

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF THE DISPERSION OF PARTICULATE MATTER AROUND A POINT AND LINE SOURCE

Maya Vatzkitcheva, Plamen Savov, Kalinka Velichkova, Nikolay Kolev, Dimitar Dimitrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: mayavack@mgu.bg

ABSTRACT. Sites for extraction and processing of building materials usually cause an increase in the levels of atmospheric air pollution, and in certain meteorological situations these levels can significantly exceed the maximum permissible norms. The issue is particularly relevant if the mentioned sources are located near settlements, in which emissions from transport are added to those resulting from industrial activity.

This report presents and discusses the results of experimental studies of the dispersion of particulate matter (PM) in the area of the town of Zlatna Panega, in whose vicinity there is a quarry for the extraction of materials for a cement production plant. The measurements were carried out around the plant and near the road with the heaviest traffic. The experimental data were compared with a Gaussian model for the dispersion of PM in the atmosphere. Several meteorological situations were modelled. The data show that in the particular weather situation, the plant pollutes the atmosphere of the town to a lesser extent than does the main road passing through it.

Key words: particulate matter dispersion, Gaussian model.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО И ТЕОРЕТИЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИСПЕРСИЯТА НА ФИНИ ПРАХОВИ ЧАСТИЦИ ОКОЛО ТОЧКОВ И ЛИНЕЕН ИЗТОЧНИЦИ

Майя Вацкичева, Пламен Савов, Калинка Величкова, Николай Колев, Димитър Димитров

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Наличието на обекти за добив и преработка на строителни материали обикновено предизвикват повишаване нивата на замърсеност на атмосферния въздух, като при определени метеорологични ситуации тези нива могат да надхвърлят значително пределно допустимите норми. Проблемът е особено актуален, ако споменатите източници се намират в близост до населено място, в което към емисиите от транспорта се добавят и тези от промишлената дейност.

В настоящия доклад са представени и дискутирани резултати от експериментални изследвания на дисперсията на фини прахови частици в района на гр. Златна Панега, в околността на който се намира кариера за добив на материали към завод за производство на цимент. Измерванията са извършени около завода и в близост до най-натоварената пътна артерия. Експерименталните данни са сравнени с гаусов модел за дисперсията на праха в атмосферата. Моделирани са няколко метеорологични ситуации. Данните показват, че при конкретната метеорологична ситуация заводът замърсява в по-ниска степен атмосферата на града в сравнение с натовареното шосе, минаващо през него.

Ключови думи: дисперсия на фини прахови частици, гаусов модел.

Въведение

Целта на този материал е да се направи едно комплексно научно изследване на дисперсията на фини прахови частици в атмосферата около трите основни типа източници – точков (завод за производство на цимент, гр. Златна Панега), линеен (магистрала (околовръстен път)) и площен (открит рудник/кариера до град Златна Панега на 1.5 км). Подобни проучвания са публикувани в (Abu-Allaban at al., 2011; Kolev at al., 2019, Vatzkitcheva at al., 2020, Savov at al., 2021). Замърсяването на атмосферния въздух се установява по два метода: мониторинг (Mugonova, 2015; Kolesnik at al., 2016; Vambol at al., 2017; Kolesnyk at al., 2020;) и дисперсионно моделиране (Venegas at al., 2014; Petrov at al., 2016), като паралелно се провеждат наблюдения на основните метеорологични елементи в приземния слой на атмосферата: посока и скорост на вятъра, атмосферно налягане, температура на въздуха,

слънчево греене и влажност на въздуха. Дисперсионното моделиране дава възможност да се изготвят профили на концентрациите на замърсители в атмосферния въздух. За целта се използва Гаусов модел за дисперсията на аерозола в зависимост от стратификацията на атмосферата (Buske at al., 2012; Venegas at al., 2014; Draxler, 1979; Petrov at al., 2016).

