

УДК 624.13:628.511.1

А. М. Ахмедов, А. В. Сопит, А. Н. Ушаков, В. Н. Азаров

Волгоградский государственный технический университет

К ВОПРОСУ О НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ РАСЧЕТАХ РАССЕЙВАНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ ОТ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТАХ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20187,
<https://rscf.ru/project/25-29-20187/>

В работе рассмотрены примеры построения поверхностей виртуальных источников для работы одноковшового экскаватора. Приведены примеры экспериментальных значений распределения концентрации пыли на поверхности виртуального источника. Построены средние интегральные функции распределения объема частиц на высотах с шагом 0,75 м по поверхности виртуально источника. На поверхности виртуального источника, доля PM10 на высоте 0,75 м составляет 0,3 %, а на высоте 2,25 м — 18 %, что в 60 раз больше.

К л ю ч е в ы е с л о в а: земляные работы, атмосферный воздух, выбросы, PM2,5, PM10, бульдозер, дисперсный состав частиц грунта, пылевое загрязнение воздуха, инженерная сеть.

Введение

При выполнении земляных работ абсолютно все технологические процессы сопровождаются выделением пыли, в т. ч. мелкодисперсной (менее PM10). Технологический процесс разработки грунта при земляных работах с применением одноковшового экскаватора является наиболее сложным с точки зрения задания исходных данных при выполнении расчетов рассеивания загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферу. Положение источника пылевыведения (ковша экскаватора) циклично изменяется во времени и в пространстве. При этом значение радиуса вращения рабочего органа в зависимости от марки и типа рабочего органа может изменяться в широких пределах от 3 до 9,5 м.

При расчете рассеивания, например в программном комплексе УПРЗА «Эколог» по методике МРР-2017¹, особое внимание необходимо уделить способу задания источника загрязнения, т. к. точечный неорганизованный и горизонтальный площадной неорганизованный источники для решения данной задачи не подходят. Требуется задание источника загрязнения как комбинации из нескольких виртуальных источников и их поверхностей. Следует отметить, что в настоящее время отсутствует описание методика задания геометрической конфигурации виртуальной поверхности, особенно это касается циклических источников пылевыведения, перемещающихся периодически в пространстве и во времени.

Известна модель [1] расчета загрязнения с использованием ГИС-технологий и пространственного моделирования. Однако эта модель не дает четкого представления о конфигурации базового источника загрязнения. Кроме того, рассеивание ЗВ в результате воздействия ветра представляет со-

¹ МРР—2017. Методы расчетов рассеивания вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. URL: www.cosultant.ru.

бой особую проблему, поскольку оно неоднородно и распространяется на большие расстояния [2, 3].

Технологический процесс работы одноковшового экскаватора состоит из последовательно-выполняемых технологических операций: наполнение ковша, поворот рабочего органа с ковшом, выгрузка грунта из ковша, обратное движение ковша в пустом состоянии, опускание ковша к месту последующей разработки [4]. В работе одноковшовый экскаватор находится 66 % времени, на холостом ходу — 21 % и 13 % времени в движении. Практически в течение 5 ч 17 мин экскаватор будет перемещаться, от его работы происходит пылевыведение. На диаграмме (рис. 1) показано, что на генерацию загрязнения взвешенными частицами одноковшовым экскаватором приходится больше половины рабочей смены [5]. В [6] экспериментально выявлено, что при отсутствии мер по снижению запыленности концентрация пыли в забое экскаватора может достигать $2...3 \text{ г/м}^3$.



Рис. 1. Диаграмма распределения времени работы одноковшового экскаватора в течение рабочей смены [3]

Несмотря на то, что существует и активно применяется электрифицированная землеройная техника [7, 8], вопрос с загрязнением воздуха взвешенными частицами имеет место. По данным [9] выбросы твердых взвешенных частиц в Китае составляют 0,24 млн т, что в 3,49 раза превышает выбросы от автомобильных источников (0,068 млн т) в данной стране. Выбросы оказывают вредное воздействие на окружающую среду и здоровье людей [10, 11].

В [12—14] предложена методика расчета загрязнения с применением пространственного 3D-моделирования поверхности земли и аэрокосмической съемки местности. Однако методика не дает четкого представления о загрязнении при работе землеройной техники. Кроме того, применение аэрокосмической съемки и определение рельефа местности требует значительных финансовых затрат.

