



Оригинальная статья

УДК 581.5:504.5

DOI 10.17073/0368-0797-2022-4-246-253

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2295>



ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ И ПЫЛЕВЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ ВО ВНЕШНЕЙ ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

О. С. Нуржанов, Г. В. Торохов, П. И. Черноусов, Д. В. Чезганова

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

Аннотация. В исследовании представлена методика расчета распространения пылевых и аэрозольных частиц, поступающих во внешнюю воздушную среду в результате техногенных выбросов предприятий металлургического цикла. В работе предложен способ прогнозирования степени загрязнения зон влияния предприятий посредством построения географических карт-схем промышленных регионов с нанесением на них областей с повышенным содержанием пылевых частиц. Метод базируется на определении времени седimentации частиц пыли разных фракций в атмосферном воздухе с помощью закона Стокса (движение твердых частиц в жидкой или газообразной средах), высоты вылета частиц пыли из дымовой трубы и скорости преобладающего ветра за исследуемый период времени. Необходимые для анализа данные (направление ветра, количество выбрасываемой пыли, ее фракционный и химический составы) найдены в открытых источниках, отчетах предприятия, статистических данных региона и металлургической промышленности. Проведен оценочный расчет распространения пылевых выбросов на примере предприятия ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в течение различных годовых сезонов. Обнаружено, что влияние деятельности металлургического предприятия России может пагубно сказываться на городах и жителях соседних государств, которые находятся в зоне седimentации твердых пылевых частиц. Рассмотрен вопрос переноса серной и азотной кислот частицами пыли, которые образуются в порах частиц аэрозоля. Рассчитано количество кислоты, которое может быть вынесено в зоны влияния предприятия в порах твердых пылевых частиц. Рассматриваемая модель расчета позволяет относительно быстро и просто оценить зону влияния предприятия, оценить риски и принять меры по модернизации, оптимизации производственного процесса или систем аспирации.

Ключевые слова: техногенные выбросы, металлургия, распространение, аэрозоли, пыль

Для цитирования: Нуржанов О.С., Торохов Г.В., Черноусов П.И., Чезганова Д.В. Пространственное распространение аэрозольных и пылевых техногенных выбросов во внешней зоне влияния металлургических предприятий // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 4. С. 246–253. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-246-253>

Original article

SPATIAL DISTRIBUTION OF AEROSOL AND DUST MAN-MADE EMISSIONS IN EXTERNAL INFLUENCE ZONE OF METALLURGICAL ENTERPRISES

O. S. Nurzhanov, G. V. Torokhov, P. I. Chernousov, D. V. Chezganova

■ National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

Abstract. The study presents the method for calculating the distribution of dust and aerosol particles entering the external air environment as a result of man-made emissions of metallurgical cycle enterprises. The paper proposes the method for predicting the degree of pollution of the enterprises influence zones by constructing geographical maps-schemes of industrial regions with application of the areas with a high content of dust particles on them. This method is based on determination of the sedimentation time of dust particles of different fractions in atmospheric air using Stokes' law (motion of solid particles in liquid or gaseous media), the height of dust particles departure from the chimney and the speed of prevailing wind over the studied period of time. The data necessary for the analysis (wind direction, amount of dust emitted, its fractional and chemical compositions) were found in open sources, reports of the enterprise, statistical data of the region and the metallurgical industry. An estimated calculation of the spread of dust emissions was carried out on the example of the Magnitogorsk Iron and Steel Works PJSC (MMK) during various annual seasons. It was found that the influence of activity of a metallurgical enterprise in Russia can adversely affect cities and residents of neighboring states that are located in the sedimentation zone of solid dust particles. The issue of transfer of sulfuric and nitric acids by dust particles formed in the pores of aerosol particles is considered. The authors calculated the amount of acid that can be carried into the zones of influence of the enterprise in the pores of solid dust particles. The considered calculation model makes it relatively quick and easy to assess the influence zone of the enterprise, assess risks and take measures to modernize, optimize the production process or aspiration systems.

Keywords: technogenic emissions, metallurgy, distribution, aerosols, dust

For citation: Nurzhanov O.S., Torokhov G.V., Chernousov P.I., Chezganova D.V. Spatial distribution of aerosol and dust man-made emissions in external influence zone of metallurgical enterprises. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 4, pp. 246–253. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-246-253>

ВВЕДЕНИЕ

Металлургия – один из основных источников загрязнения окружающей воздушной среды техногенными выбросами. В процессе производства металлургического предприятия постоянно выбрасывает в атмосферу значительное количество летучих производственных отходов [1], которые оказывают отрицательное влияние как на повседневную жизнь, так и на здоровье людей, работающих на этом предприятии и проживающих в областях, которые находятся под влиянием его атмосферных выбросов [2]. Для краткости назовем эти области зонами влияния металлургического предприятия. Прогнозирование и предотвращение действия угнетающих факторов техногенных выбросов в атмосферу на здоровье и другие сферы жизнедеятельности людей требуют проведения анализа и контроля общего состояния распространения летучих выбросов в промышленных регионах [3].

