

К. т. н. В. В. Шаптала<sup>1</sup>, д. т. н. К. И. Логачев<sup>1</sup> (✉), д. т. н. Н. Н. Северин<sup>2</sup>,  
Е. Е. Хукаленко<sup>1</sup>, Ю. М. Гусев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Белгородский юридический институт МВД России имени И. Д. Путилина», г. Белгород, Россия

УДК 533.6:628.5

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЭЛЕКТРОСВАРОЧНЫХ РАБОТ

Рассмотрено устройство комплексной системы вентиляции, совмещающей местную вытяжную вентиляцию рабочих мест сварщиков и общеобменную вентиляцию помещений. С применением метода компьютерного моделирования рассчитаны поля подвижности воздуха, его температура и концентрация вредных примесей. Выполнен сравнительный анализ основных типов стационарных устройств местной вытяжной вентиляции электросварочных рабочих мест: вытяжных зонтов, сварочных панелей, а также отсосов с передувом. Определены условия эффективного использования подъемно-поворотных отсосов. Выявлены факторы, влияющие на эффективность их работы, и установлены сочетания влияющих факторов, обеспечивающих предельно допустимые концентрации вредных выделений в рабочих зонах сварщиков. Определены условия, при которых общеобменного эффекта местных отсосов достаточно для того, чтобы поддерживать в помещении концентрацию на уровне предельно допустимых концентраций (ПДК). Полученные результаты могут применяться для разработки инженерных методов расчета и оптимизации вентиляционных устройств и систем, а также для анализа конструктивных и проектных решений по устройству вентиляции электросварочных производств.

**Ключевые слова:** электродуговая сварка, местная вытяжная вентиляция, общеобменная вентиляция.

### ВВЕДЕНИЕ

Электродуговая сварка широко используется в различных отраслях народного хозяйства (машиностроение, производство строительных конструкций, строительно-монтажные и ремонтно-восстановительные работы). Процесс электродуговой сварки сопровождается рядом вредных факторов (выделение вредных аэрозолей, газов, излучение), а также имеет высокую пожарную опасность. Основным способом поддержания требуемых параметров микроклимата в рабочих зонах сварщиков является организация местной вытяжной вентиляции. Работа местных вытяжных устройств требует значительных энергозатрат. В связи с этим разработка энергосберегающих систем местной вытяжной вентиляции рабочих мест сварщиков является актуальной задачей [1–8].

Наиболее неблагоприятные условия труда наблюдаются при ручной сварке электродами.

При электродуговой сварке имеет место интенсивное выделение ядовитого сварочного аэрозоля и множества токсичных газов. Состав и интенсивность вредных выделений зависят от вида и расхода сварочных материалов (электродной проволоки, флюса), а также мощности электродуговой дуги [4].

Качество воздушной среды в помещениях, в которых ведутся электросварочные работы, определяется тепло- и массообменными процессами, которые формируют поля подвижности воздуха, его температуры и концентрации вредных примесей.

Основным, а в ряде случаев и единственным, способом нормализации среды в сварочных помещениях является вентиляция: местная вытяжная и общеобменная, которые применяются совместно. Нормируемыми параметрами рабочей зоны являются температура, подвижность воздуха и концентрация загрязняющих примесей (санитарные правила и нормы, гигиенические требования к микроклимату производственных помещений).

При расходе за шестичасовую смену 5 кг электродов марки МР-3 и параметрах электрической дуги  $U = 30$  В, ток 600 А интенсивность выделения оксида марганца составляет  $g = 0,36$  мг/с.



К. И. Логачёв  
E-mail: kilogachev@mail.ru

При этом предельно допустимая концентрация (ПДК) оксида марганца равна  $C_{\text{ПДК}} = 0,3 \text{ мг/м}^3$ . Таким образом, для поддержания средней концентрации оксида марганца на предельно допустимом уровне в помещении, содержащем всего один электросварочный пост, необходимая производительность общеобменной вентиляции составляет  $L = g/C_{\text{ПДК}} = 0,36/0,3 = 1,2 \text{ м}^3/\text{с} = 4320 \text{ м}^3/\text{ч}$ . При этом из-за неоднородного распределения концентрации вредных примесей общеобменная вентиляция даже при высоких кратностях воздухообмена не позволяет обеспечить ПДК примесей в рабочих зонах сварщиков. Эта задача может быть решена только с помощью местных вытяжных устройств. Эффективность вентиляции рабочего места сварщика определяется выполнением двух взаимосвязанных задач: отклонением конвективной струи загрязненного воздуха от зоны дыхания сварщика и ее улавливание отсосом.

