

УДК 624.132:504.3

А. М. Ахмедов

Волгоградский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ВИРТУАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРИ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТАХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Рассмотрено влияние геометрической конфигурации формы поверхности виртуального источника на примере осуществления технологического процесса вскрытия траншеи одноковшовым экскаватором. Показаны пространственные 3D-модели возникающих виртуальных поверхностей при цикле работы одноковшового экскаватора. Построенное сочетание поверхностей виртуального источника наглядно иллюстрирует рабочие плоскости, через которые проходят частицы земляной пыли. Исследования, представленные в данной статье, позволят определять и уточнять начальные и граничные условия для задач расчета уровня загрязнений при работе одноковшовых экскаваторов, а также принимать решения по выбору наиболее оптимальных методов борьбы с загрязнением воздуха в месте работы техники. Для определения параметров поверхностей виртуального источника проведены многочисленные натурные исследования и замеры в условиях строительных площадок.

К л ю ч е в ы е с л о в а : земляные работы, атмосферный воздух, выбросы, PM_{2,5}, PM₁₀, одноковшовый экскаватор, дисперсный состав частиц грунта, пылевое загрязнение воздуха, инженерная сеть.

Введение

В настоящее время в строительной отрасли России наблюдается стремительное наращивание темпов строительства, капитального ремонта и реконструкции инженерных сетей. В Волгоградской области по состоянию на февраль 2025 г. строится 118 объектов¹ с общей площадью жилья 924 тыс. м² [1]. Причем абсолютно к любому объекту необходимо подводить инженерные сети, львиная доля которых прокладывается в подземном исполнении. Поэтому без проведения земляных работ трудно представить выполнение этой задачи, как в трассовых условиях, так и внутри жилых кварталов и за их пределами. Ликвидация даже небольшой утечки из подземной коммуникации на придомовой территории требует выполнения срезки растительного слоя с последующей рекультивацией и разработкой траншеи.

На сегодняшний день вопрос исследования закономерностей распространения взвешенных частиц при работе строительной техники, в т. ч. от одноковшового экскаватора изучен в недостаточной степени [2]. Еще меньше изучен вопрос величины валового выброса загрязняющих веществ (ЗВ) на границе поверхности виртуального источника при работе одноковшового экскаватора. Так как прокладка и ремонт существующих инженерных сетей и зданий осуществляется в непосредственной близости от фасадов зданий, на расстоянии 5...10 м, в зоне рассеивания пыли находятся окна и двери, через которые пыль попадает в жилое пространство, влияя негативно на жителей. Исследованию воздействия на здоровье жителей при ра-

¹ Ввод жилья в эксплуатацию / ЕИСЖС. URL: <https://xn--d1aqf.xn--p1ai>.

боте экскаватора посвящен целый ряд публикаций. Указывается, что при этом выделяется большое количество мелкодисперсной пыли, в т. ч. диаметром менее 10 мкм [3—5]. В работах [6, 7] показано, что такие частицы губительно влияют на легкие и сердечно-сосудистую систему рабочих, находящихся в непосредственной близости к месту работы строительной техники и транспорта. Например, в работах [8, 9] представлены экспериментальные исследования с использованием специализированного оборудования в режиме реального времени. Измерялись параметры ЗВ и их влияние на эффективность работы при выполнении технологических процессов строительства, включая земляные работы, выполняемые одноковшовым экскаватором. Для замера уровня загрязнений использовано оборудование, установленное у каждой из сторон забора строительной площадки. Исследовалось общее влияние шума, вибрации и загрязнения атмосферы при параллельной работе строительной техники и оборудования. На расстоянии 90 м концентрация пыли изменялась в диапазоне $2 \dots 5 \text{ мг/м}^3$, что в несколько раз превышает значение ПДК для воздушной среды жилых зон. Однако данные исследования не дают точного представления о загрязнении от каждого конкретного технологического процесса в отдельности. В работе [10] проведено исследование на базе 108 экскаваторов. В результате выявлено, что экскаваторы выбрасывают 42 тыс. т углеводородов, 522 тыс. т оксидов азота и 39 тыс. т твердых частиц. Среднее время работы экскаваторов в режиме холостого хода, рабочем режиме и режиме движения составляло 21 %, 66 % и 13 % соответственно.