Летучие выбросы металлургических предприятий – это вещества, являющиеся отходами технологических процессов [4]. Поступать в атмосферный воздух могут те из этих веществ, которые образуют газовые соединения и выходят во внешнюю среду вместе с отходящими газами, или частицы, представляющие собой мелкодисперсную фракцию твердых и жидких веществ, образующие взвешенную в отходящих газах смесь частиц, состоящих из пыли и аэрозолей [5, 6]. Дальнейшее распространение этих веществ от места их выброса (попадания в атмосферный воздух) зависит от агрегатного состояния (газовые или конденсированные вещества, то есть твердые или жидко-твердые мелкие частицы). Основные вопросы, возникающие относительно поведения этих групп летучих выбросов после того, как они попали во внешнюю по отношению к предприятию среду, следующие: во-первых, какие химические изменения могут с ними произойти при контакте с веществами, содержащимися в воздухе; во-вторых, как быстро могут произойти эти изменения и какие повлекут за собой последствия [7, 8]; в-третьих, как далеко могут распространяться во внешнем воздушном пространстве летучие выбросы каждой из групп и от чего это зависит. Эти вопросы возникают, поскольку от взаимодействия компонентов выбросов с внешней средой зависит, насколько изменится (понижится или повысится) их вредность (токсичность) при этом взаимодействии. Также немаловажно, какие территории вблизи и вдали от предприятия окажутся под влиянием опасных продуктов выбросов, как далеко они могут распространиться и как меняется степень их воздействия с расстоянием.

Вначале необходимо рассмотреть вопрос, связанный с расстоянием распространения, то есть вопрос зоны влияния предприятия. Общую зону влияния можно разделить на внутреннюю и внешнюю основные части. Внутренней зоной влияния считается территория самого предприятия. К ней также относятся близлежащие районы, где проживают люди, которые работают непосредственно на предприятии, а также находятся различные службы обеспечения, такие как магазины, столовые и другие элементы инфраструктуры населенного района.

Размеры рассматриваемой зоны могут быть от нескольких километров до нескольких десятков километров в зависимости от специфики предприятия, его производительности и географических условий расположения. Эта зона непосредственно подвержена воздействию всех вредных факторов при попадании выбросов предприятия в воздух. Основным при этом является то обстоятельство, что количество выбросов в этой зоне максимально, все вещества сосредоточены в малой области пространства, имеется большое количество преград (стены цехов и жилых зданий) для их распространения. Узкие коридоры открытых проходов, проездов, улиц создают преимущественные направления перемещения летучих выбросов, поэтому существует неоднородность распределения поступающих из цеховых участков вредных веществ, образуются локальные их накопления («карманы»). Определение характера распределения летучих веществ и степени токсичности в условиях ближней зоны влияния – непростая расчетная задача. Существуют разнообразные компьютерные модели, содержащие «подгоночные» параметры, которые позволяют учитывать зависимость распределения вредных выбросов от масштабов предприятия, габаритов заводских цехов, геометрии их расположения [9 – 12]. Для обеспечения норм безопасности при строительстве и эксплуатации металлургических предприятий используются система ОНД-86 [13] и ее усовершенствованные модификации, приспособленные для различных производственных условий, климатических и географических особенностей конкретных предприятий.

Внешняя зона влияния – это открытое воздушное пространство за пределами металлургического центра (является «резервуаром»), в котором распространяются все летучие компоненты, выделяемые предприятием и не осевшие, не поглощенные внутренней зоной влияния. Фактически внешняя зона влияния – это воздух, которым дышат люди, находящиеся иногда за сотнями километров от самого предприятия, поскольку для

переноса вредных выбросов нет преград [14]. Дальность выноса вредных веществ по воздуху зависит от природных условий (рельефа местности, направления ветра, влажности, температуры). У внешней зоны влияния нет постоянной границы, поскольку условия распространения летучих выбросов все время меняются, они зависят от погоды в каждый момент времени. Создание общей картины распространения летучих выбросов внутри внешней зоны влияния предприятий выходит на первый план, то есть фактически на всей территории с измененным составом нижних слоев атмосферы и земной поверхности. В работах [15 – 18] рассматривается распространение первичных газовых выбросов металлургического производства, образование в атмосферном воздухе вторичных газовых веществ, пространственное распределение первичных и вторичных соединений металлургического происхождения на дальних подступах к промышленным регионам. Однако значительную часть летучих выбросов составляют не газы, а аэрозольные и пылевые частицы, мощность этой части выбросов для металлургических предприятий полного цикла может составлять несколько десятков тыс. т в год (24,5 тыс. т в год – ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»; 26,1 тыс. т в год – ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»).

