

УДК 669:504

## МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ВТОРИЧНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРЕ

**Орелкина Д.И.**, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий (darya.oryolkina@yandex.ru)

**Петелин А.Л.**, д.ф.-м.н., профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий (sasha@misiss.ru)

**Полулях Л.А.**, доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий

**Подгородецкий Г.С.**, к.т.н., доцент, зав. кафедрой энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** Предложена модель расчета пространственного распределения вторичных газовых выбросов во внешних зонах влияния металлургических предприятий, основанная на принципе максимальной опасности. Описаны основные факторы, определяющие максимальный риск превышения допустимой концентрации вторичного выброса: образующий фактор, фактор распространения выбросов и фактор падения концентрации. Приведены принципиальные отличия методов расчета распространения первичных и вторичных газовых выбросов. В том числе определено, что образование вторичного выброса происходит не от точечного источника, а во всей области пространства, в которой концентрация вещества первичного выброса превышает его фоновую концентрацию в атмосфере. Использование данных ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и метода пространственно-распределенного источника позволило провести анализ поля концентрации вторичного выброса серной кислоты. Построены графики зависимостей концентрации  $H_2SO_4$  от удаленности от источника первичного выброса при различных скоростях ветра. Обнаружено, что функциональная зависимость концентрации  $H_2SO_4$  от расстояния имеет отчетливый максимум, положение которого и значение концентрации в котором можно определить для любой скорости ветра, зная среднюю мощность первичного выброса в течение заданного промежутка времени.

**Ключевые слова:** вторичные газовые выбросы, первичные газовые выбросы, выбросы предприятий черной металлургии, роза ветров, поле концентраций.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-300-305

Современные темпы промышленно-экономического развития сопровождаются, как правило, ростом загрязнения окружающей среды. Одними из крупнейших промышленных источников загрязнения воздушного бассейна являются предприятия черной металлургии [1]. С прошлого века и по настоящее время идет активная разработка моделей и программных приложений [2] по расчету распределения в атмосфере выбросов загрязняющих веществ. Наиболее высокие концентрации наблюдаются в воздухе городов (обычно они на 1 – 2 порядка больше, чем в сельской местности [3]), поэтому основные модели расчета распространения выбросов применимы к небольшим территориям, охватывающим город – промышленный центр и прилегающие районы. Одной из таких моделей, пользующейся популярностью в России, является система расчета ОНД-86 [4]. Однако оценки показывают, что вредные вещества распространяются на расстояния, превышающие сотни и даже тысячи километров [5]. Поэтому в данной работе рассматривается распространение выбросов вне промышленного центра, т. е. во внешней

зоне влияния предприятия. Имеющиеся модели так же не учитывают, что первичные выбросы, поступающие в атмосферу, являются прямыми предшественниками вторичных токсичных веществ, сильных летучих кислот. Распространение этих кислот, т. е. вторичных выбросов, зачастую опаснее, чем первичных.

Расчет интенсивности поступления кислот в атмосферу в том или ином регионе зависит от многих факторов. Среди них – удаленность и мощность источников выбросов, наличие в атмосфере катализирующих примесей, время года, условия атмосферного переноса и характер подстилающей поверхности. В силу многообразия и сложности параметров, влияющих на генерацию и перенос кислот, сделать детальное теоретическое описание процесса их распространения довольно непросто.

Для составления картины распределения вторичных выбросов в атмосфере необходимо знать исходные характеристики атмосферного воздуха в регионе, показывающие распределение вещества-предшественника от источника выбросов. В случае постоянно действующе-

го (стационарного) источника для анализа распределения вторичных выбросов в качестве исходных данных необходимо иметь стационарное во времени поле распределения концентраций первичных выбросов, зависящее от географии региона, рассматриваемого периода времени (месяца, времени года) и мощности выброса.