Методы исследования и результаты

Геометрическая конфигурации поверхностей виртуального источника при работе одноковшового экскаватора представлена на рис. 2, а, б.

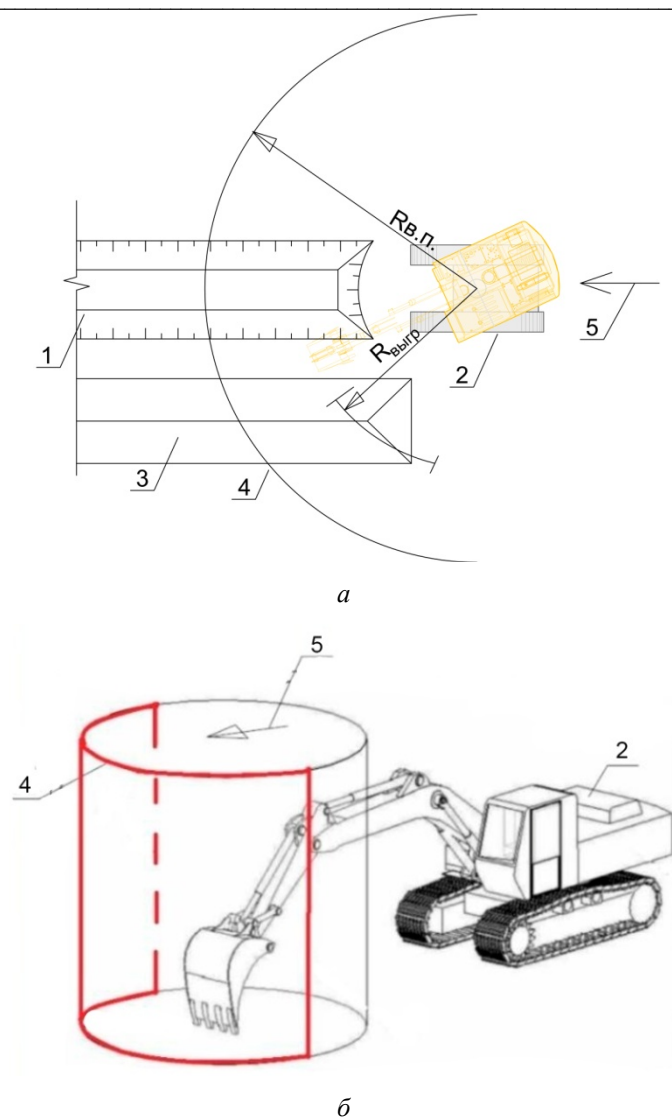


Рис. 2. Конфигурация виртуальных поверхностей при выгрузке грунта в отвал (а), пространственный вид поверхности виртуального источника (б):

1 — траншея; 2 — экскаватор; 3 — отвал грунта; 4 — поверхность виртуального источника при разработке траншеи; 5 — направление ветра; $R_{в.п.}$ — радиус виртуальной поверхности; $R_{выгр}$ — радиус выгрузки грунта; R_k — радиус копания

Для определения закономерностей пылевыведения с виртуальной поверхности проведены натурные исследования. На строительной площадке при работе одноковшового экскаватора проведен отбор проб на разной высоте: 0,75 м, 1,5 м, 2,25 м, 3 м. Отбор проб осуществлялся на фильтры АФА. На каждой из четырех высот отбиралось по шесть проб, всего 24 пробы.

Исследования показали, что для каждой из четырех высот отклонение значений концентраций пыли в шести точках не превышали 20 % от среднего значения по высоте, т. е. точности измерений. Поэтому можно считать, что концентрация на виртуальной поверхности является функцией только высоты

расположения точки $C(h)$. Анализ распределения значений концентраций по радиусу виртуальной поверхности получился постоянным.