На рисунке 1 представлена наглядная схема с обозначением технологических процессов, сопровождающихся выделением пыли во время осуществления строительных и ремонтных работ на коммуникациях подземного исполнения.

Важной задачей в современных условиях становится прогнозирование и принятие правильных решений для снижения или, в некоторых случаях, исключения загрязнения воздуха посредством применения экологозащитных мероприятий в зоне работы землеройных машин. Однако для принятия того или иного решения, необходимо иметь понятие об источнике распространения загрязнения и о его параметрах, знать необходимые начальные и граничные условия.

В методах расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе² введено понятие виртуального источника выбросов, в который объединяются рассматриваемые источники выбросов при расчетах характеристик распространения ЗВ.

Первоочередной проблемой является определение величины валовых выбросов и максимально разовых выбросов пыли с учетом цикличности технологического процесса.

² Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Приказ Минприроды России от 06.06.2017. № 273. URL: https://rpn.gov.ru/upload/iblock/e60/i_jrcp19xjblgn42fayq0p_bictbzx_i6fs/Prikaz-Minprirody-Rossii-ot-06.06.2017-N-273-Ob-utverzhdenii-metodov-raschetov-rasseivaniya-vybrosov-vrednykh-zagryaznyayushchikh-veshchestv-v-atmosfernom-vozdukhe.pdf.