Задача настоящей работы – определение характера распространения во внешней зоне влияния летучих металлургических выбросов. В предлагаемом подходе используется та же принципиальная основа, которая была базовой для развития моделей распространения газовых выбросов [19, 20]. Перечислим основные допущения и смысловые акценты способа исследования распределения летучих выбросов предприятий во внешней среде вдали от самих предприятий:

- предприятие (металлургический завод с учетом всех подразделений, входящих в его состав) рассматривается как стационарный источник выбросов, что означает, что мощность выделяемого в атмосферу вещества каждого из компонентов выбросов (количество компонента, выбрасываемого в единицу времени) постоянно за рассматриваемый период времени;

- необходимо учитывать распространение веществ в приземном слое воздуха, высота которого является максимальной и соответствует высоте их поступлений в воздушную среду, которая отвечает средней высоте труб предприятия (с учетом имеющихся данных эта высота обычно примерно равна 100 м);

- цель моделирования и создания прогноза заключается в построении стационарной схемы пространственного распространения каждого отдельного компонента выбросов для непрерывно действующих металлургических комплексов и промышленных предприятий, в совмещении рассматриваемой схемы с географической картой местности, на которой расположено конкретное предприятие;

- для обеспечения достоверной безопасности населения регионов, находящихся внутри внешних зон влияния предприятий, осуществляется прогноз максимально возможных количеств (концентрации) изучаемого компонента выбросов в зависимости от пространственных географических координат; такой подход к описанию распределения летучих выбросов получил название «принципа максимальной опасности» [21].

ХИМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Распространение в воздухе конденсированных диспергированных веществ (пылей, аэрозолей) как компонентов металлургических выбросов кроме приведенных общих положений имеет дополнительные особенности. Можно предполагать, что химическая активность твердых (твердо-жидких) частиц при движении их в воздушной среде незначительна. Скорость взаимодействия оксидных, углеродсодержащих и металлических частиц с газами атмосферы невелика (замедляется при невысокой температуре реакционной среды). Частицы поступают в воздух вместе с газовыми веществами выбросов. Можно считать, что при попадании в атмосферу внешней средой для пылевых и аэрозольных частиц будут выбрасываемые производственные газы. Это в основном оксиды серы и азота (SO_2 , SO_3 , NO , NO_2) [22, 23]. Учитывая огромную эффективную внутреннюю поверхность, которой обладают выбрасываемые частицы (является результатом их образования в предшествующих технологических процессах металлургического цикла), за счет поверхностных сил неизбежно будет происходить поглощение этих газов частицами вплоть до полного насыщения всех их внутренних пустот. Частицы конденсированных выбросов через некоторое время после начала движения в атмосфере распространяются дальше, имея в своем составе адсорбированные газы. Несмотря на то, что сами частицы почти не взаимодействуют с веществами воздуха, содержащееся в них (активные газовые оксиды) легко взаимодействуют с парами воды (которые в воздухе есть всегда), образуя при этом летучие кислоты ($\text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$ и $\text{NO}_2 \rightarrow \text{HNO}_3$) [24]. Процессы образования кислот в порах пылевых частиц происходят быстро, так как эффективная внутренняя поверхность в этих случаях играет роль катализатора реакций. Частицы пыли и аэрозоли становятся переносчиками опасных кислот во внутренней зоне влияния металлургического предприятия. Остается определить, какие силы участвуют в движении этих частиц, на какие расстояния может осуществляться этот перенос, а также какая общая длина пути выноса пылевой и аэрозольной частей летучих выбросов.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Основные факторы, определяющие перемещение мелких взвешенных частиц в воздухе, – это сила тяжес-

ти (частицы тяжелее воздуха должны опускаться вниз) и сила ветра (ветровое давление), которая перемещает частицы вместе с воздушной массой. Движение под действием силы тяжести в вертикальной плоскости ограничено, оно прекращается, когда частицы достигают земной поверхности. Тогда же прекращается движение в воздухе под действием ветрового усилия. Дальность разлета частиц пыли определяется временем опускания взвешенных частиц пыли в воздухе. Закон, по которому можно определить поведение частиц, находящихся в среде, обладающей заданной вязкостью, в поле тяжести называется законом Стокса¹ или законом седиментации. Скорость седиментации v , то есть скорость перемещения к центру тяжести (к поверхности земли) частицы (средний размер D) можно определить по следующему уравнению:

$$v = \frac{g\rho D^2}{18\mu}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; $\mu = 20 \cdot 10^{-6}$ Па·с – динамическая вязкость воздуха; ρ – плотность частицы.

В уравнении (1) скорость приближения к земле зависит от размера частицы и ее плотности. Плотность зависит от вещества, которое содержится в частице. Рассмотрим распространение углеродных аэрозольных и пылевых частиц. Наибольшая часть аэрозольных выбросов для большей части металлургических технологий представляет собой пыль частиц технического углерода. Плотность углерода колеблется от 2,0 (графит) до 0,5 г/см³ (древесный уголь, частицы сажи) [25].

Чтобы оценить дальность распространения аэрозолей, необходимо сделать следующие допущения:

– под пористыми мелкими пылевыми частицами понимается в основном углерод, представляющий собой сажистые выбросы с пористой структурой [26];

– при одновременном выбросе оксидов SO₂ и NO₂ аэрозоль впитывает эти газы и пары воды, что является причиной образования кислот H₂SO₄ и HNO₃, которые связаны с частицами аэрозоля, и заполняют поры [27];

– количество серной и азотной кислот в частице соответствует соотношению 1:1.