В работе [6] приведен пример расчета распространения газовых выбросов во внешней зоне влияния металлургического предприятия. В результате расчета получены карты-схемы распространения в регионе ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» оксидов серы и азота – эти вещества относятся к первичным выбросам предприятия. Модель, использованная для расчета распространения первичных выбросов, основана на принципе максимальной опасности и учитывает несколько факторов, необходимых для оценки максимального риска процесса распространения выбросов. Первый образующий фактор, без которого не обходится ни один расчет, это количество выбросов за заданный промежуток времени. Второй фактор распространения выбросов – это ветровой и диффузионный перенос. Диффузия происходит всегда, но достаточно медленно, в сравнение с другими процессами массопереноса. Ветровой перенос отражает направленное перемещение газовых выбросов силой ветра, в отличие от диффузии, которая в отсутствие других причин создает симметричное по всем направлениям поле концентраций. Ветровая нагрузка распределена неравномерно как по направлению, так и во времени.

Следующий фактор, химический, это фактор падения концентрации, характеризующий интенсивность взаимодействия компонентов выбросов с компонентами атмосферы. Он, как и диффузия, будет действовать всегда: и в штиль, и в шторм компоненты выбросов непрерывно реагируют с компонентами окружающей среды.

Именно эти три фактора и определяют максимальный риск при распространении газовых выбросов. Увеличение количества параметров, описывающих процесс распространения выбросов, только снижает расчетный уровень концентрации вредных веществ в атмосфере, но при этом не дает реального значения концентрации. В то же время снижение рассчитанного значения уровня загрязнения хоть и приближает расчетные значения к реальным, но не отражает опасного уровня загрязнения, который может достигаться при определенных погодных и других условиях и угрожать здоровью людей.

В данной работе приведен метод расчета вторичных выбросов, основанный на принципе максимальной опасности. Как уже отмечалось, точный расчет принципиально невозможен и нецелесообразен. Поэтому в расчете учитываются те же факторы распространения и снижения концентрации, что и при расчете первичных выбросов: вещество распространяется за счет ветрового и диффузионного переноса; снижение концентрации осуществляется за счет химической активности ком-

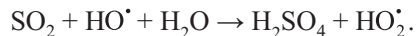
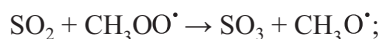
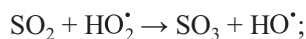
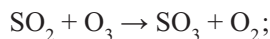
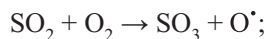
понента выброса с компонентами окружающей среды, осаждения, вымывания и пр. Однако есть несколько важных отличительных признаков, относящихся к процессу образования в атмосфере вторичных выбросов.

- Вещество первичного выброса поступает в атмосферу уже в готовом виде. А для образования в атмосфере любого компонента вторичного выброса необходимо нахождение в атмосфере вещества-предшественника: любой компонент вторичного выброса является продуктом реакции компонента первичного выброса с компонентами атмосферы. Таким образом, для проведения расчета образования и распределения вещества вторичного выброса необходимо иметь рассчитанное поле распределения (поле концентраций) первичного выброса – вещества-предшественника.
- Почему в качестве исходных данных мы нуждаемся не в количестве выброса первичного вещества, а в рассчитанном поле концентраций первичного выброса? Ответом на этот вопрос является второй признак расчета образования и распространения вторичных выбросов. В отличие от первичных выбросов, источником вторичных является не единый стационарный источник. Это область пространства, в которой концентрация вещества-предшественника (первичного выброса) превышает фоновую концентрацию в атмосфере. Распределение первичного выброса зависит от удаленности от самого предприятия и неоднородно по направлениям-радиусам вследствие розы ветров данного географического региона. Это важное отличие ставит задачу создания модели расчета распространения выброса от непрерывного пространственно-распределенного источника.

Решить задачу аналитически, т. е. создать систему уравнений, позволяющую по исходным данным конкретной точки пространства определить концентрацию в этой точке вторичного выброса, не представляется возможным. Однако современные технологии позволяют решить эту задачу с помощью программных продуктов, предназначенных для математических и технических вычислений.