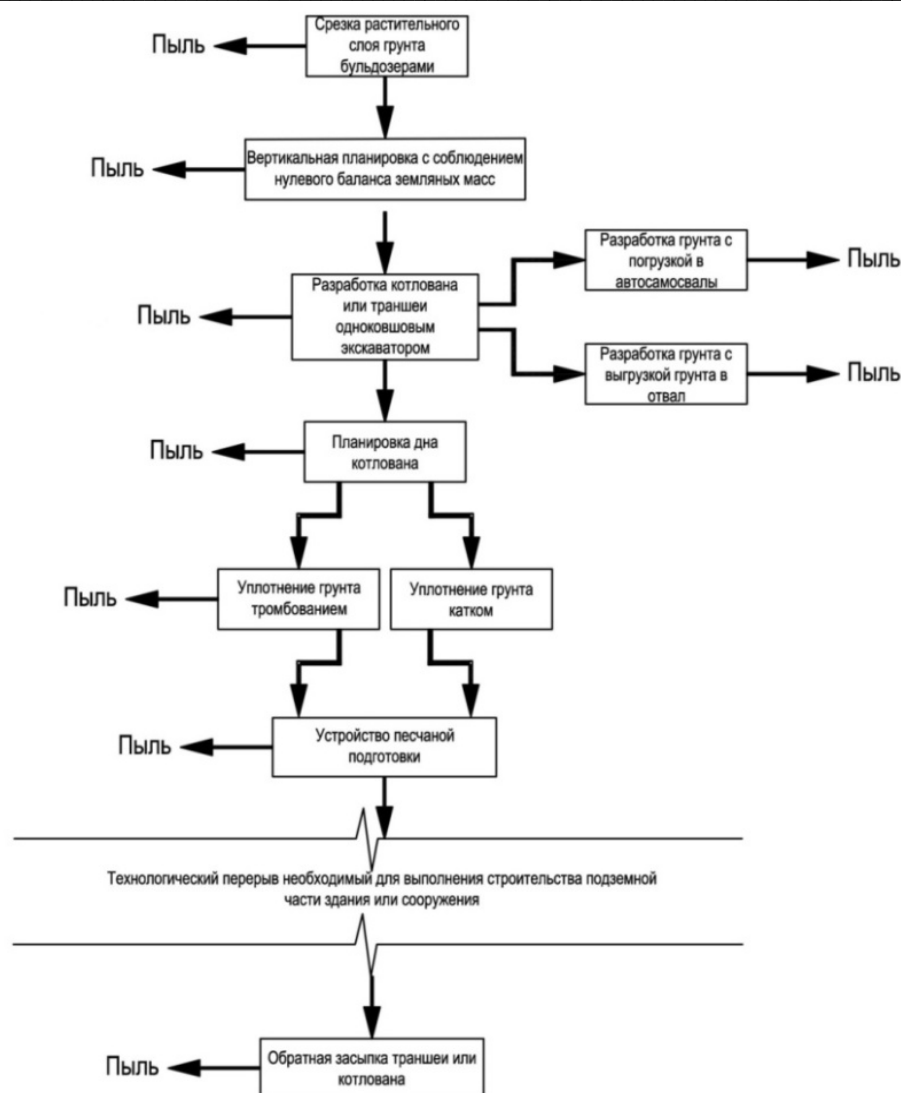


Рис. 1. Схема земляных работ с обозначением технологических процессов, при которых выделяется пыль

Методы и условия натурных исследований

Задачей данной работы являлось построение поверхностей виртуального источника при работе экскаватора и определение концентрации ЗВ в месте его расположения. При исследовании геометрической формы поверхности виртуального источника проведены натурные замеры на строительных площадках г. Волгограда. Для определения значений концентрации пыли в условиях строительной площадки применен прибор для отбора проб воздуха ПА-300М-2. Отбор проб осуществлялся на фильтры АФА, при разных режимах работы экскаватора и бульдозера в Краснооктябрьском районе Волгограда по ул. Пржевальского. Замеры осуществлялись в сухую зимнюю погоду при температуре воздуха -9°C и скорости ветра 9 м/с . Объем ковша экскаватора составляет $0,16\text{ м}^3$, объем переднего отвала экскаватора $1,2\text{ м}^3$. Интервал

цикла работы рабочего органа экскаватора составляет 15 с, т. е. в 1 мин осуществлялось 4 выгрузки («броска») грунта из ковша. Отбор проб на фильтр для каждого режима работы одноковшового экскаватора отбирался в течение 30 мин в соответствии с методикой измерений³.

Как показывают натурные замеры в условиях строительной площадки и результаты расчетов в программных комплексах, например УПРЗА «Эколог» (рис. 2), концентрация пыли в местах проведения земляных работ превышает ПДК в несколько раз. На рисунке 2 показана цилиндрическая поверхность 4 виртуального источника при осуществлении технологической операции выгрузки грунта одноковшовым экскаватором 1 в отвал 2.