Вопросы расчета и организации вентиляции рабочих мест и помещений при выполнении электросварочных работ рассматривались в работах [2–4, 9–11].

При ручной электродуговой сварке могут использоваться следующие виды местных вытяжных устройств: подъемно-поворотные, перемещаемые воздухоприемники, стационарные местные отсосы, местные отсосы, встроенные в сварочное оборудование.

Местная вытяжная вентиляция является эффективной, но достаточно энергоемкой (энергия расходуется на работу побудителей тяги — вентиляторов), однако снижение производительности местных отсосов для уменьшения их энергопотребления приводит к выбиванию части вредных выделений в воздушную среду помещения, что повышает ее фоновое загрязнение. Основным средством борьбы с фоновым загрязнением сварочных помещений является общеобменная вентиляция, которая может осуществляться с помощью механического или естественного побуждения (аэрации), а также частично в результате работы самих местных отсосов. Таким образом, нормализация воздушной среды сварочного цеха может быть достигнута в результате работы комплексной системы вентиляции, состоящей из двух подсистем по примеру комплексных систем обеспыливания производственных помещений [5, 12]. Оптимальным будет такой режим работы комплексной системы вентиляции сварочного помещения, при котором энергозатраты на работу местной вытяжной вентиляции будут минимальными, но достаточными для поддержания ПДК вредных примесей в рабочих зонах, а общеобменный эффект, создаваемый местными вытяжками, дополненный естественным воздухообменом (аэрацией) помещения, будет достаточным для поддержания и фоновой концентрации вредных примесей на уровне ПДК.

## МЕТОДЫ

Работу отсосов моделировали в рамках полевой модели, включающей в себя уравнения движения воздуха (уравнения Навье – Стокса), уравнения тепло- и массопереноса для исследования распределений температуры и концентрации вредных примесей [3, 6, 13–19].

$$\begin{aligned} \nabla \cdot U &= 0, \\ \frac{\partial U}{\partial t} + \nabla U \cdot U - \nabla \cdot \left( (\nu_l - \nu_t) (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} (\nu_l - \nu_t) \nabla \cdot U \cdot I \right) &= -\frac{\nabla p}{\rho_0} - (1 - \beta(T - T_0)) \cdot g, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (UT) - \nabla \cdot \left( \left( \frac{\nu_l}{Pr_l} + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \nabla T \right) &= \frac{g_T}{\rho C_p}, \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (UC) - \nabla \cdot \left( \left( \frac{\nu_l}{Sm_l} + \frac{\nu_t}{Sm_t} \right) \nabla C \right) &= g_c. \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\beta$  — коэффициент теплового расширения воздуха;  $T_0$ ,  $\rho_0$  — средние значения температуры воздуха и его плотности соответственно;  $\nu_l$ ,  $\nu_t$  — коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости соответственно;  $Pr$ ,  $Sm$  — числа Прандтля и Шмидта;  $g_T$ ,  $g_c$  — интенсивности выделения теплоты и примеси в вентилируемом пространстве соответственно.

Уравнения (1) дополняются уравнениями  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности, а также граничными условиями для вычисляемых величин. Для решения данной системы уравнений использовали гидродинамический пакет Ansys Fluent [15].

Интенсивность теплоступлений от сварочной дуги  $g_T$ , Вт/(м<sup>3</sup>·с), расходуемых на нагрев конвективной струи загрязненного воздуха определяли по формуле [4]

$$g_T = 0,1I \cdot U, \quad (2)$$

где  $I$  и  $U$  — сила и напряжение сварочного тока, соответственно,  $U = 30 \text{ В}$ .

Интенсивность выделения оксида марганца считали постоянной:  $g_c = 0,36 \text{ мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$  [4].