Будем считать, что поле концентраций первичного выброса уже рассчитано. В частности, для ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») это сделано в работе [7]. Используя поле концентраций первичного выброса  $\text{SO}_2$  для ОАО «ММК» за 2013 г., рассчитаем значения поля концентраций вторичного выброса, являющегося продуктом реакции оксида серы с окружающей средой.

Определим вещество, которое будем рассматривать в качестве вторичного выброса. Ниже приведены реакции  $\text{SO}_2$  с основными окислительными компонентами земной атмосферы [8]:



Видно, что вторичными выбросами являются  $\text{SO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Однако образовавшийся при окислении триоксид с большой скоростью [9] превращается в серную кислоту по реакции



Время жизни триоксида составляет примерно  $10^{-5}$  с. В свою очередь, время жизни  $\text{H}_2\text{SO}_4$  оценивается величиной около 50 ч [10]. Поэтому примем допущение, что в результате химических реакций вся сера из диоксида переходит в кислоту. Общая скорость окисления  $\text{SO}_2$ , полученная эмпирическим путем, равна  $k_{\text{SO}_2} = 0,027 \text{ ч}^{-1}$  [11]. Эта же величина с учетом принятых допущений является скоростью образования кислоты.

В поле концентраций первичного выброса проведем 8 радиус-векторов из области, где расположено предприятие, как из центра 8 лучей, в соответствии с географическими направлениями розы ветров. Рассмотрим один из лучей. Разобьем его на мелкие участки длиной  $\Delta x$  каждый. Каждой  $i$ -й точке разбиения, расположенной на определенном расстоянии от центра, сопоставим концентрацию первичного выброса, соответствующую этому расстоянию  $C_{Ai}$  (здесь и далее индексами  $A$  и  $B$  обозначены первичные и вторичные выбросы соответственно). В начальный момент времени концентрация  $\text{SO}_2$  определяется средней мощностью выброса вещества в единицу времени  $m_A$ , мг/с, скоростью ветра  $v$ , м/с и площадью выноса выброса  $S$ , м<sup>2</sup>. Площадью выноса будем считать сечение ветрового коридора высотой  $h = 100$  м (высота трубы) и шириной  $\delta$  (диаметр предприятия), по которому вещество выброса поступает в воздушное пространство:

$$C_{A0} = \frac{m_A}{vS}. \quad (1)$$

Согласно работе [12], концентрация первичного выброса  $\text{SO}_2$  на расстоянии  $x$  от источника выбросов определяется по формуле

$$C_{Ai} = C_{A0} e^{\frac{k_A + b_A x}{v}}, \quad (2)$$

где  $k_A$  – константа скорости окисления  $\text{SO}_2$  в атмосфере;  $b_A$  – величина, характеризующая диффузионный перенос. Согласно [12]  $b$  можно найти по формуле

$$b_A = \frac{2D}{\delta\sqrt{\pi Dt}} e^{\frac{-\delta^2}{16Dt}}, \quad (3)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии  $\text{SO}_2$  в воздухе;  $t$  – время распространения первичного выброса, с.

В дальнейших расчетах величиной  $b_A$  можно пренебречь, так как она на несколько порядков меньше  $k_A$ .

Переходя от точки к точке (удаляясь от источника), количество  $\text{SO}_2$  будет изменяться (уменьшаться) на величину  $\Delta C_{Ai}$ :

$$\Delta C_{Ai} = C_{A(i-1)} - C_{Ai}. \quad (4)$$

Как уже говорилось выше, в результате химических реакций вся сера из диоксида  $\text{SO}_2$  переходит в кислоту  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , поэтому определить количество образовавшейся кислоты на промежутке, разделяющем точки  $(i-1)$  и  $i$ , можно по формуле

$$\Delta C_{Bi} = \Delta C_{Ai} \frac{M_B}{M_A}, \quad (5)$$

где  $M_A$  и  $M_B$  – молярные массы  $\text{SO}_2$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  соответственно.