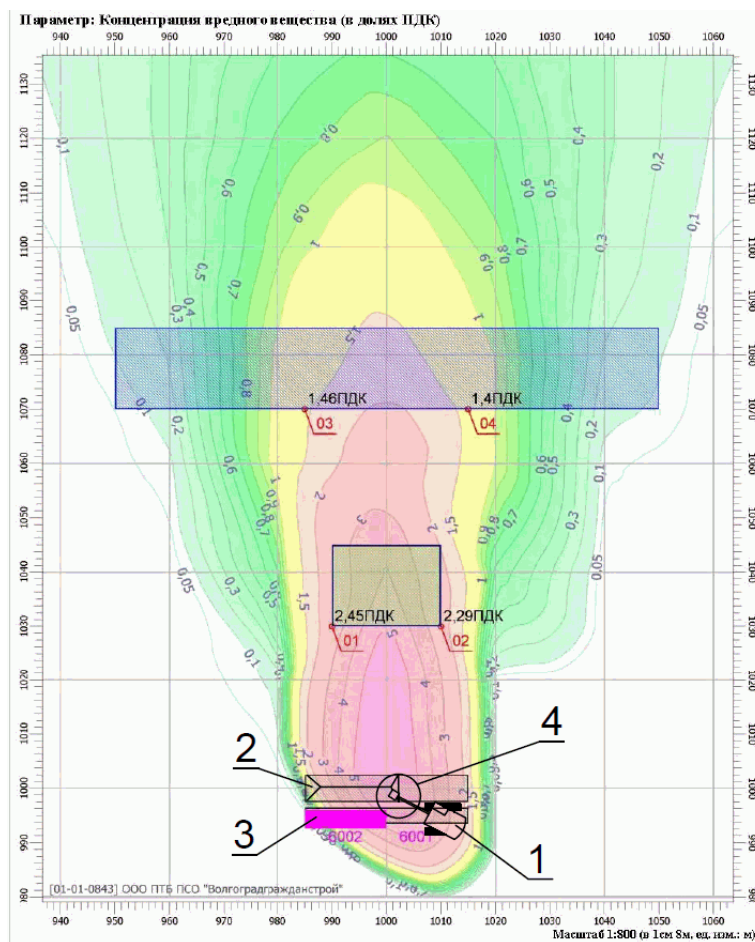


Рис. 2. Изолинии распространения мелкодисперсных частиц от одновременного действия пыления от отвала и от высыпания ковша при скорости ветра 1 м/с: 2,45 ПДК и 2,29 ПДК — значения концентрации вредного вещества на границе детской площадки; 1,46 ПДК и 1,4 ПДК — значения концентрации вредного вещества на границе парковой зоны: 1 — одноковшовый экскаватор; 2 — отвал, 3 — вскрытая траншея; 4 — поверхность виртуального источника

³ РД 52.04.893—2020. Массовая концентрация взвешенных веществ в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений гравиметрическим методом. URL: <http://docs.cntd.ru/document/565233912>.

Получены расчетные значения, что концентрация ЗВ на границе детской площадки при расчете в УПРЗА «Эколог» составляет значения 2,45 ПДК и 2,29 ПДК, а в парковой зоне 1,46 ПДК и 1,4 ПДК.

В результате действия ветра возникает рассеивание частиц пыли на большие расстояния. Учитывая, что в зоне расположения поверхности виртуального источника концентрация пыли превышает значение ПДК в пять раз, необходимо детально учитывать модель перемещения частиц при работе экскаватора. Поскольку практически всегда при вскрытии траншеи, особенно при выполнении ремонтно-восстановительных работ на инженерных сетях, в зоне работы экскаватора находится несколько рабочих и инженерно-технических работников, необходимо учитывать и нормировать не только рабочее время их пребывания [11], но и модель перемещения загрязнителя.

Основные результаты исследования

Работа экскаватора как источника загрязнения атмосферного воздуха представляет собой сложный нестационарный процесс, который, можно разделить на 6 технологических операций (этапов):

1. Резание грунта и заполнение ковша. При резании грунта ковшом экскаватора и наполнении ковша грунтом происходит подъем массива грунта с его разрыхлением и отделением мелкодисперсных частиц.

2. Подъем ковша с грунтом. Часть грунта при подъеме ковша в наполненном виде высыпается из него, вызывая тем самым выброс мелкодисперсных частиц в приземный слой в месте выполнения работ.

3. Поворот ковша с грунтом. При повороте рабочего органа одноковшового экскаватора с наполненным ковшом из него высыпается грунт, возникает рассеивание частиц грунта от встречного потока воздуха.

4. Выгрузка грунта из ковша. При выгрузке грунта из ковша происходит самое большое рассеивание частиц грунта, т. к. происходит падение грунта с высоты выгрузки ковша экскаватора. В результате возникает не только перемещение частиц по вертикали, но и рассеивание в горизонтальных направлениях. При наличии ветра частицы дополнительно разносятся на большие расстояния от места выполнения работ.

5. Обратный поворот рабочего органа экскаватора для последующей разработки грунта. При выполнении обратного поворота ковша рабочего органа одноковшового экскаватора возникает дополнительное перемещение уже поднятой пыли (дисперсных частиц) от выгрузки грунта в отвал. Часть частиц, находящихся в воздухе рабочей зоны, вследствие обратного поворота рабочего органа перемещаются вслед за ним.

6. Опускание ковша на грунт для резания грунта. Выполнение этой технологической операции не приводит к рассеиванию частиц грунта.

Для каждой из операций, очевидно, характерны различные начальные условия процесса рассеивания. Разделив цикл по времени на соответствующие этапы и проанализировав их с точки зрения влияния на запыленность воздушной среды и характера пылевыведения, следует отметить, что одновременно с пылевыведением при названных технологических операциях происходит пылевыведение от отвала, что надо учитывать. Для отвала существует своя «виртуальная поверхность» с начальными и граничными условиями.