В процессе моделирования изучали условия, при которых обеспечивались предельно допустимая концентрация оксида марганца в рабочей зоне, а также условия выноса части загрязненного потока в помещении.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

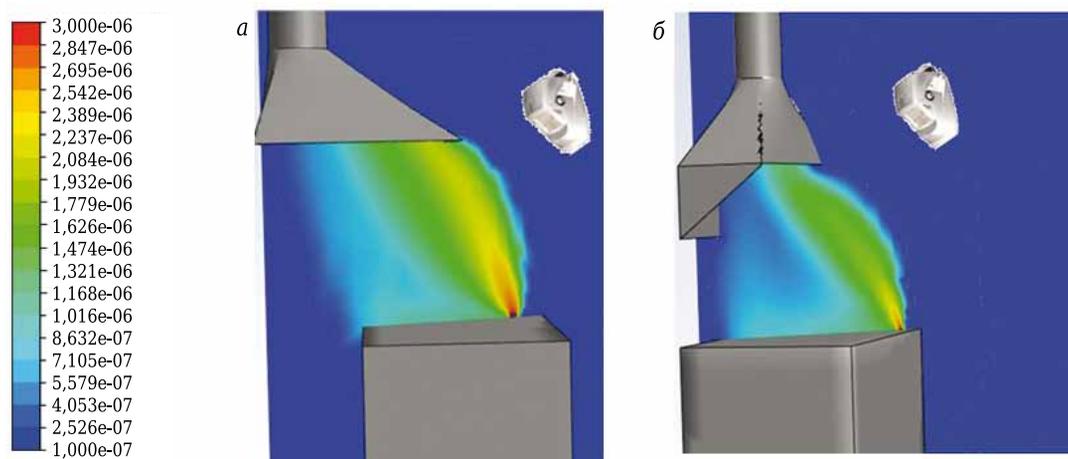
Наиболее универсальными являются подъемно-поворотные перемещаемые вытяжные устройства. Они могут быть использованы при любых видах сварки. Однако при фиксированном расположении подъемно-поворотного отсоса по мере удаления места сварки от воздухоприемной воронки эффективность отсоса снижается. В связи с этим возникает необходимость регулирования производительности с учетом необходимых размеров зоны эффективного улавливания. Ограниченность зоны эффективного улавливания — удаление порядка 0,4 м — приводит к необходимости многократного перемещения воздухоприемной воронки при работе с протяженными конструкциями, что

затрудняет работу сварщика и снижает ее производительность. Поэтому наряду с подъемно-поворотными отсосами широкое распространение получили стационарные отсосы различных конструкций. При использовании вытяжного зонта максимально используется энергия восходящей конвективной струи над местом сварки. Однако сварочный факел в этом случае может проходить через зону дыхания сварщика. Добиться минимально необходимого отклонения сварочного фактора от зоны дыхания (0,3 м) можно путем смещения рабочего стола (рис. 1, а) относительно вытяжного зонта. Еще большего отклонения при умеренных расходах отсасываемого воздуха можно добиться с использованием сварочные панели (рис. 1, б).

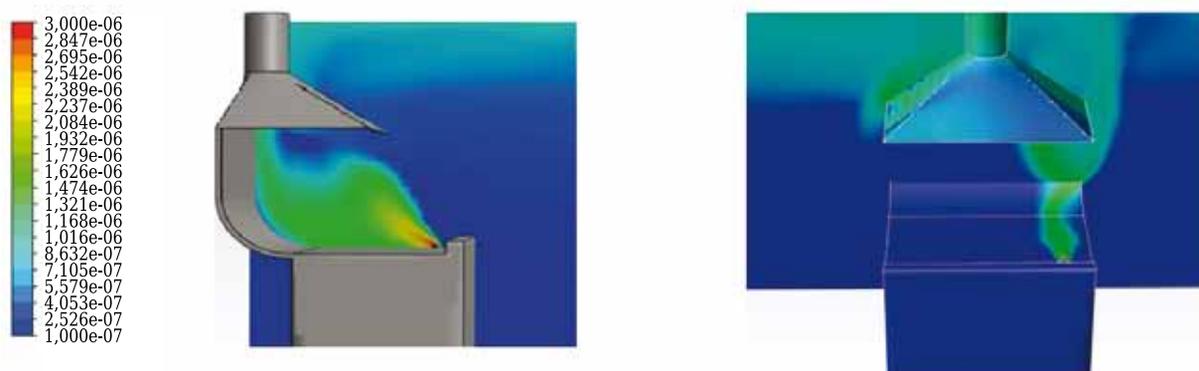
Дальнейшее смещение стола при использовании вытяжного зонта или снижение высоты расположения сварочной панели приводит к значительному увеличению расхода отсасываемого воздуха, необходимого для обеспечения ПДК в рабочей зоне. Часто применяемым приемом повышения эффективности местных отсосов является использование передувочных