В любой точке  $i$  количество вторичного выброса  $\text{H}_2\text{SO}_4$  будет определяться величиной вещества  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , перешедшего из точки  $(i-1)$  в точку  $i$  под действием ветра. Удаляясь от источника выброса, количество этого вещества будет уменьшаться за счет химического фактора, аналогично процессу распространения первичных выбросов. Однако, согласно формулам (4), (5), в это же время в точке  $i$  образуется некоторое дополнительное количество кислоты  $\Delta C_{Bi}$ . Таким образом, величину вторичного выброса  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в точке  $i$  можно рассчитать по формуле

$$C_{Bi} = C_{B(i-1)} e^{\frac{-k_B \Delta x}{v}} + \Delta C_{Bi}, \quad (6)$$

где  $k_B$  – константа скорости нейтрализации  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в атмосфере;  $\Delta x$  – расстояние между точками  $i$  и  $(i-1)$ .

Для расчета вышеописанным методом необходимо использовать стандартные компьютерные программы, применяемые для решения математических задач типа Mathcad, MATLAB, Mathematica. Задача с таким алгоритмом решается даже с помощью Microsoft Excel.

В качестве примера на основе данных работ [13–15] рассмотрим распространение  $\text{H}_2\text{SO}_4$  вдоль одного из радиус-векторов во внешней зоне влияния ОАО «ММК» при скорости ветра 1 м/с. На гистограмме показано распределение вторичного выброса в зависимости от расстояния от источника первичного выброса (рис. 1). Черным обозначено количество образовавшейся кислоты в точке  $i$  за временной промежуток, разделяющий точки  $i$  и  $(i-1)$ . С увеличением расстояния от источника первичного выброса количество вторичного

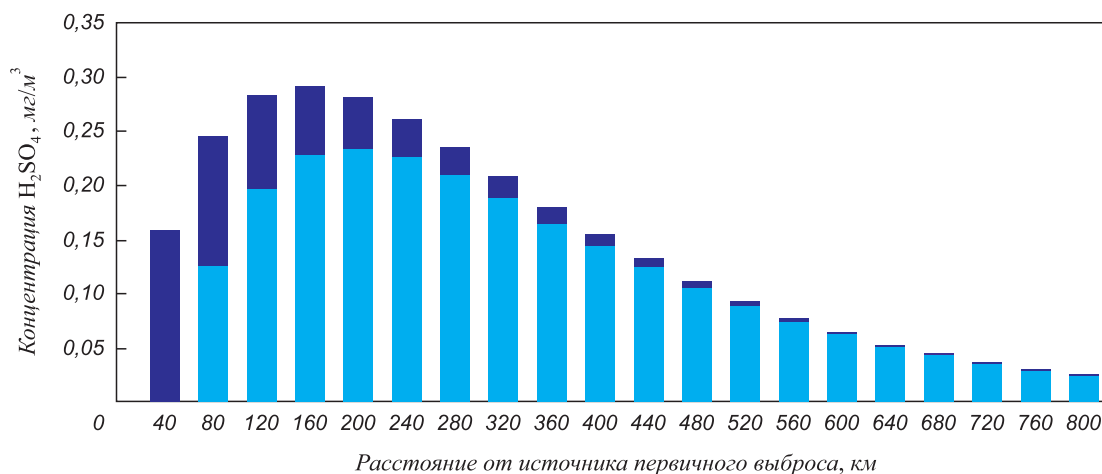


Рис. 1. Распределение вторичного выброса  $H_2SO_4$  в зависимости от расстояния от источника первичного выброса при скорости ветра 1 м/с по данным ОАО «ММК» за 2013 г.

Fig. 1. Distribution of secondary  $H_2SO_4$  emission depending on the distance from the source of the primary emission at wind speed of 1 m/s according to the data of OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" in 2013

выброса, образующегося в каждой следующей точке, постепенно уменьшается, так как уменьшается количество компонента-предшественника. Серым цветом обозначено количество кислоты в точке  $i$ , перешедшей из точки  $(i - 1)$ . Видно, что количество вещества, перешедшего из предыдущей точки, уменьшилось. Это произошло за счет химического фактора.

