — Режим доступа: <http://www.rg.ru/2010/07/15/sanpin548-dok.html> (дата обращения: 29.04.2014).
10. Тищенко, Н. Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчёт содержания вредных веществ и их распределение в воздухе : справочник / Н. Ф. Тищенко. — Москва : Химия, 1991. — 368 с.

Материал поступил в редакцию 19.03.2014.

References

1. Cline, M. C. Computation of two-dimensional, viscous nozzle flow. *AIAA Journal*, 1976, vol. 14, no. 3, pp. 295–296.
2. Shuen, J. S., Chen, K.-H., Choi, Y. A time-accurate algorithm for chemical non-equilibrium viscous flows at all speeds. *AIAA Pap.*, 1992, no. 92-3639, pp. 5–14.
3. Meskhi, B. C., Solovyev, A. N., Bulygin, Y. I., Koronchik, D. A. Konechnoelementnoye modelirovaniye protsessov massoperenosa zagryazneniy v proizvodstvennoy srede s uchetom zavikhreniy vozdushnykh potokov. [Finite-element modeling of contamination mass transfer processes in technological environment with regard to airflow turbulence.] *Vestnik of DSTU*, 2012, no. 6 (67), pp. 10–16 (in Russian).
4. Meskhi, B. C., Maslov, A. N., Solovyev, A. N., Bulygin, Y. I., Koronchik, D. A. Matematicheskoye i eksperimentalnoye modelirovaniye protsessov rasprostraneniya oksidov ugleroda i izbytkov teploty v

gazovozdushnoy srede pomeshcheniya. [Mathematical and experimental simulation of carbon oxides and excess heat propagation in gas-air indoor environment.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 6 (57), pp. 862–874 (in Russian).

5. Meskhi, B. C., Bulygin, Y. I., Maslov, A. N., Koronchik, D. A., Tiratsuyan, L. L. Model mas-soperenosa tyazhelykh primesey v ventiliruyemykh pomeshcheniyakh uchastkov obkatki i opredeleniye opasnykh zon zagazovannosti po kantserogenam. [Model of mass transfer of heavy admixtures in fanned locations of sections of rolling and definition of hazardous zones of the gassed condition on cancerogenes.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 4 (47), pp. 534–544 (in Russian).

6. Alyamovsky, A. A., Sobachkin, A. A., Odintsov, E. V., Kharitonovich, A. I., Ponomarev, N. B. SolidWorks 2007/2008. Kompyuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike. [SolidWorks 2007/2008. Computer simulation in engineering practice.] Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2008, pp. 228–245 (in Russian).

7. Grimitlin, A. M. Ventilyatsiya svarochnogo proizvodstva. [Ventilation of welding production.] Arkticheskiy SNiP, 2006, no. 19, pp. 34–39 (in Russian).

8. GOST 12.1.005-88. Mezhgosudarstvennyy standart. Sistema standartov bezopasnosti truda. Obshchiye sanitarno-gigiyenicheskiye trebovaniya k vozdukhу rabochey zony. [GOST 12.1.005-88. Interstate standard. System of occupational safety standards. General sanitary-hygienic requirements to the air of working zone.] Ministerstvo zdravookhraneniya SSSR, Vsesoyuznyy tsentralnyy sovet professionalnykh soyuzov, Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam. [USSR Ministry of Health, All-Union Central Trade Union Council, USSR State Committee for Standardization.] Moscow: Izdatelstvo standartov, 1988, 49 p. (in Russian).

9. SanPiN 2.2.4.548-96. Gigiyenicheskiye trebovaniya k mikroklimatu proizvodstvennykh pomeshcheniy. [SanRaN 2.2.4.548-96. Hygienic requirements to microclimate of industrial facilities.] Goskomsanepidnadzor Rossii. Available at: <http://www.rg.ru/2010/07/15/sanpin548-dok.html> (accessed: 29.04.2014) (in Russian).

10. Tishchenko, N. F. Okhrana atmosfernogo vozdukha. Raschet soderzhaniya vrednykh veshchestv i ikh raspredeleniye v vozdukhе: spravochnik. [Atmospheric air protection. Calculation of content of harmful substances and their distribution in the air: reference book.] Moscow: Khimiya, 1991, 368 p. (in Russian).

MATHEMATICAL AND COMPUTER-BASED SIMULATION OF INDUSTRIAL ENVIRONMENT GENERATION FOR THE PURPOSES OF PLANNING AND OPTIMIZATION OF AREA VENTILATION SYSTEMS*

B. C. Meskhi, Y. I. Bulygin, A. N. Legkonogikh, A. L. Gaydenko

The dominant occupational hazards at the welding sites are identified. They are elevated air pollution and dustiness. Depending on the welding forms, the concentrations of harmful substances (carbon oxide, iron and magnesium oxides) exceed the sanitary-hygienic standards by 7–10 times. The heat and mass transfer of harmful substances and heat in the industrial environment with dynamic ventilation and pollutant sources is considered. Its nonstationary 3D mathematical model is presented. The model permits the turbulence of air flows which differs it from the existing models of the occupational hazard spread. The developed software enables to solve various tasks of the ventilation system installation and operation. Specifically, it is referred to the rational distribution of various engineering devices of the given system, its control issues, and of the optimal worksite location. To ensure safe working conditions for the welding operators, the recommendations on the rational organization of the local ventilation system operation are developed. The corresponding constructive solutions are proposed.

Keywords: production environment, simulation, calculation, ventilation, occupational hazards, air pollution, internal environment, working conditions.

* The research is done within the frame of the government task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in R&D on 1.1.12 theme "Development of methodology fundamental principles of mathematical simulation of occupational hazards".