УДК 628.8.02

© М. А. Гримитлина, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: mgrimitlina@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-177-181

© М. А. Grimitlina, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: mgrimitlina@yandex.ru

СОСТОЯНИЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ АККУМУЛЯТОРНОГО ЗАВОДА

ASSESSMENT OF THE AIR POLLUTION AT THE BATTERY FACTORY

Приведены результаты обследования качества воздуха в производственных помещениях и в пределах санитарно-защитной зоны завода по производству свинцово-кислотных аккумуляторов. Использование устаревшего оборудования и «открытых» технологических процессов приводит к загрязнению воздушной среды производственных помещений и промышленной площадки выше допустимых значений. Выполнен анализ работы существующей местной вентиляции — безвихревых воздухораспределителей. С использованием метода математического моделирования показано влияние аэродинамического режима производственного помещения (боковой составляющей скорости) на эффективность работы безвихревых воздухораспределителей, которые установлены в производственных цехах. Показано, что при боковой составляющей скорости более 0,5 м/с вертикальный слаботурбулентный поток из безвихревых панелей разрушается и эффективность их использования резко снижается.

Ключевые слова: свинец, аэрозоль, загрязнение воздуха, безвихревые воздухораспределители, математическое моделирование.

The article presents the results of the air quality survey in production premises and within the sanitary protection zone of the factory producing lead-acid batteries. The use of the old equipment and «open» technological processes leads to the air environment pollution of industrial premises and industrial sites above the permissible values. The analysis of the existing irrotational air diffusers (namely, the ventilation facilities in the form of panels available at the factory) performance has been carried out. Using the method of mathematical modeling, the effect of the aerodynamic mode of the production premises (the lateral velocity component) on the efficiency of the operation of the ventilation panels installed in production workshops, is demonstrated. It is shown that with a lateral velocity component exceeding 0.5 m/s, the vertical low turbulent air current from the ventilation panels is broken down, and the production efficiency of these panels is considerably reduced.

Keywords: lead, aerosol, air pollution, irrotational air diffusers, mathematical modeling.

Аккумуляторная промышленность является крупнейшим потребителем свинца. При производстве аккумуляторов в машиностроении используется половина потребляемого в стране свинца. Концентрации свинца в воздухе городов, где есть аккумуляторная промышленность, превышают ПДК в несколько раз. В 1995 году суммарные выбросы в атмосферу семи аккумуляторных заводов России составили ориентировочно 38 т в пересчете на свинец. Свинец является одним из наиболее токсичных металлов и включен в списки приоритетных загрязнителей рядом международных организаций: ВОЗ, ЮНЕП, Американским агентством по контролю за токсичными веществами и заболеваниями

(CDC)¹. В США были проведены исследования влияния свинца и его соединений на здоровье людей, на основании которых установлена величина биологической ПДК, т. е. норматив свинца в крови детей, при котором уже возможны изменения психоневрологического характера. Наибольшую опасность для здоровья людей представляет аэрозоль свинца² [1, 2].

Обследование производства завода ЗАО «Электротяга», расположенного в Санкт-Петербурге, показало, что состояние воздушной среды в производственных помещениях старо-

¹ Свинец как источник загрязнения. URL: <http://www.km.ru/referats/81D15EDF4E4C448690482E24EC64BB84>.

² Там же.

го корпуса и на промплощадке не соответствует нормативным требованиям.

Результаты замеров концентраций аэрозоля свинца, выполненные ФГБУ «ГГО» А. И. Воейкова, в пределах санитарно-защитной зоны приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что концентрации соединений свинца вблизи промышленной площадки завода выше ПДК_{нм} свинца для населенных мест.

В табл. 2 приведены результаты измерений содержания свинца в воздухе рабочей зоны производственных помещений.

Концентрации соединений свинца в рабочей зоне производственных помещений превышают предельно допустимые величины ПДК_{рз} для рабочей зоны в 5–6 раз. Это связано с использованием устаревшего оборудования и «открытых» технологических процессов.