Въздухът в атмосферата е в непрекъснато вертикално и хоризонтално движение. Атмосферната циркулация и разслояване (стратификация) в зависимост от устойчивостта си спомагат или затрудняват разсейването на атмосферните замърсители. Устойчивостта на атмосферата е елемент, определящ динамиката на атмосферната циркулация и моментната способност за разсейване на вредни вещества в нея. Устойчивостта зависи от термичната конвекция – изменението на температурата на въздуха по височина и механичната

турбулентност – функция на скоростта на вятъра и грапаковостта на подстилащата повърхност.

При дисперсионното моделиране, способността на атмосферата за движение във вертикална посока се определя чрез въведените за целта категории на устойчивост на атмосферата. В качествено отношение тези категории са известни със следните означения: А – силно неустойчива атмосфера; В – умерено неустойчива атмосфера; С – неустойчива атмосфера; D – неутрална атмосфера; Е – слабо устойчива атмосфера; F – устойчива атмосфера (Draxler, 1979).

Състоянието на атмосферното замърсяване и способността на атмосферата да се самоочиства е пряко свързана с конкретна стратификация и клас на устойчивост на приземната атмосфера. При голяма слънчевата радиация и малка скорост на вятъра, устойчивостта се определя като клас А. При силна слънчева радиация и скорост на вятъра над 6 m/s класът е С, тъй като силният вятър препятства развитието на естествена термична конвекция, каквато се наблюдава при безветрие или много слаб вятър. Клас А, съответстващ на силно неустойчива атмосфера, и клас В – умерено неустойчива, са най-благоприятните за разсейване условия, защото част от замърсителите се пренасят във височина и не позволяват достигането на високи приземни концентрации.

Фините прахови частици са микроскопични твърди и течни частици от органични и неорганични вещества, суспендирани в земната атмосфера. Актуалната дефиниция за фини прахови частици идва от въведения през 1987 година от Американската агенция за опазване на околната среда (United States Environmental Protection Agency): „National Air Quality“ стандарт за Particulate Matter (накратко означен като PM-стандарт). В българското законодателство за фините прахови частици е приета абревиатурата ФПЧ, като в зависимост от размера на частиците се означават като ФПЧ10 и ФПЧ2,5.

Степента на замърсяване на атмосферния въздух над дадена територия зависи основно от 2 фактора: наличие на източници на вредни емисии (точкови, линейни и

площни) с техните характеристики – местоположение, пространствени параметри, масов поток и режим на емитиране, както и от микроклиматичните особености на разглеждания район. Масовият поток и времетраенето на емитиране на аерозоли от източниците зависи от режима на вятъра и степента на засушаване на земната повърхност, което пък е следствие от режима на валежите. Един от метеорологичните елементи с най-силно влияние върху разпределението на вредните вещества в атмосферата е вятърът. Концентрацията на замърсителите от постоянно действащи източници е обратно пропорционална на скоростта на вятъра. Ако той е устойчив по посока, замърсяването е по-голямо, отколкото при вятър с променлива посока.

Експеримент

Измерванията са проведени на 23.05.2022 г. в района на град Златна Панега (Фиг. 1). През западната част на града минава основен междуградски път (Е83) със значителен трафик, който се явява линеен източник на замърсяване с фини прахови частици. На изток, на 1 km от последните къщи, е разположен завод за производство на цимент, чийто комин се разглежда като точков източник. Данните за масовата концентрация на фините прахови частици и метеопараметрите са измерени преди обяд в интервала 9–11 ч. и следобяд между 14 и 16 ч. И в двата случая се снемат данни първо в точки от 1 до 4 над с. Брестница (около 3 km югоизточно от завода) и след това по дължина на града (точки от 5 до 8). Отстоянията между точките на дадено измерване са около 200 m. Най-близко разположената измервателна точка до линейния източник е 5-та, а до завода е 8-ма. За основен източник на замърсяване в града предположихме, че е пътят София-Плевен, а за т. 1–4 – заводът за цимент.

Числената и масовата концентрации на ФПЧ са измерени с преносими лазерни броячи на частици BQ20 – Trotec, измерващи в два канала: канал 1 (0 – 2,5 μm) и канал 2 (2,5 – 10 μm), обозначени по-нататък в текста съответно като PM2,5 и PM10.



Фиг. 1. Карта на района с измервателните точки

Концентрациите се измерват на момента, като скоростта на вземане на проби е 0,9 l / min. Точността на устройствата е в диапазона 15-20%.