Результаты экспериментов показали, что наилучшее приближение для ковшей больших объемов осуществляется по формуле (1) (рис. 3, *а*), например 1 м^3 , где опытный коэффициент $n = 2,3$. Для экскаватора с малым ковшом, например $0,15 \text{ м}^3$, где опытный коэффициент $n = 1,6$ — по формуле (2) (рис. 3, *б*).

$$C(h) = C_{\max} \left(1 - \left(\frac{h}{H} \right)^{2n} \right), \quad n \in N, \quad (1)$$

$$C(h) = C_{\max} \left(1 - \frac{h}{H} \right)^{2n}. \quad (2)$$

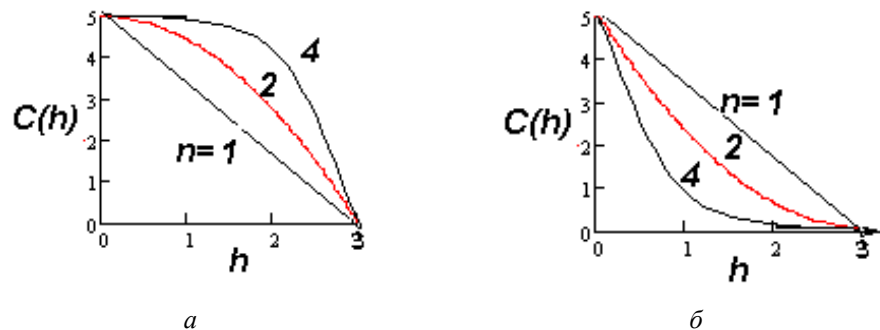


Рис. 3. Графики зависимости концентрации пыли от высоты точки:
а — для больших ковшей экскаватора; *б* — для малых ковшей

Для нахождения расчетной величины $C_{\max}$ можно воспользоваться уравнениями баланса и параметрами сдуваемости пыли, при различных скоростях ветра, для экскаваторов с большим и малым ковшами соответственно по формулам (3) и (4):

$$G_1 = \frac{4n}{2n+1} v R C_{\max} H, \quad (3)$$

$$G_2 = \frac{2}{2n+1} v R C_{\max} H, \quad (4)$$

где n — опытный коэффициент; v — скорость ветра, м/с; R — радиус виртуальной поверхности, м; $C_{\max}$ — концентрация пыли в нижней части, г/м³; H — высота виртуальной поверхности, м; G_1 — максимальный разовый выброс для большого ковша экскаватора, г/с; G_2 — максимальный разовый выброс для малого ковша экскаватора, г/с.

Исследование дисперсного состава пыли на виртуальной поверхности показало, что основные характеристики (медианный размер d_{50} , доля частиц до 10 мкм, максимальный размер частиц $d_{\max}$) можно считать постоянными для каждой высоты h . На рисунке 4 представлены средние интегральные

функции распределения объема частиц по эквивалентным диаметрам на различных высотах $h = 0,75; 1,5; 2,25; 3$ м поверхности виртуального источника.