Проведенные измерения в зоне пыления показали, что поверхность виртуального источника при технологической операции резания грунта может

быть задана сегментом вертикально расположенной цилиндрической поверхности (рис. 3). Как показали проведенные визуальные измерения, пространственное расположение сегмента виртуальной поверхности зависит от направления ветра. Натурные исследования показали, что для всех размеров ковша в диапазоне $0,15...2 \text{ м}^3$ можно принимать виртуальную поверхность в виде сегмента цилиндрической поверхности. При осуществлении технологической операции резания грунта для ковшей с диапазоном размеров $0,15...0,8 \text{ м}^3$ радиус цилиндрической вертикальной поверхности равен радиусу резания грунта плюс 2 м, а для ковшей с вместимостью $0,8...2 \text{ м}^3$ радиус цилиндрической вертикальной поверхности равен радиусу резания грунта плюс 3 м.

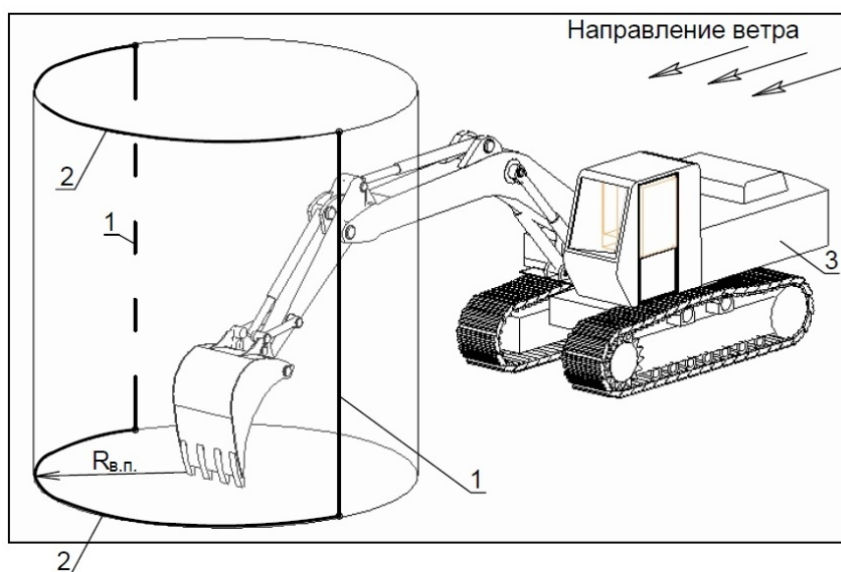


Рис. 3. Поверхность виртуального источника при осуществлении технологической операции выгрузки грунта из ковша: 1 — граница виртуальной поверхности при работе одноковшового экскаватора при направлении действия ветра вдоль траектории движения экскаватора (гусениц); 2 — проекция «виртуальной» поверхности; 3 — одноковшовый экскаватор; $R_{в.п.}$ — радиус поверхности виртуального источника

При осуществлении технологической операции переноса ковша с грунтом в наполненном состоянии образуется поверхность, как показано на рис. 4.

Для ковшей с вместимостью $0,15...2 \text{ м}^3$ диаметр цилиндрической поверхности зависит от радиуса вращения ковша в наполненном состоянии, значение которого принимается в зависимости от марки экскаватора. Причем сегмент виртуальной поверхности должен описывать дугу от точки наполнения до точки выгрузки грунта. При задании начальных условий необходимо учитывать сегмент цилиндрической поверхности, который расположен в направлении движения потока ветра

Реальная (итоговая) поверхность для расчета зависит от направления ветра. При расчете необходимо учитывать следующие данные: скорость ветра, валовый выброс, концентрацию, дисперсный состав, площадь поверхности, высоту виртуальной поверхности.