Проведем оценку среднего относительного объема пор:

$$\eta = 1 - \frac{\rho_{\text{сажа}}}{\rho_{\text{граф}}} = 1 - \frac{0,5}{2} = 0,75. \quad (2)$$

Таким образом, на поры приходится 75 % объема сажистых частиц. Для дальнейших расчетов необходимо определить среднюю плотность частиц аэрозоля:

$$\overline{\rho_{\text{част}}} = 0,75\overline{\rho_{\text{к-т}}} + 0,25\overline{\rho_{\text{сажа}}}, \quad (3)$$

где $\overline{\rho_{\text{част}}}$ – средняя плотность частиц аэрозоля; $\rho_{\text{к-т}}$ – средняя плотность кислот в порах.

Поскольку $\rho_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 1,83$ г/см³ и $\rho_{\text{HNO}_3} = 0,50$ г/см³, тогда $\rho_{\text{к-т}} = \frac{\rho_{\text{H}_2\text{SO}_4} + \rho_{\text{HNO}_3}}{2}$ (в соответствии с третьим допущением).

Окончательно средняя плотность частицы будет

$$\overline{\rho_{\text{част}}} = 0,75 \frac{1,83 + 0,5}{2} + 0,25 \cdot 0,5 \approx 1 \text{ г/см}^3. \quad (4)$$

Диапазон размеров частиц углерода, подчиняющихся закону Стокса, с учетом выбранной плотности, варьируется от 0,23 до 23 мкм [20]. Также следует учитывать, что на всех промышленных предприятиях предусмотрена очистка от пыли, которая позволяет ограничить поступление в атмосферу частиц пыли размером более нескольких микрон [28]. Исходя из данных о выбросах пыли в металлургических центрах известно, что размер 60 – 80 % пылевых частиц составляет от 10 до 2 мкм и менее. В связи с этим необходимо разделить весь интересующий нас диапазон размеров на несколько групп:

- крупные частицы (20 мкм);
- частицы среднего размера (10 – 15 мкм);
- мелкие частицы (2 – 5 мкм).

Используя уравнение (1) и зная среднюю плотность частиц, которая была получена по уравнению (4), можно рассчитать среднюю скорость $\bar{v}$, м/с, оседания частиц выбранных размеров с высоты ($h = 100$ м) и оценить время t достижения поверхности земли частицами:

$$\bar{v} = 2,8 \cdot 10^7 D^2, t = 100/\bar{v}. \quad (5)$$

Используя формулу (5), рассчитаем скорость и время достижения земли для частиц выбранных размеров. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Для того, чтобы оценить полную дальность распространения частиц летучих выбросов, следует сделать еще одно уточнение. В течение всего времени оседания

Т а б л и ц а 1

Время достижения поверхности земли частицами

Table 1. Time for particles to reach the ground surface

D , мкм	$\bar{v}$, м/с	t , ч
20	$1,12 \cdot 10^{-2}$	2,5
15	$6,3 \cdot 10^{-3}$	4,4
10	$2,8 \cdot 10^{-3}$	9,9
5	$7,0 \cdot 10^{-4}$	39,7
2	$1,2 \cdot 10^{-4}$	248,0

¹ Stokes's law: Encyclopædia Britannica. 2016. P. 1. URL: <https://www.britannica.com/science/Stokess-law> (accessed: 05.04.2022).

аэрозольных частиц ветер дует в одном направлении, а радиус рассеяния необходимо принять максимальным ($R_{\max}$). Однако во время переноса аэрозольных частиц направление ветра может измениться несколько раз (n). При этом следует учесть, что полный путь частицы (при постоянной скорости ветра) останется равным $R_{\max}$, а расстояние от точки выброса (действительный радиус рассеяния $\bar{R}$) уменьшится. Вычислить действительный радиус рассеяния можно с помощью модели броуновского движения [29], при этом учитывая, что каждое изменение направления ветра происходит случайным образом и все направления являются равновероятными. Сначала частицы аэрозоля двигаются по одному направлению, затем направление их скачков изменяется. Таких изменений на всей дистанции может быть n . Действительный радиус рассеяния аэрозольных частиц $\bar{R}$ в этом случае можно рассчитать по формуле

$$\bar{R} = R_{\max} \sqrt{\frac{1}{n}}. \quad (6)$$

Теперь расстояние распространения частиц всех выбранных размеров является максимальным ($R_{\max}$). Оно показывает полный путь движения частиц и расстояния $\bar{R}$, на которое распространяются частицы выбранных размеров, учитывая возможные изменения направлений ветра на их пути.

Величину $R_{\max}$ (для всех D) можно рассчитать по следующей формуле: $R_{\max} = wt_i$, где w – скорость ветра в заданном направлении; $\bar{R}$ определяется по уравнению (6) (но только для частиц с размерами 5 и 2 мкм).