Метеорологичните параметри са измервани с мултифункционална станция PCE-FWS 20-1. Тя позволява точно измерване на посоката и скоростта на вятъра чрез анемометър, на температурата и относителна влажност на въздуха чрез термохигрометър и на количеството на валежите (валежометр). Измерваните параметри са: температура в градуси по Целзий, относителна влажност в %RH, атмосферно налягане в hPa, посока и скорост на вятъра съответно в deg и m/s. Слънчевата радиация е измерена с уред PCE-SPM1.

Метеорологична обстановка по време на експеримента беше както следва. За сутрешните измервания около 10 часа: температура на въздуха 19 °C; скорост на вятъра 2-3 m/s; посока запад; слънчева радиация – 650-700 W/m².

За следобедните измервания около 14 часа: температура на въздуха 23 °C; скорост на вятъра 3-5 m/s; посока запад-северозапад; слънчева радиация – 850-950 W/m².

Стойностите на метеорологичните параметри по време на експеримента ни дават основание да предположим, че класът на устойчивост на атмосферата е между А и В.

Обработка и анализ на данните

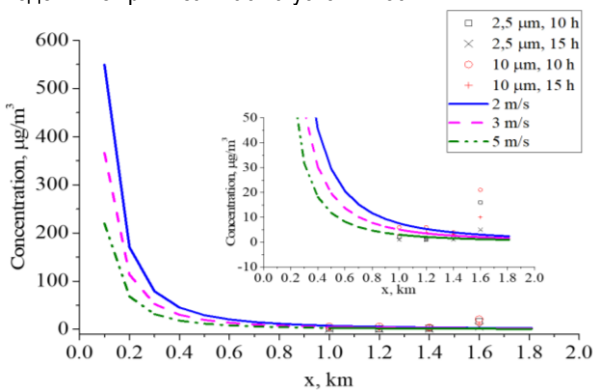
За теоретично моделиране на дисперсията на ФПЧ се използва гаусов модел за линеен и точков източник, описан в Petrov et al. (2016).

За точков източник уравнението на разпределение на ФПЧ като функция на разстоянието от източника на частици е

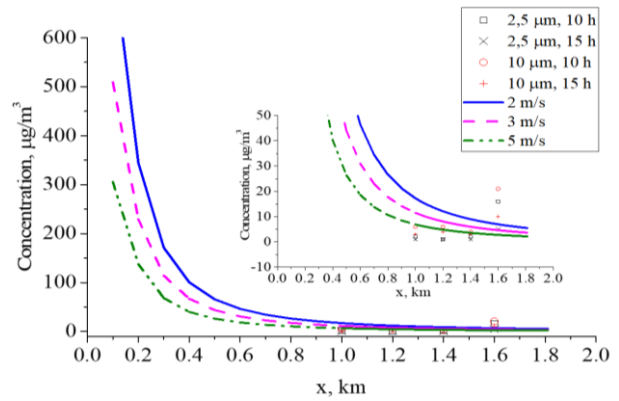
$$C(x,0,0) = \frac{Q}{\pi\sigma_z u} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}},$$

където Q е интензитетът на източника на замърсяване, u – скоростта на вятъра, H – височината на източника, а σ_z – дисперсията на частиците във височина (по оста z). Стойностите на параметрите при моделирането са $Q = 2$ g/s, $u = 2$ m/s; 3 m/s и 5 m/s, $H = 15$ m, $\sigma_z = 0,2x$ за клас на устойчивост тип А и $\sigma_z = 0,12x$ за клас на устойчивост тип В.

На Фиг. 2 са показани моделните криви на дисперсия на частиците за клас на устойчивост тип А, а на Фиг. 3 – моделните криви за клас на устойчивост тип В.