Достаточно долгое время жизни кислоты в атмосферном воздухе и постоянный распределенный ее источник являются причинами накопления кислоты в воздухе. Концентрация вторичного выброса меняется от точки к точке и в определенный момент времени достигает максимума. На рис. 2 показано, что при увеличении скорости ветра максимум будет смещаться (удаляться) от источника первичного выброса. Значение концентрации  $H_2SO_4$  в точке максимума с изменением скорости ветра так же будет меняться. Из графика видно, что при распространении кислоты наибольшей опасностью для населения, проживающего на расстояниях нескольких сотен километров от ОАО «ММК», являются погодные условия с незначительной средней скоростью ветра. Однако для населения, проживающего на больших расстояниях, опасность представляют как раз большие скорости ветра.

Поскольку изменение величины и положения максимума наблюдается при изменении скорости ветра, при этом для конкретного вещества (в данном случае  $H_2SO_4$ ) и предприятия остальные параметры, такие как количество выбросов, химическая активность и другие остаются неизменными, то можно рассчитать зависимость величины и расположения максимума от скорости ветра. Для ОАО «ММК» расстояние от источника до максимума концентрации составит  $s \approx 154\,000v$ , м. Максимум концентрации  $H_2SO_4$  при заданной мощности выброса составит  $C_{Bmax} = 0,262/v$ ,  $mg/m^3$ . Можно выразить значение концентрации в максимуме через  $m_A$ ,

тогда будем иметь:  $C_{Bmax} = 5,29 \cdot 10^{-7} m_A/v$ ,  $mg/m^3$ . Последнюю формулу удобно использовать при изменении мощности выброса, например, при аварийном залповом выбросе  $SO_2$ . Расчет может быть проведен оперативно, его результаты покажут максимально возможный риск превышения допустимой концентрации и установят место и время его появления.

Анализ распределения концентраций вторичных газовых выбросов может быть осуществлен вдоль любого из географических направлений региона расположения металлургического предприятия. Действительно, роза ветров для каждой местности содержит средние скорости ветра на любой заданный интервал времени в течение года для каждого из восьми радиус-векторов, соответствующих сторонам света. Таким образом, при

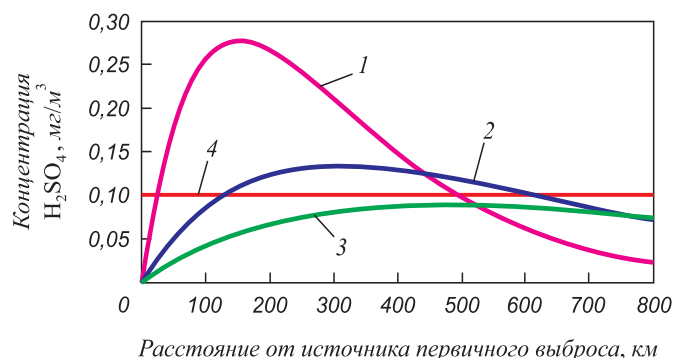


Рис. 2. Распределение вторичного выброса  $H_2SO_4$  в зависимости от расстояния от источника первичного выброса при скоростях ветра, м/с:

1 – 1; 2 – 2; 3 – 3 (4 – ПДК<sub>сс</sub>  $H_2SO_4$ ) по данным ОАО «ММК» за 2013 г.

Fig. 2. Distribution of secondary  $H_2SO_4$  emission depending on the distance from the source of the primary emission at wind speeds, m/s: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 3 (4 – MPC of  $H_2SO_4$ ) according to the data of OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" in 2013

известной мощности первичного выброса с помощью информации, имеющейся в розе ветров, предлагаемая модель позволяет построить полное стационарное пространственное поле распределения концентраций вторичного выброса во внешней зоне влияния металлургического предприятия. Пример такого построения с наложением поля концентраций на географическую карту приведен в работе [7].