Если учитывать, что ветер меняет направление два раза в сутки, тогда

– для $D = 20, 15, 10$ изменений нет, $R_{\max} = \bar{R}$;

– для $D = 5; n = 3; \frac{1}{\sqrt{n}} = 0,577$;

– для $D = 2; n = 20; \frac{1}{\sqrt{n}} = 0,224$.

Для расчета дальности распространения частиц аэрозолей и пыли осталось установить следующее: какие значения скоростей ветра и какие их направления брать для получения картины распределения части летучих выбросов в реальных случаях (для конкретного предприятия). Поскольку реальная движущая сила в радиальном от места выброса направлении – это сила ветра, то скорости и направления ветров следует брать из розы ветров географического места нахождения конкретного предприятия. Нижеперечисленные количественные характеристики переноса пыли и аэрозолей для конкретного действующего производства могут быть получены с использованием результатов прогнозных оценок. ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» является одним из крупнейших российских металлургических центров. Годовой выброс пыли от этого предприятия превышает 25 000 т и незначительно меняется в течение последних лет². Такое количество пыли может выносить до 12 000 т серной кислоты (до 10 000 т азотной кислоты) в воздушное пространство областей, которые располагаются во внешней зоне влияния за один год.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Используются данные повторяемости и скорости ветра

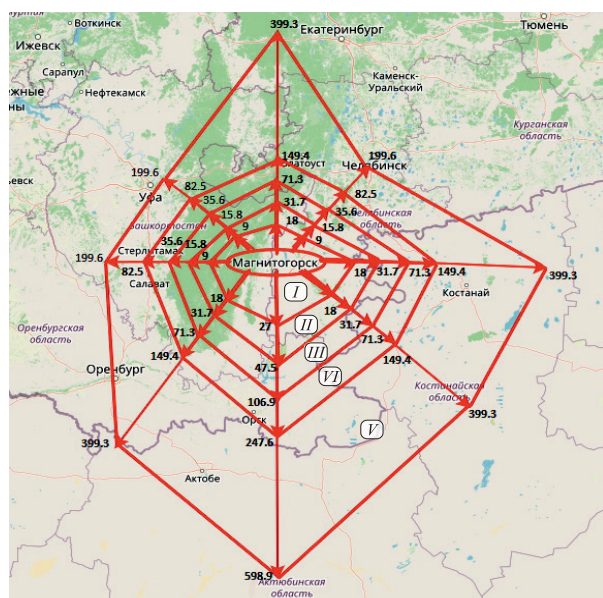
² Основные показатели охраны окружающей среды // Федеральная служба государственной статистики: официальный сайт. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_bul_2021.pdf (дата обращения: 20.03.2020).

Т а б л и ц а 2

Расстояние рассеяния выбросов пыли и аэрозольных частиц ММК в зимний период (за январь)

Table 2. Dispersion distances of dust and aerosol particle emissions (in km) of the MMK in winter (January)

D, мкм	$t_{\text{сед}}, \text{ч}$	$\bar{R}/R_{\max}$, км, распространения частиц при w, м/с							
		2	1	2	2	3	2	1	1
		С	С-В	В	Ю-В	Ю	Ю-З	З	С-З
2	248,0	$\frac{393,3}{1785,6}$	$\frac{199,6}{892,8}$	$\frac{393,3}{1785,6}$	$\frac{393,3}{1785,6}$	$\frac{598,9}{2678,4}$	$\frac{393,3}{1785,6}$	$\frac{199,6}{892,8}$	$\frac{199,6}{892,8}$
5	39,7	$\frac{149,4}{258,8}$	$\frac{82,5}{142,9}$	$\frac{149,4}{258,8}$	$\frac{149,4}{258,8}$	$\frac{247,6}{428,8}$	$\frac{149,4}{258,8}$	$\frac{82,5}{142,9}$	$\frac{82,5}{142,9}$
10	9,9	$\frac{—}{71,3}$	$\frac{—}{35,6}$	$\frac{—}{71,3}$	$\frac{—}{71,3}$	$\frac{—}{106,9}$	$\frac{—}{71,3}$	$\frac{—}{35,6}$	$\frac{—}{35,6}$
15	4,4	$\frac{—}{31,7}$	$\frac{—}{15,8}$	$\frac{—}{31,7}$	$\frac{—}{31,7}$	$\frac{—}{47,5}$	$\frac{—}{31,7}$	$\frac{—}{15,8}$	$\frac{—}{15,8}$
20	2,5	$\frac{—}{18,0}$	$\frac{—}{9,0}$	$\frac{—}{18,0}$	$\frac{—}{18,0}$	$\frac{—}{27,0}$	$\frac{—}{18,0}$	$\frac{—}{9,0}$	$\frac{—}{9,0}$



Карта-схема зон рассеяния пылевых и аэрозольных выбросов ММК за январь:

контур I – V – средний размер частиц 20, 15, 10, 5 и 2 мкм

Map-scheme of the MMK dust and aerosol emission dispersion zones for January:

contour I – V – average particle size of 20, 15, 10, 5 and 2 μm

во всех географических направлениях розы ветров, которые были получены в результате обработки климатических данных региона (Челябинская обл., г. Магнитогорск). Расчеты проводили для розы ветров января рассматриваемого региона.