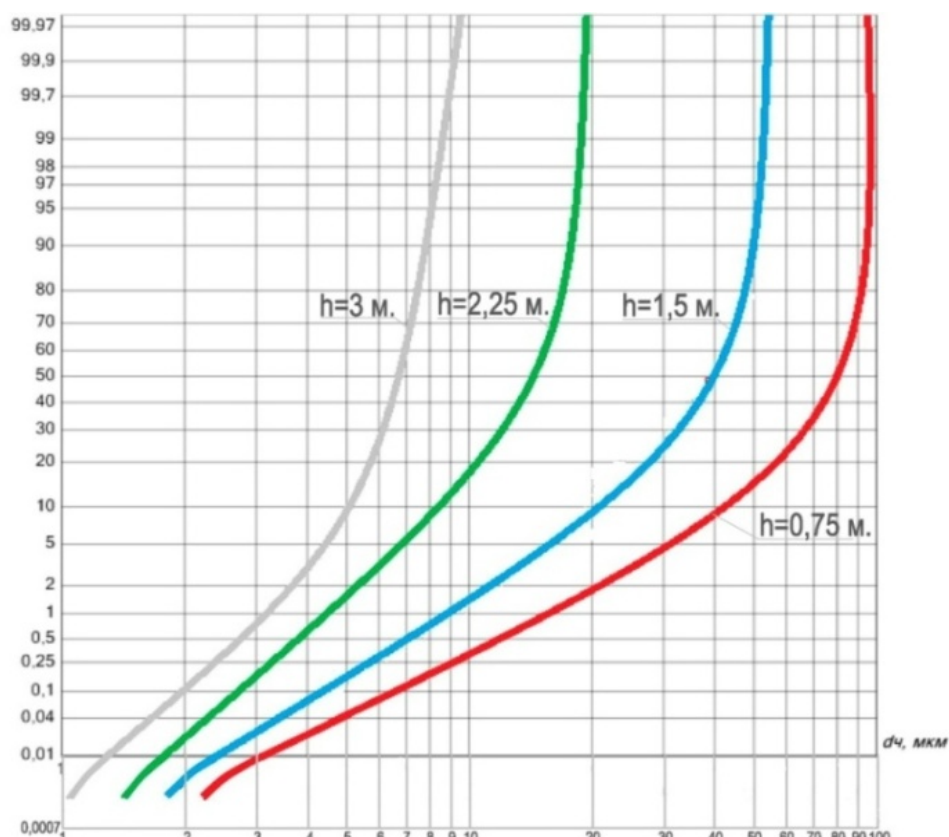


Рис. 4. Средние интегральные функции распределения объема частиц на высоте h поверхности виртуально источника

Важно отметить, что при таком загрязнении от выгрузки грунта из ковша взвешенные частицы, несомненно, попадают через окна и двери в жилые пространства горожан. Приведены результаты экспериментальных исследований дисперсного состава взвешенных частиц грунта (на примере песка и глины), которые дают наглядное представление по изменению крупности частиц по высоте виртуальной поверхности.

Для нахождения максимального разового выброса G_{Σ} использовалась формула:

$$G_{\Sigma} = \frac{1}{100} \int_0^{\infty} \int_S v \cdot C_{\Sigma}(s) \frac{\partial D(s, \delta)}{\partial \delta} dS d\delta, \quad (5)$$

Расчет максимального разового выброса G_i мелкодисперсной пыли PM_i ($i = 2,5$ или $i = 10$) проводился по формуле:

$$G_i = \frac{1}{100} \int_0^i \int_S v \cdot C_{\Sigma}(s) \frac{\partial D(s, \delta)}{\partial \delta} dS d\delta, \quad (6)$$

где $i = 2,5$ мкм или 10 мкм, D — интегральная функция распределения объема частиц по эквивалентным диаметрам (в точке виртуальной поверхности s), %; d_q и δ — диаметры частиц, мкм; v — скорость ветра, м/с; S — площадь виртуальной поверхности м².

Проведенные авторами измерения согласно методике РД52.04.893—2020² позволили определить валовый выброс от работы экскаватора на этапе выгрузки грунта из ковша одноковшового экскаватора. Величина выбросов валового и разового выбросов зависит от формы поверхности виртуального источника. Натурные замеры проведены с использованием поверенного оборудования и с привлечением аккредитованных в данной области измерений лабораторий.

Заключение

На основании анализа технологического процесса разработки грунта при прокладке инженерных сетей приведены примеры реализации методики построения поверхностей виртуальных источников загрязнения воздушной среды. Проведены экспериментальные исследования концентрации дисперсного состава пыли на поверхности виртуальных источников, при земляных работах. Предложены формулы для расчета максимально разовых выбросов в атмосферу взвешенных частиц и мелкодисперсной пыли PM10 и PM2,5 при работе одноковшового экскаватора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. He Z. A cloud-based real time polluted gas spread simulation approach on virtual reality networking // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 22532—22540.
2. Reaney S. M. Identifying critical source areas using multiple methods for effective diffuse pollution mitigation // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 250. Pp. 109366.
3. Savin E. C., Akhmedov A. M., Khoperskov A. V. Modeling the dynamics of fine dust fraction in the surface layer of the atmosphere // II International Conference on Current Issues of Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops, and Environment. 2023. Vol. 71. Art. 02013. 7 p. DOI: 10.1051/bioconf/20237102013.
4. Kim Y. B. A study on the virtual digging simulation of a hydraulic excavator // Proceedings of the 28th ISARC. 2011. Pp. 95—100.
5. Wang Y. Data-driven method for estimating emission factors of multiple pollutants from excavators based on portable emission measurement system and online driving characteristic identification // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 912. Pp. 169472.
6. Chen X. Research on the dust diffusion and pollution behaviour of dynamic tunneling in header excavators based on dynamic mesh technology and field measurement // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 23. Pp. 8945.
7. Khan A. U., Huang L. Toward zero emission construction: a comparative life cycle impact assessment of diesel, hybrid, and electric excavators // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 16. Pp. 6025.
8. Ahmadi Khayavi O., Seo J., Lin X. New design of an electrical excavator and its path generation for energy saving and obstacle avoidance // Vehicles. 2024. Vol. 6. Iss. 2. Pp. 832—849.
9. Wu B. Multi-pollutant emission characteristics of non-road construction equipment based on real-world measurement // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 853. Pp. 158601.
10. Барикаева Н. С., Николенко Д. А. Мониторинг пылевого загрязнения атмосферного воздуха городской среды на примере г. Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Вып. 50. С. 182—189.
11. Особенности мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в линейных и компактных городах на примере Волгограда и Ставрополя / В. Н. Азаров, Ю. П. Иванова,