устройств [2, 4, 20–22]. Дополнение вертикального отсоса с передувкой позволяет еще более расширить рабочую зону, однако не позволяет уменьшить необходимый расход отсасываемого воздуха, так как при его снижении происходит частичное выбивание загрязненной конвективной струи в помещение, это же явление происходит при увеличении интенсивности передувки (рис. 2).

Таким образом, устойчивая работа системы вертикальный отсос – передувка возможна лишь при определенном соотношении расходов отсасываемого и подаваемого передувкой воздуха. Например, для вертикального отсоса с передувкой (см. рис. 2) и приведенных выше условий оптимальное соотношение объемных расходов составляет: расход отсасываемого воздуха 0,5 м<sup>3</sup>/с, расход воздуха подаваемого через передувку, 0,1 м<sup>3</sup>/с. Если точки сварки расположены близко к плоскости стола, то наибольшую эффективность имеет схема организации местной вытяжной вентиляции с передувкой, показанной на рис. 3. Приведенные результаты расчетов получены для условий равномерного подтекания воздуха к отсосу.



**Рис. 1.** Поля концентраций вредных выделений при расходе удаляемого воздуха  $V = 0,53 \text{ м}^3/\text{с}$ , мощность сварочной дуги  $W = 18000 \text{ Вт}$ : а — вытяжной зонт; б — сварочная панель



**Рис. 2.** Поле концентрации вредных примесей при использовании вытяжного зонта с передувкой вдоль поверхности стола

Нерегулярность течений окружающего воздуха, подтекающих к отсосам для компенсации удаляемого воздуха, нестабильность теплофи-

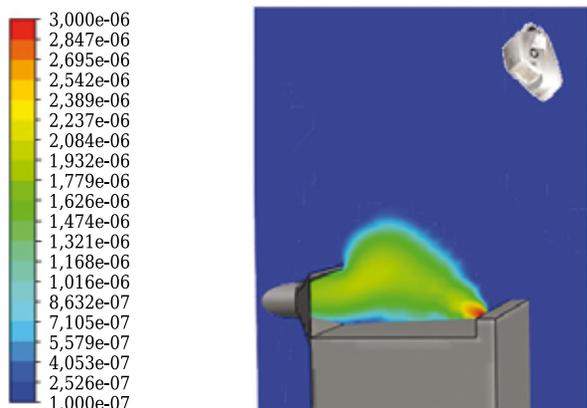


Рис. 3. Распределение концентрации вредных примесей. Производительность бокового отсоса с передувом  $V = 0,3 \text{ м}^3/\text{с}$

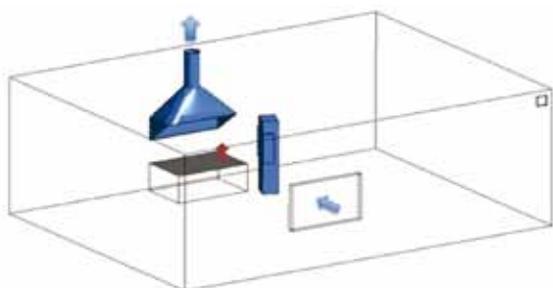


Рис. 4. Схема помещения сварочного цеха

зических процессов сварки, перемещения точки сварки в плоскости стола и другие неопределенные факторы приводят к нарушению условий полного захвата конвективной струи отсосом и рассеиванию части вредных выделений во внутреннее пространство (рис. 4, 5).

При выполнении сварочного шва или точечной сварки габаритной конструкции снижение интенсивности всасывающего спектра в периферийных точках стола также приводит к выбиванию вредностей в помещение (см. рис. 5).