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Варенков А.Н., Костиков В.И. Химическая экология и инженерная безопасность металлургических производств: Учеб. пособие для вузов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 20 с.
2. Федосов А.А. Моделирование распространения выбросов вредных веществ в пограничном слое атмосферы // Теплоэнергетика. 2006. № 5. С. 34 – 40.
3. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов М.П. Промышленность и окружающая среда. – М.: ИКЦ Академкнига, 2004. – 469 с.
4. ОНД – 86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 68 с.
5. Карабасов Ю.С., Чижикова В.М. Экология и управление природопользованием: Учебник для вузов. – М.: Изд. МИСиС, 2006. – 712 с.
6. Petelin A.L., Yusfin Yu.S., Orelkina D.I., Vishnyakova K.V. Predicting the risk of generalized air pollution by metallurgical enterprises // *Steel in Translation*. 2013. Vol. 43. No. 9. P. 539 – 543.
7. Orelkina D.I., Petelin A.L., Polulyakh L.A. Distribution of Secondary Gas Emissions around Steel Plants // *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 11. P. 811 – 814.
8. Исидоров В.А. Экологическая химия: Учебное пособие для вузов. – СПб: Химиздат, 2001. – 304 с.
9. Филлов В. А. Вредные вещества в окружающей среде. Элементы I – IV групп периодической системы и их неорганические соединения. – СПб: НПО «Профессионал», 2005. – 462 с.
10. Новиков З. Ю. Экология, окружающая среда и человек. – М.: Химиздат, 1998. – 316 с.
11. Гольдманская Л.Ф. Химия окружающей среды. – М.: Мир, 2007. – 68 с.
12. Vishnyakova K.V., Petelin A.L., Yusfin Yu.S. Diffusion spreading of the emitted metallurgical gas // *Defect and diffusion forum*. 2011. Vol. 309 – 310. P. 239 – 242.
13. Социальный отчет за 2012 г. Открытое акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат». [http://mmk.ru/about/responsibility/social\\_report/](http://mmk.ru/about/responsibility/social_report/) (дата обращения: 15.09.2015)
14. Научно-прикладной справочник «Климат России». <http://aisori.meteo.ru/ClspR> (дата обращения: 15.09.2015)
15. Квашинин И.М. Предельно допустимые выбросы предприятий в атмосферу. Рассеивание и установление нормативов. – М.: АВОВ-ПРЕСС, 2008. – 26 с.

Поступила 30 марта 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 5, pp. 300–305.

## CALCULATION MODEL FOR THE CONCENTRATION OF SECONDARY METALLURGICAL EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE

D.I. Orelkina, A.L. Petelin, L.A. Polulyakh, G.S. Podgorodetskii

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

**Abstract.** The model for calculating the distribution of secondary gas emissions in the outer influence zone of metallurgical enterprises is proposed. The model is based on the principle of maximum danger. The main factors that determine the risk of exceeding the maximum allowable concentration of the secondary emissions are denoted. There are the forming factor, the distribution emissions factor and the concentration shrinkage factors. Fundamental differences of calculation methods of primary and secondary gas emissions were shown. There was also defined that the formation of secondary emission occurs in the volume of air space in which the concentration of primary emission exceeds its background concentration in the atmosphere. The analysis of the secondary emissions concentration as a function of the distance from OJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” was built with the help of the spatially distributed source method. Graphs of the  $H_2SO_4$  concentration depending on the distance from the source of the primary emission were built at different wind speeds. It has been found that the function of the concentration dependence on distance has a distinct maximum which value can be determined for any wind speed, knowing the average power of the primary emissions for a specific time period.