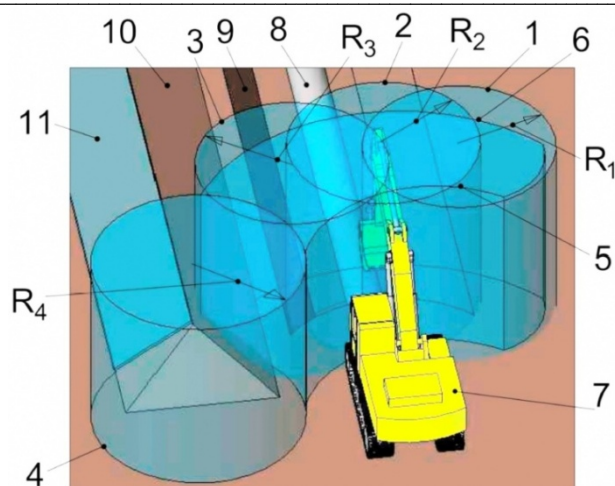


Рис. 4. Общий вид поверхностей виртуального источника при осуществлении цикла работы одноковшового экскаватора: 1 — виртуальная поверхность с радиусом R_1 при резании грунта и подъеме ковша с грунтом с боковой стороны трубопровода; 2 — виртуальная поверхность с радиусом R_2 при резании грунта и подъеме ковша с грунтом над поверхностью трубопровода; 3 — виртуальная поверхность с радиусом R_3 при резании грунта и подъеме ковша с грунтом с другой боковой стороны трубопровода; 4 — виртуальная поверхность с радиусом R_4 при разгрузке ковша; 5 — внутренний радиус R_5 виртуальной поверхности перемещения зубьев ковша; 6 — наружный радиус R_6 виртуальной поверхности перемещения ковша; 7 — одноковшовый экскаватор; 8 — трубопровод; 9 — траншея; 10 — отвал грунта; 11 — виртуальная поверхность при действии ветра на отвал

При технологической операции выгрузки грунта из ковша виртуальная поверхность равна радиусу выгрузки ковша с грунтом, значение которого также зависит от марки экскаватора и принимается по техническим параметрам.

На основании проведенных натурных исследований в таблице приведены результаты измерений концентрации ЗВ и расчета валового выброса в зависимости от высоты выгрузки грунта из ковша и расстояний от точки выгрузки («броска») грунта из ковша при разработке глины.

Результаты измерений запыленности воздуха при работе одноковшового экскаватора в зимних условиях при температуре -9°C

Высота выгрузки грунта, м	Расстояние прибора от точки «броска», м	Концентрация, мг/м^3	Валовый выброс, г/с
2	5	2,6	0,734
4	5	4,1	2,32
2	7,5	0,39	0,33
4	7,5	1,9	3,22

Выводы

Анализ технологических процессов разработки грунта одноковшовым экскаватором показал, что виртуальный источник выбросов в атмосферу может состоять из цилиндрических поверхностей для каждого из шести этапов. Проведенные натурные исследования позволили построить поверхности виртуальных источников.

На основании натурных исследований и расчетов определены валовые выбросы при работе одноковшового экскаватора.

Кроме этого, на основании натурных замеров на источнике пыления и расчета по УПРЗА «Эколог» получены данные о превышении ПДК ЗВ на расстоянии 5...60 м.