Для наглядности данные (табл. 2) нанесены на карту-схему географического региона, включающего в себя внешнюю зону влияния предприятия ММК (см. рисунок, линии контуров охвата предприятия соответствуют среднему размеру фракции частиц).

Выводы

Прогнозирование распространения промышленных пылевых выбросов во внешней зоне влияния металлургических предприятий возможно с помощью проведенного анализа и расчетов. Применяемые расчетные схемы также подходят для описания рассеяния промышленной пыли на всех других производственных участках. Для осуществления прогноза независимо от технологических особенностей конкретного производства необходимо знать лишь мощности выброса предприятия и географические данные по региону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Huo D., Liang J., Yang Y. Analysis of metallurgical raw materials and environmental protection. In: 5th Int. Conf. on Advanced Design and Manufacturing Engineering. *Advances in Engineering Research*. 2015. P. 2049–2052. <https://doi.org/10.2991/icadme-15.2015.380>
- Neuberger M. Human health effects of aerosols // *Advances of Atmospheric Aerosol Research in Austria. Interdisciplinary Perspectives*. 2012. No. 2. P. 103–115.
- World Health Organization. Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and central Asia. 2013. 14 p.
- Zhao L., Sun W., Li X., Ye Z., Huang J., Zhang G., Cai J. Assessment of particulate emissions from a sinter plant in steelmaking works in China // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017. Vol. 189. Article 368. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6053-9>
- Leimalm U., Lundgren M., Ökvist L.S., Björkman B. Off-gas dust in an experimental blast furnace. Part 1: Characterization of flue dust, sludge and shaft fines // *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. No. 11. P. 1560–1569. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.1560>
- Dormann M., Vanderheyden B., Steyls D. Advanced technique to reduce the emissions of particulate matter (PM) // *Revue De Métallurgie*. 2008. No. 105 (12). P. 586–595. <https://doi.org/10.1051/metal:2009002>
- Amit S.S., Sandip D.M., Tushar K., etc. Influence of atmospheric aerosols on health and environment-climate change // *International Journal of Life Sciences*. 2013. Special Issue. P. 115–120.
- Ballester F., Medina S., Boldo E., Goodman P., Neuberger M., Iñiguez C., Künzli N. Reducing ambient levels of fine particulates could substantially improve health: A mortality impact assessment for 26 European cities // *Journal of Epidemiology and Community Health*. 2008. Vol. 62. No. 2. P. 98–105. <https://doi.org/10.1136/jech.2007.059857>
- Shi X., Ma Y., Wang Q., Gao K., Liu X. Research on regional environmental pollution analysis technology based on atmospheric numerical model in Shenyang city // *Communications in Computer and*
- Huo D., Liang J., Yang Y. Analysis of metallurgical raw materials and environmental protection. In: 5th Int. Conf. on Advanced Design and Manufacturing Engineering. *Advances in Engineering Research*. 2015, pp. 2049–2052. <https://doi.org/10.2991/icadme-15.2015.380>
- Neuberger M. Human health effects of aerosols. *Advances of Atmospheric Aerosol Research in Austria. Interdisciplinary Perspectives*. 2012, no. 2, pp. 103–115.
- World Health Organization. *Health effects of particulate matter: Policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and central Asia*. 2013, 14 p.
- Zhao L., Sun W., Li X., Ye Z., Huang J., Zhang G., Cai J. Assessment of particulate emissions from a sinter plant in steelmaking works in China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017, vol. 189, article 368. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6053-9>
- Leimalm U., Lundgren M., Ökvist L.S., Björkman B. Off-gas dust in an experimental blast furnace. Part 1: Characterization of flue dust, sludge and shaft fines. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 11, pp. 1560–1569. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.1560>
- Dormann M., Vanderheyden B., Steyls D. Advanced technique to reduce the emissions of particulate matter (PM). *Revue De Métallurgie*. 2008, no. 105 (12), pp. 586–595. <https://doi.org/10.1051/metal:2009002>
- Amit S.S., Sandip D.M., Tushar K., etc. Influence of atmospheric aerosols on health and environment-climate change. *International Journal of Life Sciences*. 2013, special issue, pp. 115–120.
- Ballester F., Medina S., Boldo E., Goodman P., Neuberger M., Iñiguez C., Künzli N. Reducing ambient levels of fine particulates could substantially improve health: A mortality impact assessment for 26 European cities. *Journal of Epidemiology and Community Health*. 2008, vol. 62, no. 2, pp. 98–105. <https://doi.org/10.1136/jech.2007.059857>
- Shi X., Ma Y., Wang Q., Gao K., Liu X. Research on regional environmental pollution analysis technology based on atmospheric numerical model in Shenyang city. *Communications in Computer and*