**Keywords:** secondary gas emissions, primary gas emissions, steel plant emissions, wind patterns, concentration field.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-300-305

## REFERENCES

1. Varenkov A.N., Kostikov V.I. *Khimicheskaya ekologiya i inzhenernaya bezopasnost' metallurgicheskikh proizvodstv. Uchebnoe posobie dlya VUZov* [Chemical ecology and engineering safety of metallurgical production: Textbook for universities]. Moscow: Intermet Inzhenering, 2000, 20 p. (In Russ.).
2. Fedosov A.A. Simulation of pollutant dispersion in the boundary layer of the atmosphere. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*. 2006, vol. 53, no. 5, pp. 367–373.
3. Yusfin Yu.S., Leont'ev L.I., Chernousov M.P. *Promyshlennost' i okruzhayushchaya sreda* [Industry and environment]. Moscow: IKTS Akademkniga, 2004, 469 p. (In Russ.).
4. OND – 86. *Metodika rascheta kontsentratsii v atmosfernom vozdukhue vrednykh veshchestv, soderzhashchikhsya v vybrosakh predpriyatii* [OND 86. System for calculating the air concentrations of pollutants from industrial enterprises]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. (In Russ.).
5. Karabasov Yu.S., Chizhikova V.M. *Ekologiya i upravlenie prirodopol'zovaniem, uchebnik dlya vuzov* [Ecology and environmental management, Textbook for universities]. Moscow: Izd. MISiS, 2006, 712 p. (In Russ.).
6. Petelin A.L., Yusfin Yu.S., Orelkina D.I., Vishnyakova K.V. Predicting the risk of generalized air pollution by metallurgical enterprises. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 9, pp. 539–543.
7. Orelkina D.I., Petelin A.L., Polulyakh L.A., Distribution of secondary gas emissions around steel plants. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 11, pp. 811–814.
8. Isidorov V.A. *Ekologicheskaya khimiya: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Environmental Chemistry: A University Textbook]. St. Petersburg: Khimizdat, 2001, 304 p. (In Russ.).
9. Filov V.A. *Vrednye veshchestva v okruzhayushchei srede. Elementy I–IV grupp periodicheskoi sistemy i ikh neorganicheskie soedineniya* [Harmful substances in the environment. Elements of I–IV Groups of the periodic system and their inorganic compounds]. St. Petersburg: NPO “Professional”, 2005. 462 p. (In Russ.).

10. Novikov Z.Yu. *Ekologiya, okruzhayushchaya sreda i chelovek* [Ecology, environment and people]. Moscow: Khimizdat, 1998, 316 p. (In Russ.).
11. Gol'danskaya L.F. *Khimiya okruzhayushchei sredy* [Environmental chemistry]. Moscow: Mir, 2007, 68 p. (In Russ.).
12. Vishnyakova K.V., Petelin A.L., Yusphin Yu.S. Diffusion Spreading of the Emitted Metallurgical Gas. *Defectand Diffusion Forum*. 2011, vol. 309–310, pp. 239–242.
13. *Sotsial'nyi otchet za 2012 god. Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo "Magnitogorskii metallurgicheskii kombinat"* [Social report of 2012. OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works]. Available at URL: [http://mmk.ru/about/responsibility/social\\_report/](http://mmk.ru/about/responsibility/social_report/) (In Russ.).
14. *Nauchno-prikladnoi spravochnik "Klimat Rossii"* [Climate of Russia, scientific applied handbook]. Available at URL: <http://aisori.meteo.ru/CIsprR> (In Russ.).
15. Kvashnin I.M. *Predel'no dopustimye vybrosy predpriyatii v atmosferu. Rasseivanie i ustanovlenie normativov* [Maximum permissible

emissions of enterprises in the atmosphere. Dispersion and setting standards]. Moscow: AVOK-PRESS, 2008, 26 p. (In Russ.).

#### **Information about the authors:**

**D.I. Orelkina**, Postgraduate of the Chair "Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies" (darya.oryolkina@yandex.ru)

**A.L. Petelin**, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor of the Chair "Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies" (sasha@misis.ru)

**L.A. Polulyakh**, Assist. Professor of the Chair "Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies"

**G.S. Podgorodetskii**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair "Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies"

Received March 30, 2016