Исследования в области поверхностей виртуальных источников позволяют повысить качество и достоверность результатов расчетов при разработке проектов. Следует отметить, что правильное пространственное понимание положения и параметров поверхностей виртуального источника позволяет получить наиболее точный результат расчета, что важно при принятии управленческих организационно-технологических решений на любом из этапов строительства или капитального ремонта инженерных сетей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пахоменко Е. С., Чеченов Т. И., Мясникова А. А., Савельева Е. Э. Анализ динамики стоимости и ввода объектов жилой недвижимости в эксплуатацию в России // Управленческий учет. 2024. № 4. С. 20—27.
2. Cheriyan D., Choi J. A review of research on particulate matter pollution in the construction industry // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 254. Pp. 120077.
3. Occupational health risk assessment based on dust exposure during earthwork construction / Q. Luo, H. Lepeng, X. Xue, Z. Chen, F. Zhou, L. Wei, J. Hua // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 44. Iss. 3. Pp. 103186.
4. Organizatsiya dobychi poleznykh iskopaemykh v kar'erakh so slozhnymi usloviyami truda gornorabochikh (Open Pit Mineral Mining under Difficult Operating Conditions for Miners) / A. P. Bul'bashev, N. A. Gaspar'yan, S. V. Kovshov, A. N. Nikulin, Yu. D. Smirnov, Yu. V. Shuvalov // Vestnik MANEB. 2009.
5. Traffic-related air pollution and the development of asthma and allergies during the first 8 years of life / U. Gehring, A. H. Wijga, M. Brauer, P. Fischer, J. C. de Jongste, M. Kerkhof, B. Brunekreef // American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. 2010. Vol. 181. No. 6. Pp. 596—603.
6. Huang J., Deng F., Wu S. Acute effects on pulmonary function in young healthy adults exposed to traffic-related air pollution in semi-closed transport hub in Beijing // Environmental Health and Preventive Medicine. 2016. Vol. 21. Iss. 5. Pp. 312—320. DOI:10.1007/s12199-016-0531-5.
7. Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China / H. Kan, S. London, G. Chen, Y. Zhang, G. Song, N. Zhao, L. Jiang, B. Chen, /Environment International. 2007. Vol. 33. Iss. 3. Pp. 376—384.
8. Impact of environmental pollutants on work performance using virtual reality / H. Juwon, S. Song, C. Ahn, C. Koo, D.-E. Lee, H. S. Park, T. Hong // Automation in Construction. 2024. Vol. 168. Iss. 11. Pp. 105833.
9. An empirical analysis of environmental pollutants on building construction sites for determining the real-time monitoring indices / H. Juwon, H. Kang, S. Jung, S. Sung, T. Hong, H. S. Park, D. Lee // Building and environment. 2020. Vol. 170. Pp. 106636.
10. Data-driven method for estimating emission factors of multiple pollutants from excavators based on portable emission measurement system and online driving characteristic identification / Y. Wang, H. Cai, X. Hu, P. Liu, Q. Yan, Y. Cheng // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 912. Pp. 169472. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169472.
11. Поляков И. В. О пылевом загрязнении атмосферного воздуха от площадных и стационарных источников // АЭЭ. 2013. Т. 11. № 133. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-pylevom-zagryaznenii-atmosferного-vozduha-ot-ploshchadnyh-i-nestatsionarnyh-istochnikov>.

© Ахмедов А. М., 2025

Поступила в редакцию
в декабре 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Ахмедов А. М. Исследование конфигурации поверхности виртуального источника загрязнения воздушной среды при земляных работах в строительстве // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 1(98). С. 220—228. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_220.

Об авторе:

Ахмедов Асвар Микдадович — старший преподаватель каф. технологий строительного производства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; asvar05@mail.ru; ORCID: 0000-0003-1087-4257

Asvar M. Akhmedov

Volgograd State Technical University

INVESTIGATION OF THE SURFACE CONFIGURATION OF A VIRTUAL SOURCE OF AIR POLLUTION DURING EXCAVATION IN CONSTRUCTION

The article examines the influence of the geometric configuration of the surface shape of a virtual source on the example of the technological process of opening a trench with a single-bucket excavator. Spatial 3D models of emerging virtual surfaces during the operation cycle of a single-bucket excavator are shown. The constructed combination of virtual source surfaces is vividly illustrated by the working planes through which the dust particles pass. The research presented in this article will allow engineers to determine and refine the initial and boundary conditions for calculating the level of pollution during operation of single-bucket excavators, as well as make decisions on choosing the most optimal methods of combating air pollution at the workplace of the equipment. To determine the parameters of the virtual source surfaces, numerous field studies and measurements were carried out under construction site conditions.

Key words: earthworks, atmospheric air, emissions, PM2.5, PM10, single-bucket excavator, dispersed composition of soil particles, dust air pollution, engineering network.

For citation:

Akhmedov A. M. [Investigation of the surface configuration of a virtual source of air pollution during excavation in construction]. *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. 1, pp. 220—228. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_220.

About author:

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