При использовании сварочной панели вынос вредностей в помещение усиливается, однако создаваемого местной вытяжкой общеобменного эффекта достаточно для того, чтобы поддерживать в помещении концентрацию на уровне ПДК. Использование бокового отсоса с передувом позволяет расширить рабочую зону. Также установлено, что эффективность горизонтального отсоса менее подвержена влиянию изменения расположения точки сварки в плоскости стола.

Еще одним фактором, влияющим на эффективность отсоса, является производственная необходимость регулирования мощности электрической дуги в связи с изменением вида сварочных работ.

Из полученных результатов следует, что изменение силы сварочного тока меньше влияет на эффективность сварочной панели. Расчеты показали, что при сварке с силой тока дуги  $I = 100 \text{ А}$  в центральной области

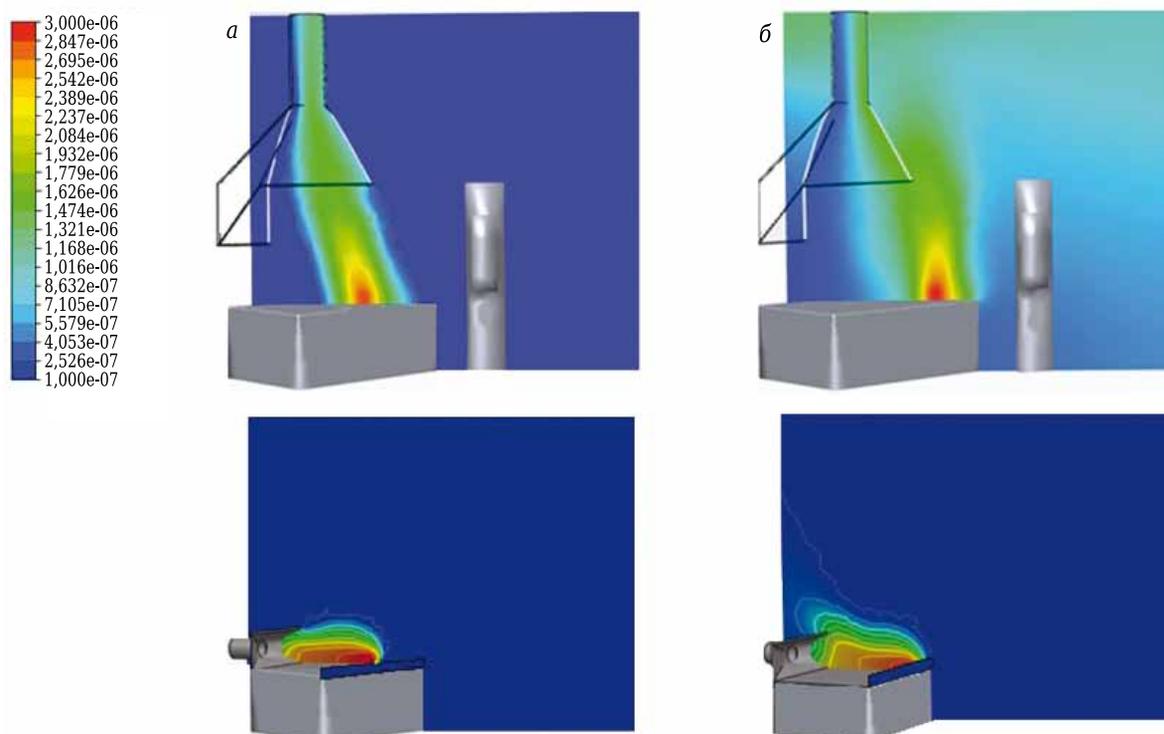
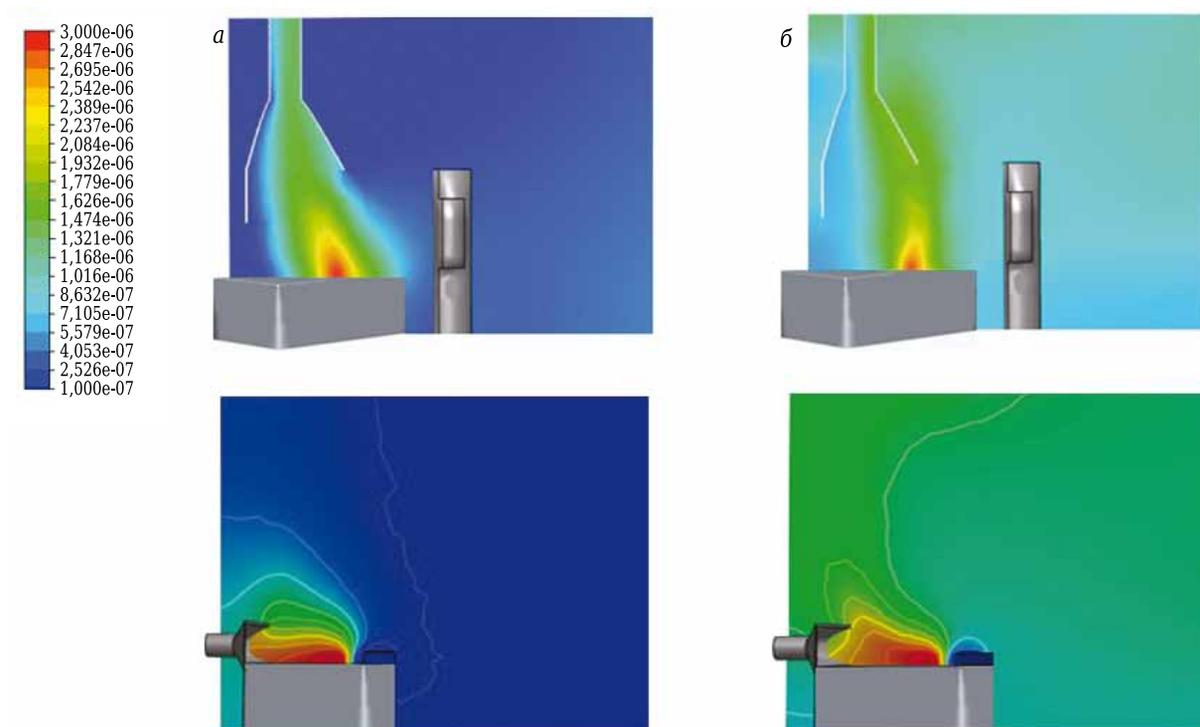