Производственные помещения оборудованы общеобменной и локальной вентиляцией. Для притока чистого воздуха на рабочие места в производственных помещениях завода используют специальные панельные воздухораспределители с фильтрами эффективной очистки, безвихревые воздухораспределители (БВВ). Приточный воздух подается сверху слаботурбулентным ниспадающим потоком на рабочие места, создавая «чистую зону» [3, 4]. БВВ устанавливают над технологическим оборудованием таким образом, чтобы оборудование находилось в области начального участка, в котором сохраняются заданные параметры струй. Удаление воздуха осуществляется местными отсосами по периметру

рабочих столов из нижней зоны. Расчетный объем удаляемого воздуха должен на 20–40 % превышать объем приточного воздуха [5].

Для эффективной работы БВВ при фиксированных размерах панелей, обеспечивающих подачу приточного воздуха, необходимо корректно определить скорость и температуру воздушного потока на выходе из БВВ. В работе [5] предложено использовать соотношение чисел подобия для определения скорости выходящего потока и показано, что скорость выходящего потока, равная 0,5 м/с, достаточна для подавления «загрязненного» конвективного потока при температурах изделий менее 90 °С. Угол расширения теплового следа определяется соотношением чисел Грасгофа Gr (гравитационные силы) и Re (силы инерции вынужденного потока). В диапазоне значений $Re/\sqrt{Gr} = 0,39...0,80$ имеет место подавление конвективного потока направленным слаботурбулентным потоком, выходящим из БВВ, а при значениях $Re/\sqrt{Gr} < 0,3$ происходит прорыв конвективного потока. Алгоритм расчета скорости выхода потока из БВВ, приведенный в [3–5], не учитывает аэродинамический режим производственного помещения, т. е. наличие боковых составляющих скорости потока, которые имеют место при формировании поля скоростей в объеме производственного помещения, что приводит к разрушению слаботурбулентного вертикального потока из БВВ и снижает эффективность их работы. Таким образом, качество воздушной среды на рабочих местах при проведении «открытых» технологических процессов будет зависеть от особенностей аэродинамиче-

Таблица 1

Приземные концентрации аэрозоля свинца в атмосферном воздухе вблизи завода ЗАО «Электротяга»

Контрольная точка	Концентрация аэрозоля свинца, доли ПДК _{рз} *	
	Средняя	Максимальная
Ул. Калинина, перед проходной завода	0,036	0,051
Сад им. 9 января	0,015	0,056
Ул. Маршала Говорова	0,016	0,034

* Значение ПДК_{рз} свинца принято 0,1 мг/м³, среднесуточная ПДК_{нм} свинца — 0,0003 мг/м³, источник: ГН 2.2.5.2100–06. ПДК загрязняющих веществ в воздухе рабочей зоны (с изм. от 03.11.2005, 04.02.2008, 27.01.2009). М., 2003. 268 с.

Таблица 2

Содержание аэрозоля свинца в воздухе рабочей зоны производственных помещений

Отделение	Концентрации, мг/м ³
Мельничное	0,16–0,53
Литейное	0,14–0,46
Пастоприготовительное	0,13–0,56
Разрубочное	0,3–0,6
Формировочное	0,17–0,27
Сборочное	0,062–0,29
Намазочное	0,18–0,58

ского режима производственных помещений (полей скорости воздуха).

Поле скоростей воздуха, которое формируется в производственном помещении, снижает эффективность работы «правильно» рассчитанной локальной вентиляции, что нередко приводит к выбиванию вредностей из укрытий, увеличивая, таким образом, концентрацию вредных веществ в рабочей зоне [5, 6]. При оценке эффективности работы БВВ важным фактором является влияние «боковой» составляющей скорости потока, которая формируется за счет работы общеобменной вентиляции, поступления наружного воздуха через окна и ворота, а также из соседних производственных помещений. Для оценки влияния «боковой» составляющей скорости потока на работу БВВ проводилось численное моделирование в формате 3D [7].

Реализация численного моделирования основана на решении системы уравнений:

- неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{U}_i + \bar{\rho}' u'_i) = S_m;$$

- сохранения импульса:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) = \\ = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + S_i, \end{aligned}$$

где t — время; x_i — пространственные координаты; U_i — компоненты вектора скорости; P — давление; ρ — плотность; τ'_{ij} — компоненты тензора напряжений; S_m — источник массы; S_i — источник импульса;

- конвективно-диффузного переноса для осредненной скалярной субстанции $\bar{a}$ (примесь, температура):

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a} \bar{U}_i)}{\partial x_i} = - \frac{\partial (\bar{\rho} u'_i \bar{a}')}{\partial x_i} + \bar{I}_a, \quad (3)$$

где $\bar{a}$ — удельная плотность скалярной величины; $\bar{I}_a$ — источник примеси.