² РД52.04.893—2020. Массовая концентрация взвешенных веществ в про-бах атмосферного воздуха. URL:

Е. В. Соколова, А. А. Сахарова, О. О. Иванова, Л. М. Арзамаскова, О. В. Коновалов // Инженерный вестник Дона. 2023. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8644 6.

12. Трубина Л. К., Хлебникова Т. А., Николаева О. Н. Методические подходы к созданию 3d-моделей для исследования экологического состояния городских территорий // География и природные ресурсы. 2017. №. 2. С. 199—205.

13. Трубина Л. К., Хлебникова Т. А., Николаева О. Н., Кулик Е. Н. Интеграция геопространственных данных на основе трехмерного моделирования для экологической оценки городских территорий // Изв. вузов: Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 4/с. С. 83—86.

14. Трубина Л. К., Лисицкий Д. В., Панов Д. В. Пространственная дифференциация городских земель на основе геоинформационного анализа рельефа // Изв. вузов: Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 4/с. С. 149—152.

© Ахмедов А. М., Сопит А. В., Ушаков А. Н., Азаров В. Н., 2025

Поступила в редакцию
12.06.2025

Ссылка для цитирования:

Ахмедов А. М., Сопит А. В., Ушаков А. Н., Азаров В. Н. К вопросу о начальных условиях при расчетах рассеивания взвешенных веществ от виртуальных источников загрязнения атмосферы при земляных работах // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 3(100). С. 101—108. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_101.

Об авторах:

Ахмедов Асвар Микдадович — ст. препод. каф. технологий строительного производства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; asvar05@mail.ru

Сопит Андрей Вячеславович — канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. математических и естественнонаучных дисциплин, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, sandrej74@mail.ru

Ушаков Андрей Николаевич — канд. техн. наук, доц., доц. каф. математических и естественнонаучных дисциплин, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Азаров Валерий Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; azarov-publ@mail.ru

Asvar M. Akhmedov, Andrey V. Sopit, Andrey N. Ushakov, Valerii N. Azarov

Volgograd State Technical University

ON THE ISSUE OF INITIAL CONDITIONS IN CALCULATIONS OF DISPERSION OF POWDERED SUBSTANCES FROM VIRTUAL SOURCES OF ATMOSPHERIC POLLUTION DURING EARTMILL WORK

The research was funded by the Russian Science Foundation grant No. 25-29-20187, <https://rscf.ru/project/25-29-20187/>

The paper provides examples of constructing virtual source surfaces for the operation of a single-bucket excavator. It also provides examples of experimental values of dust concentration distribution on the virtual source surface. The paper constructs average integral functions of particle volume distribution at heights with a step of 0.75 m on the virtual source surface. On the virtual source surface, the PM10 fraction at a height of 0.75 m is 0.3 %, while at a height of 2.25 m it is 18 %, which is 60 times higher.

Key words: earthworks, atmospheric air, emissions, PM2.5, PM10, bulldozer, dispersed composition of soil particles, dust pollution of air, utility network.

For citation:

Akhmedov A. M., Sopit A. V., Ushakov A. N., Azarov V. N. [On the issue of initial conditions in calculations of dispersion of powdered substances from virtual sources of atmospheric pollution during eartmill work]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, iss. 3, pp. 101—108. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_101.

About authors:

Asvar M. Akhmedov — Senior Lecturer, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; asvar05@mail.ru; ORCID: 0000-0003-1087-4257

Andrey V. Sopit — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; sandrej74@mail.ru

Andrey N. Ushakov — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Valerii N. Azarov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; azarovpubl@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0944-0232