Рис. 5. Изменения распределения концентрации вредных выделений в рабочей зоне сварочного поста в зависимости от положения точки сварки при  $I = 600 \text{ А}$ ,  $V = 0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ : а — центральная зона; б — периферийная зона



**Рис. 6.** Изменение распределения концентрации вредных выделений в рабочей зоне сварочного поста в зависимости от силы сварочного тока при сварке в центральной зоне сварочного стола для производительностей панели  $V = 0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ , бокового отсоса  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ , передувa  $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ : а —  $I = 100 \text{ А}$ ; б —  $I = 600 \text{ А}$

стола для поддержания ПДК в рабочей зоне достаточно  $V$  до  $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ , а при силе тока дуги  $I = 600 \text{ А}$  до  $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ . Для последнего случая концентрация оксида  $C_{уд} = g/V = 3,6e-7/0,4 = 0,9 \text{ мг}/\text{м}^3$ , где  $g$  — интенсивность выделения оксида марганца. Для периферийных областей при токе  $I = 600 \text{ А}$  необходимый объем воздуха составляет  $0,4\text{--}0,6 \text{ м}^3/\text{с}$ , а концентрация в отсасываемом воздухе приближается к ПДК. Таким образом, сварочная панель при сварке в периферийной области работает в режиме общеобменной вытяжки, что не является энергосберегающим решением, так как местные вытяжные системы более энергоемки, чем общеобменные.

При отклонении влияющих факторов от оптимальных значений условия полного улавливания нарушаются и часть вредных выделений попадает в помещение. При отсутствии общеобменной вентиляции оценить величину выноса вредных примесей  $g_{вын}$  в помещение можно по формуле

$$g_{вын} = C_{ср.в пом} \cdot L_{отс}, \quad (3)$$

где  $C_{ср.в пом}$  — среднее значение концентрации вредных примесей в помещении;  $L_{отс}$  — общий расход воздуха, удаляемый всеми отсосами.