Фиг. 2. Изменение на концентрация на ФПЧ с размери 2,5 μm и 10 μm с отдалечаване от източника (комина на завода за цимент) за клас на устойчивост тип А

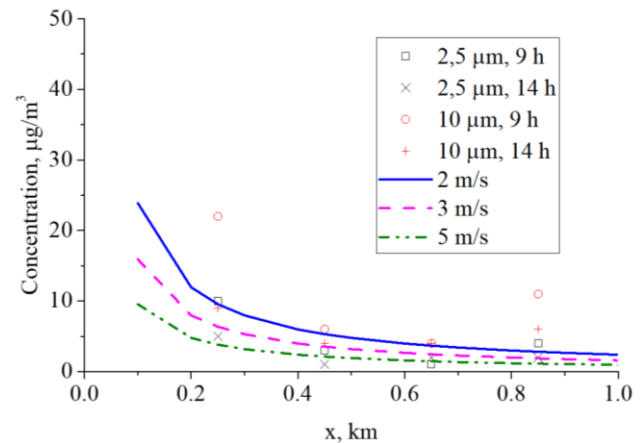


Фиг. 3. Изменение на концентрация на ФПЧ с размери 2,5 μm и 10 μm с отдалечаване от източника (комина на завода за цимент) за клас на устойчивост тип В

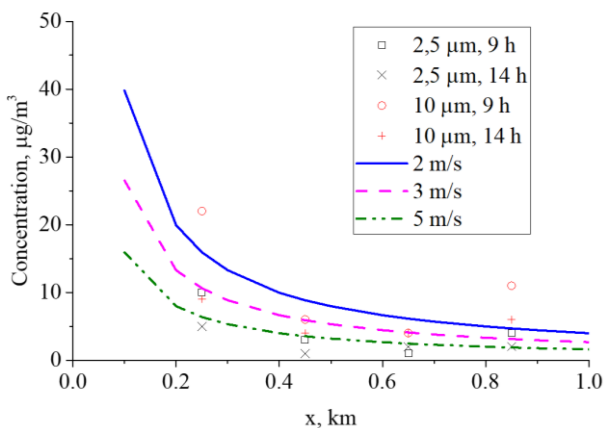
Върху двете графики са нанесени и концентрациите на фините прахови частици, измерени по шосето, източно от циментовия завод (Фиг. 1, точки 1 - 4). По абсцисата е нанесено отстоянието на точките на измерване от циментовия завод, а по ординатата – масовата концентрация на ФПЧ. В малките графики е даден интервалът 0-50 μg/m³ за по-добра визуализация на изменението в измерените стойности на концентрацията.

От сравнението между двата класа на устойчивост се вижда, че по-добро съвпадение има при тип А и скорост на вятъра около 3 m/s. Не се забелязва съществена разлика в стойностите на концентрацията между сутрешните и следобедните часове. Единствено на разстояние около 1600 m от завода имаме съществено различие между експерименталните стойности и тези от модела. Едно логично обяснение на този факт е, че шосето по което са извършени измерванията има лек положителен наклон по трасето на измерване и на ниво четвърта точка денивелацията спрямо завода е около 20 - 30 m. По този начин четвъртата точка на измерване може да се намира на нивото на линията на максимална концентрация на факела от фини прахови частици, емитирани от завода.

На Фиг. 4 и Фиг. 5 са показани моделните криви на дисперсия на частиците за клас на устойчивост тип А и тип В, съответно, за линейния източник на замърсяване - крайградският път, който е значително натоварен от преминаващите преобладаващо тежкотоварни камиони.



Фиг. 4. Изменение на концентрация на ФПЧ с размери 2,5 μm и 10 μm с отдалечаване от линейния източник на замърсяване за клас на устойчивост А



Фиг. 5. Изменение на концентрация на ФПЧ с размери 2,5 µm и 10 µm с отдалечаване от линейния източник на замърсяване за клас на устойчивост В

Уравнението за моделиране на разпределението на ФПЧ като функция на разстоянието от линейен източник на частици е

$$C(x,0,0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}},$$

където Q , u , H и σ_z са параметрите, определени по-горе, а σ_y е дисперсията на частиците, перпендикулярно на линейния източник (пътя). Дисперсията σ_y за клас на устойчивост тип А се определя с израза

$$\sigma_y = 0,22x \cdot (1+10^{-4}x)^{-0,5},$$

а за тип В

$$\sigma_y = 0,16x \cdot (1+10^{-4}x)^{-0,5}.$$

Интензитетът на източника е $Q = 3 \text{ mg/(s.m)}$, а останалите приемат стойностите, посочени по-горе.