- and Information Science. 2016. Vol. 569. P. 751–759.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-49155-3_77
10. Perry S.G., Heist D.K., Brouwer L.H., Monbureau E.M., Brixy L.A. Characterization of pollutant dispersion near elongated buildings based on wind tunnel simulations // *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 142. P. 286–295.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.052>
11. Levy J.I., Spengler J.D., Hlinka D., Sullivan D., Moon D. Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: Mode sensitivity and implications // *Atmospheric Environment*. 2002. Vol. 36. No. 6. P. 1063–1075.
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00493-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00493-9)
12. Barna M.G., Gebhart K.A., Schichtel B.A., Malm W.C. Modeling regional sulfate during the BRAVO study. Part 1. Base emissions simulation and performance evaluation // *Atmospheric Environment*. 2006. Vol. 40. No. 14. P. 2436–2448.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.040>
13. ОНД – 86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Л.: Гидрометеоздат, 1987.
14. Stepanova L.P., Pisareva A.V., Tsukanavichute V.E. Toxicological assessment of the impact of metallurgical industry waste on the environmental properties of light gray forest soils // *Ecology and Industry of Russia*. 2020. No. 24. P. 54–59.
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-6-54-59>
15. Деева А.В. Анализ влияния газовых выбросов металлургических предприятий на концентрацию тропосферного озона: Автореф... дис. канд. техн. наук. М.: 2009. 18 с.
16. Вишнякова К.В., Петелин А.Л., Юсфин Ю.С. Распространение газовых выбросов металлургических предприятий в промышленных регионах // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2009. № 1. С. 63–65.
17. Полулях Л.А., Петелин А.Л., Дашевский В.Я., Травянов А.Я., Юсфин Ю.С. Анализ возможности газификации фосфора в доменном процессе // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2009. № 9. С. 29–31.
18. Орелкина Д.И., Петелин А.Л., Полулях Л.А. Анализ пространственного распределения вторичных газовых выбросов во внешней зоне влияния предприятий черной металлургии // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 11. С. 793–797. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-11-793-797>
19. Petelin A.L., Orelkina D.I., Polulyakh L.A., Kozlova O.N. The kinetics of the formation and propagation in the atmosphere of the secondary gas emissions of metallurgical enterprises // *Ecology and Industry of Russia*. 2016. Vol. 20. No. 9. P. 26–29.
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-9-26-29>
20. Орелкина Д.И., Петелин А.Л., Полулях Л.А., Подгородецкий Г.С. Модель расчета концентрации вторичных металлургических выбросов в атмосфере // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 5. С. 300–305.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-5-300-305>
21. Петелин А.Л., Деева А.В., Вишнякова К.В., Юсфин Ю.С. Анализ влияния выбросов предприятий черной металлургии на концентрацию атмосферного озона. Сообщение 1 // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2008. № 5. С. 59–61.
22. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов М.П. Промышленность и окружающая среда. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 248 с.
23. Исидоров В.А. Экологическая химия. СПб.: «Химиздат», 2001. 304 с.
24. Ровинский Ф.Я., Егоров В.И. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 183 с.
25. Физические величины. Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братовский и др. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
26. Karklit A.K., Aboskalov A.N. Graphite from metallurgical dust // *Refractories and Industrial Ceramics*. 1998. vol. 39, no. 9-10. P. 334–336. <https://doi.org/10.1007/BF02770596>
27. Zou C., Kang Y., Wang W., Wang Y., Shi R. Effects of Fe_2O_3 –CaO interactions in metallurgical dust on its catalytic activity for the *Information Science*. 2016, vol. 569, pp. 751–759.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-49155-3_77
10. Perry S.G., Heist D.K., Brouwer L.H., Monbureau E.M., Brixy L.A. Characterization of pollutant dispersion near elongated buildings based on wind tunnel simulations. *Atmospheric Environment*. 2016, vol. 142, pp. 286–295.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.052>
11. Levy J.I., Spengler J.D., Hlinka D., Sullivan D., Moon D. Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: Mode sensitivity and implications. *Atmospheric Environment*. 2002, vol. 36, no. 6, pp. 1063–1075.
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00493-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00493-9)
12. Barna M.G., Gebhart K.A., Schichtel B.A., Malm W.C. Modeling regional sulfate during the BRAVO study. Part 1. Base emissions simulation and performance evaluation. *Atmospheric Environment*. 2006, vol. 40, no. 14, pp. 2436–2448.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.040>
13. OND – 86. Methodology for Calculating Concentrations in Atmospheric Air of Harmful Substances Contained in Enterprises Emissions. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. (In Russ.).
14. Stepanova L.P., Pisareva A.V., Tsukanavichute V.E. Toxicological assessment of the impact of metallurgical industry waste on the environmental properties of light gray forest soils. *Ecology and Industry of Russia*. 2020, no. 24, pp. 54–59.
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-6-54-59>
15. Deeva A.V. Analysis of the effect of gas emissions from metallurgical enterprises on concentration of tropospheric ozone: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss. Moscow, 2009, 18 p. (In Russ.).
16. Vishnyakova K.V., Petelin A.L., Yusfin Yu.C. Distribution of gas emissions from metallurgical enterprises in industrial regions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, vol. 52, no. 1, pp. 63–65. (In Russ.).
17. Polulyakh L.A., Petelin A.L., Dashevskii V.Ya., Travyanov A.Ya., Yusfin Yu.S. Analysis of the possibility of phosphorus gasification in blast furnace process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, vol. 52, no. 9, pp. 29–31. (In Russ.).
18. Orelkina O.A., Petelin A.L., Polulyakh L.A. Analysis of the spatial distribution of secondary gas emissions in the outer influence zone of steel industry. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 11, pp. 793–797. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-11-793-797>
19. Petelin A.L., Orelkina D.I., Polulyakh L.A., Kozlova O.N. The kinetics of formation and propagation in the atmosphere of the secondary gas emissions of metallurgical enterprises. *Ecology and Industry of Russia*. 2016, vol. 20, no. 9, pp. 26–29. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-9-26-29>
20. Orelkina D.I., Petelin A.L., Polulyakh L.A., Podgorodetskiy G.S. Calculation model for the concentration of secondary metallurgical emissions into the atmosphere. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 5, pp. 300–305. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-5-300-305>
21. Petelin A.L., Deeva A.V., Vishnyakova K.V., Yusfin Yu.S. Analysis of the impact of emissions from ferrous metallurgy enterprises on concentration of atmospheric ozone. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, vol. 51, no. 5, pp. 59–61. (In Russ.).
22. Yusfin Yu.S., Leont'ev L.I., Chernousov M.P. *Industry and Environment*. Moscow: Akademkniga, 2004, 248 p. (In Russ.).
23. Isidorov V.A. *Ecological Chemistry*. St. Petersburg: Khimizdat, 2001, 304 p. (In Russ.).
24. Rovinskii F.Ya., Egorov V.I. *Ozone, Nitrogen and Sulfur Oxides in Lower Atmosphere*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, 183 p. (In Russ.).
25. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratovskii A.M., etc. *Physical Quantities. Reference Book*. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 1232 p. (In Russ.).
26. Karklit A.K., Aboskalov A.N. Graphite from metallurgical dust. *Refractories and Industrial Ceramics*. 1998, vol. 39, no. 9-10, pp. 334–336. <https://doi.org/10.1007/BF02770596>
27. Zou C., Kang Y., Wang W., Wang Y., Shi R. Effects of Fe_2O_3 –CaO interactions in metallurgical dust on its catalytic activity for the