Для дискретизации дифференциальных уравнений использован метод конечных объемов. Вблизи твердых поверхностей организовано сгущение расчетной сетки. Для учета турбулентности принималась модель турбулентности $k-\omega$. Концентрация аэрозоля задавалась как плотность потока массы, равномерно выделяющейся с поверхностей нагретого изделия.

Была выполнена серия расчетов с использованием программы «STAR CCM+» для открытых рабочих мест при различной комбинации параметров: скорости вертикального потока, боковой составляющей скорости, температуры обрабатываемых изделий и концентрации аэрозоля свинца. Рассматривалась совместная работа общеобменной и локальной вентиляции. Расчетная схема приведена на рис. 1.

Исходные данные для расчета:

- размер изделия $25 \times 30 \times 50$ мм, температура тела 40°C ;
- температура приточного воздуха 19°C ;
- скорость потока из БВВ $v_x = 0,5$ м/с;
- боковая составляющая скорости v_y при расчете варьировалась: 0; 0,25; 0,5; 0,75 м/с.

В табл. 3 приведены объемы воздуха, при которых проводился расчет.

Результаты расчетов показали, что эффективность работы БВВ зависит от распределения скорости воздуха в объеме производственного помещения [8]. При наличии боковой составляющей скорости $v_y = 0,25$ м/с происходит деформация вертикального слаботурбулентного потока над верхней гранью нагретого изделия. Ниспадающий поток из БВВ вследствие слабой турбулентности ($\epsilon < 1\%$) практически не расширяется и может рассматриваться как преграда, за которой образуется локальная застойная зона, где имеет место циркуляция потока. Попадание в эту зону вредных веществ от близкорасположенного оборудования может привести к превышению ПДК в этой области.

При величине поперечной составляющей скорости $v_y > 0,5$ м/с начинается разрушение «защитного» вертикального слаботурбулентного потока и эффективность работы БВВ снижается.

Рис. 1. Расчетная схема: а — локальная вентиляция БВВ и рабочий стол с нижним отсосом; б — моделируемый объем производственного помещения

Таблица 3

Объемы воздуха, принятые при расчете

Кратность воздухообмена, ч ⁻¹	$n = 0,7$	$n = 0,8$	$n = 1$	$n = 1,2$	$n = 1,5$
Объем воздуха БВВ, м ³ /ч	1360	1700	2040	2448	3060
Вытяжка местного отсоса, м ³ /ч	1901	2376	2851	3421	4277
Приток общеобменной вентиляции, м ³ /ч	541	676	811	973	1217

Примечание. n — кратность воздухообмена для расчетного объема производственного помещения

При скорости $v_y = 0,75$ м/с «защитный» поток от БВВ полностью разрушается (рис. 2).

Распределение концентраций аэрозоля свинца по объему цеха зависит от поля скорости. При возрастании поперечной составляющей скорости v_y увеличивается протяженность зоны загрязнения в направлении бокового потока. При $v_y = 0,75$ м/с зона повышенных концентраций локализуется в пределах $4h$, где h — высота изделия. Область безразмерных максимальных кон-

центраций превышает размеры рабочего стола, где установлено обрабатываемое изделие.

Выводы

Приведенные расчеты показывают, что на эффективность работы БВВ оказывает влияние поле скоростей воздуха, которое формируется в рабочем помещении. При боковой составляющей скорости более $v_y = 0,5$ м/с происходит разрушение «защитного» вертикального слаботурбулентного потока и эффективность работы БВВ резко снижается.

Корректная оценка эффективности работы БВВ и концентраций аэрозоля свинца на рабочих местах при открытом технологическом процессе может быть получена методом моделирования.

Библиографический список

1. Kosnett M. J., Wedeen R. P., Rothenberg S. J. et al. Recommendations for medical management of adult lead exposure. Environ Health Perspect 115. Pp. 463–471.
2. Ревич Б. А., Мизерницкий Ю. Л., Свердлов Ю. А. Оценка воздействия загрязнения окружающей среды г. Кольчугино Владимирской области на состояние здоровья детского населения. М.: Науч. центр «Окружающая среда – риск – здоровье», 1994. 42 с.
3. Патент РФ № 2011139920/05, 30.09.2011. Гримитлин А. М., Знаменский Р. Б., Крупкин Г. Я., Луканина М. А. Способ локализации конвективных потоков и вредных выделений от тепловыделяющего оборудования и безвихревой воздушораспределитель // Патент России № 2477185. 2013. Бюл. № 7.
4. Гримитлин А. М., Знаменский Р. Б., Крупкин Г. Я., Луканина М. А. Исследование подавления и локализации конвективных потоков от тепловыделяющего технологического оборудования с использованием метода математического моделирования // Инженерные системы. 2011. № 2. С. 36–40.