Коэффициент аспирации отсоса  $k_{асп}$  можно вычислить по формуле

$$k_{асп} = (g_{выд} - g_{вын})/g_{выд}. \quad (4)$$

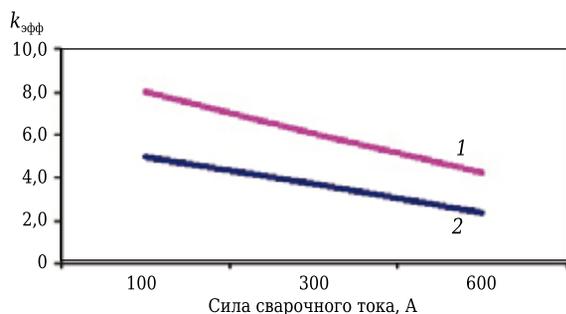
Числитель представляет собой количество вредных выделений, улавливаемых непосредственно от источника выделения. Остальная часть выделений  $g_{вын}$ , пройдя через помещение, возвращается в вытяжные устройства вместе с воздухом, компенсирующим их работу.

Величина  $g_{вын}$  может быть минимизирована двумя способами: путем усовершенствования конструкций отсосов или увеличением производительности местных отсосов, что будет вести к снижению концентрации вредных примесей в удаляемом воздухе  $C_{уд}$ . Поэтому для количественной оценки энергетической эффективности вытяжного устройства в работах [18, 19] наряду с производительностью местных отсосов и коэффициентом аспирации предлагается коэффициент эффективности:

$$k_{эфф} = k_{асп} \cdot \frac{C_{уд}}{C_{ПДК}}. \quad (5)$$

Работа местного вытяжного устройства считается эффективной при  $k_{эфф} > 1$ , так как его уменьшение свидетельствует о приближении режима работы местных отсосов к режиму работы общеобменной вытяжки.

На графиках показана зависимость коэффициента эффективности отсосов от величины сварочного тока при условии сварки в центральной области стола (рис. 7).



**Рис. 7.** Зависимость коэффициента эффективности отсоса от величины силы тока: 1 — сварочная панель; 2 — боковой отсос с передувом

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка оптимальных технических решений по организации вентиляции электросварочного производства возможна лишь в рамках предлагаемого комплексного подхода, основанного на рациональном совмещении местной вытяжной вентиляции рабочих мест и общеоб-

## Библиографический список

1. **Logachev, K. I.** On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet / *K. I. Logachev, A. M. Ziganshin, O. A. Averkova* // *Building and Environment*. — 2019. — Vol. 151. — P. 338–347.
2. **Посохин, В. Н.** Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования / *В. Н. Посохин*. — М.: Машиностроение, 1984. — 160 с.
3. **Месхи, Б. Ч.** Математическое и компьютерное моделирование формирования параметров производственной среды в целях проектирования и оптимизации систем вентиляции помещений / *Б. Ч. Месхи, Ю. И. Бульгин, А. Н. Легконогих, А. Л. Гайденко* // *Вестник ДГТУ*. — 2014. — № 2. — С. 46–55.
4. **Писаренко, В. Л.** Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве / *В. Л. Писаренко, М. Л. Рогинский*. — М.: Машиностроение, 1981 — 120 с.
5. **Минко, В. А.** Обеспыливающая вентиляция / *В. А. Минко, И. Н. Логачев, К. И. Логачев* [и др.]. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2010 — 565 с.
6. **Logachev, I. N.** Local exhaust ventilation: aerodynamic processes and calculations of dust emissions / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova*. — BocaRaton: CRC Press, 2015. — 576 p.
7. **Logachev, I. N.** Methods and means of reducing the power requirements of ventilation systems in the transfer of free-flowing materials / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova* // *Refract. Ind. Ceram.* — 2013. — Vol. 54, № 3. — P. 258–262.
8. **Логачёв, И. Н.** Способы и средства снижения энергоёмкости аспирационных систем при перегрузке сыпучих материалов / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* // *Новые огнеупоры*. — 2013. — № 6. — С. 66–70.
9. **Пухкал, В. А.** Энергосбережение в системах промышленной вентиляции / *В. А. Пухкал, К. О. Суханов, А. М. Гримитлин* // *Вестник гражданских инженеров*. — 2016. — № 6. — С. 156–162.

менной вентиляции помещений с применением методов математического и компьютерного моделирования.