carbon – oxygen reaction // *Energy & Fuels*. 2019. No. 33 (11). P. 11830–11840. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02374>

28. Варенков А.Н., Костиков В.И. Химическая экология и инженерная безопасность металлургических производств. М.: «Интермет Инжиниринг», 2000. 20 с.
29. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. М.: «Металлургия», 1978. 247 с.

carbon – oxygen reaction. *Energy & Fuels*. 2019, no. 33 (11), pp. 11830–11840. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02374>

28. Varenkov A.N., Kostikov V.I. *Chemical Ecology and Engineering Safety of Metallurgical Enterprises*. Moscow: Intermet Inzhenering, 2000, 20 p. (In Russ.).
29. Bokshtein B.S. *Diffusion in Metals*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 247 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олег Сакенович Нуржанов, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0001-7354-9879

E-mail: Za852@yandex.ru

Oleg S. Nurzhanov, Postgraduate of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0001-7354-9879

E-mail: Za852@yandex.ru

Геннадий Валерьевич Торохов, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: gvtorohov@gmail.com

Gennadii V. Torokhov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: gvtorohov@gmail.com

Павел Иванович Черноусов, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: p.chernou@yandex.ru

Pavel I. Chernousov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: p.chernou@yandex.ru

Дарья Владимировна Чезганова, аспирант кафедры цветных металлов и золота, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: d.chezganova@gmail.com

Dar'ya V. Chezganova, Postgraduate of the Chair of Non-Ferrous Metals and Gold, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: d.chezganova@gmail.com

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

О. С. Нуржанов – проведение расчетов, моделирование, поиск и анализ данных, написание статьи.

Г. В. Торохов – научное консультирование по вопросам химических основ распространения частиц.

П. И. Черноусов – научное консультирование по вопросам физических основ распространения частиц.

Д. В. Чезганова – анализ источников, повышение уникальности текста, перевод на английский язык.

O. S. Nurzhanov – calculations, modeling, search and analysis of data, writing the article.

G. V. Torokhov – scientific advising on chemical bases of particles distribution.

P. I. Chernousov – scientific advising on physical bases of particles distribution.

D. V. Chezganova – analysis of sources, enhancing the text uniqueness, the text translation into English.

Поступила в редакцию 25.06.2021

После доработки 13.10.2021

Принята к публикации 19.10.2021

Received 25.06.2021

Revised 13.10.2021

Accepted 19.10.2021