Рис. 2. Поля скорости в плоскости x - y : а — боковая составляющая скорости $v_y = 0,25$ м/с; б — боковая составляющая скорости $v_y = 0,75$ м/с

5. Знаменский Р. Б., Луканина М. А., Гримитлина М. А. Исследование способа локализации конвективных потоков и вредных выделений от тепловыделяющего оборудования // Приволжский научный журнал. 2015. № 1 (33). С. 64–71.

6. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Крупкин Г. Я. и др. Отопление и вентиляция производственных помещений. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2007. 400 с.

7. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Денисихина Д. М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2013. 192 с.

8. Дацюк Т. А., Гримитлина М. А. Оценка эффективности работы панельных воздухораспределителей // Материалы XV междунар. науч. конф. 19–29 сентября 2017 г. Порту, Португалия. С. 116–123.

References

1. Kosnett M. J., et al. *Recommendations for medical management of adult lead exposure*. Environ Health Perspect 115, pp. 463–471.

2. Revich B. A., Mizernitskiy Yu. L., Sverdlov Yu. A. *Otsenka vozdeystviya zagryazneniya okruzhayushchey sredy g. Kolchugino Vladimirskoy oblasti na sostoyanie zdorov'ya detskogo naseleniya* [Assessment of the environmental pollution impact of the settlement Kolchugino in the Vladimir region on the state of health of the children's population]. Moscow, Nauch. tsentr «Okruzhayushchaya sreda – risk – zdorov'e» Publ., 1994, 42 p.

3. Patent RF № 2011139920/05, 30.09.2011. Grititlin A. M., Znamenskiy R. B., Krupkin G. Ya., Lukanina M. A. *Sposob lokalizatsii konvektivnykh potokov i vrednykh vydeleniy ot teplovydelyayushchego oborudovaniya*

i bezvikhrevooy vozdukhoraspredelitel' [Technique of convective flows localization and harmful separation from the heat-generating equipment and irrotational air distributor]. Patent RF, no. 2477185, 2013. Bulletin no. 7.

4. Grititlin A. M., Znamenskiy R. B., Krupkin G. Ya., Lukanina M. A. *Issledovanie podavleniya i lokalizatsii konvektivnykh potokov ot teplovydelyayushchego tekhnologicheskogo oborudovaniya s ispol'zovaniem metoda matematicheskogo modelirovaniya* [Research of suppression and localization of convective flows from the heat-generating technology equipment with use of the mathematical simulation method]. *Inzhenernye sistemy – Engineering systems*, 2011, no. 2, pp. 36–40.

5. Znamenskiy R. B., Lukanina M. A., Grititlina M. A. *Issledovanie sposoba lokalizatsii konvektivnykh potokov i vrednykh vydeleniy ot teplovydelyayushchego oborudovaniya* [Research of the method of convective flows and harmful emissions localization from the heat-generating equipment]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal – Volga Scientific Journal*, 2015, no. 1 (33), pp. 64–71.

6. Grititlin A. M., et al. *Otoplenie i ventilyatsiya proizvodstvennykh pomeshcheniy* [Heating and ventilation of production premises]. St. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2007, 400 p.

7. Grititlin A. M., Datsyuk T. A., Denisikhina D. M. *Matematicheskoe modelirovanie v proektirovanii sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya* [Mathematical simulation at design of ventilation and air conditioning systems]. St. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2013, 192 p.

8. Datsyuk T. A., Grititlina M. A. *Otsenka ehffektivnosti raboty panel'nykh vozdukhoraspredeliteley* [Assessment of overall performance of the panelized air distributors]. *Trudy XV mezhdunar. nauch. konf. 19–29 sentyabrya 2017 g. Portu, Portugaliya* [Proc. of the XV int. sci. conf., September 19–29, 2017, Porto, Portugal], pp. 116–123.