Для основных типов стационарных отсосов установлена зависимость эффективности улавливания вредных веществ от следующих влияющих факторов: конструктивных особенностей отсосов, расположения точки сварки в плоскости стола, силы сварочного тока. Найдены сочетания влияющих факторов, обеспечивающие ПДК вредных примесей в рабочей зоне.

Полученные результаты могут применяться для разработки инженерных методов расчета и оптимизации вентиляционных устройств и систем, а также для анализа конструктивных и проектных решений по устройству вентиляции электросварочных производств при их реконструкции и модернизации.

\* \* \*

*Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10025).*

9. **Гримитлин, А. М.** Исследование подавления и локализации конвективных потоков от тепловыделяющего технологического оборудования с использованием метода математического моделирования / *А. М. Гримитлин, Р. Б. Знаменский, Г. Я. Крупкин, М. А. Луканина* // *Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад*. — 2011. — № 2. — С. 36–40.
10. **Гримитлин, А. М.** Вентиляция и отопление судостроительных производств / *А. М. Гримитлин, Г. М. Позин* // *Инженерно-строительный журнал*. — 2013. — № 6. — С. 7–11.
11. **Grimitlin, A. M.** Ventilation of electric welding production / *A. M. Gritmitlin* // *World Applied Sciences Journal*. — 2013. — Vol. 23, № 13. — P. 50–54.
12. **Шаптала, В. Г.** Вопросы комплексного обеспыливания производственных помещений предприятий промышленности строительных материалов / *В. Г. Шаптала, А. С. Горлов, Н. Н. Северин, Ю. М. Гусев* // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. — 2019. — № 1. — С. 81–85.
13. **Копин, С. В.** Компьютерное моделирование параметров приточно-вытяжной вентиляционной системы / *С. В. Копин* // *Безопасность труда в промышленности*. — 2020. — № 2. — С. 7–11.
14. **Лойцянский, Л. Г.** *Механика жидкости и газа* / *Л. Г. Лойцянский*. — М.: Наука, 1973. — 898 с.
15. **Патанкар, С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / *С. Патанкар*. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
16. **Versteeg, H. K.** *An Introduction to CFD in its volume method* / *H. K. Versteeg, W. Malasekera*. — London: Pearson Education Limited, 2007 — 517 p.
17. **Позин, Г. М.** Местная вытяжная вентиляция — самый эффективный способ организации воздухообмена в помещении / *Г. М. Позин* // *Журнал С.О.К.* — 2006. — № 10. — С. 106–111.

18. **Cao, Z.** A Comparison of concentrated contaminant removal in enclosure by using mixing ventilation and vortex ventilation / *Z. Cao, Y. Wang, M. Wang* // International Conference on Building Energy & Environment. — 2018. — P. 136–145.

19. **Cao, Z.** Performance evaluation of different air distribution systems for removal of concentrated emission contaminants by using vortex flow ventilation system / *Z. Cao, Y. Wang, C. Zhai, M. Wang* // Building and Environment. — 2018. — Vol. 142. — P. 211–220.

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

21. **Ovsyannikov, Y. G.** Reducing the power consumption of ventilation systems through forced recirculation / *Y. G. Ovsyannikov, A. B. Gol'tsov, A. S. Seminenko* [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 557–561.

**Овсянников, Ю. Г.** Снижение энергоемкости аспирационных систем за счет принудительной рециркуляции / *Ю. Г. Овсянников, А. Б. Гольцов, А. С. Семиненко* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2016. — № 10. — С. 64–68.

22. **Эльтерман, В. М.** Вентиляция химических производств / *В. М. Эльтерман*. — М.: Химия, 1980. — 288 с. ■

Получено 08.06.20

© В. В. Шаптала, К. И. Логачев, Н. Н. Северин, Е. Е. Хукаленко, Ю. М. Гусев, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**37<sup>th</sup> Assembly**  
**AMC**  
Advanced Materials Congress

**European**  
**Advanced Nanomaterials Congress**  
22 – 24 March 2021 | Stockholm, Sweden

JOIN US IN THE  
**CITY OF NOBEL**  
STOCKHOLM, SWEDEN

<https://www.advancedmaterialscongress.org/oct20/>