На Фиг. 4 и Фиг. 5 са показани също и измерените масови концентрации в сутрешните и следобедните часове, като при този експеримент, точките на измерване са разположени в посока изток, почти перпендикулярно на шосето (точки 5-8 на Фиг. 1).

При сравнение между двете фигури за дисперсията на фините прахови частици може да се заключи, че най-добро съвпадение между теория и експеримент отново се наблюдава при клас А и скорост на вятъра около 3 m/s.

От фигурите се вижда, че след около 200 m от източника нивата на масовата концентрация спадат под $10 \mu\text{g/m}^3$, което се счита за сравнително чист въздух.

Интересно е да се отбележи, че и за двата района на измерване, моделът дава по-добро съответствие с експерименталните данни за концентрацията на по-фината фракция (2,5 µm) на праховите частици, докато за 10 µm имаме по-голямо разминаване. Тази разлика би могла да се дължи на това, че теренът не е равнинен, а хълмист и то с наличие на дървесна растителност – особено при участъка след циментовия завод (точки от 1 до 4). Този факт с голяма вероятност би могъл да доведе до по-висока степен на турбулентност на атмосферата, което от своя страна да причинява и наблюдаваните различия.

Заклучение

От анализа на експерименталните данни и при сравнението им с теоретичния гаусов модел за дисперсията на аерозола в атмосферата, могат да се направят няколко извода.

Измерените нива на масовата концентрация на фините прахови частици и при двата източника и за двата диапазона на радиуси (2,5 µm и 10 µm) са 2–3 пъти под средноденонощните пределно допустими концентрации.

От направените сравнения за дисперсията на аерозола между експерименталните данни и модела се вижда, че данните около шосето по-добре корелират помежду си, докато тези около циментовия завод, особено в края на трасето, значително се разминават. Това показва, че гаусовият модел описва по-добре дисперсията над равнинни терени, докато използването му при хълмисти и пресечени местности не е много удачно или трябва да се използва по-внимателно.

Друг интересен факт, който ясно се вижда върху направените графики за дисперсията, е, че теоретичните криви за масовата концентрация на аерозола дават малко по-високи стойности за канала 2,5 µm и малко по-ниски за 10 µm (разлика в интервала около 5 - 10%). Понеже по-голямата разлика е около завода, може да се твърди, че и тук основна роля играе по-сложната орография на терена, която допълнително би могла да турбулизира аерозолния факул и съответно да доведе до по-сложна картина на разпределението на приземната концентрация.

Благодарности

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на:

- Национална научна програма (ННП) „Опазване на околната среда и намаляване на риска от неблагоприятни явления и природни бедствия“, одобрена с Решение на МС № 577/17.08.2018 г. и финансирана от МОН (Споразумение № Д01-322/18.12.2019).
- Дог. ГПФ № 244, НИС-МГУ, Срок: V – XII.2023 г. „Изследване на комплексното влияние на натоварен междуградски път и открита кариера за добив на инертни материали към циментов завод върху дисперсията на фини прахови частици в атмосферата на населено място“. Ръководител: доц. д-р Майя Вацкичева - катедра „Физика“, научен колектив: доц. д-р Пламен Савов, доц. д-р Н. Колев, гл. ас. д-р Калинка Величкова, гл. ас. д-р Димитър Димитров - катедра „Физика“.

Литература

- Abu-Allaban, M., Hani Abu-Qdais. 2011. Impact Assessment of Ambient Air Quality by Cement Industry: A Case Study in Jordan, *Aerosol and Air Quality Research* 11(7):802–810, 10.4209/aaqr.2011.07.0090
- Buske, D., M. Tullio Vilhena, T. Tirabassi, B. Bodmann. 2012. Air Pollution Steady-State Advection-Diffusion Equation: The General Three-Dimensional Solution. *Journal of Environmental Protection*, 3, pp. 1124-1134.
- Draxler, R. R. 1979. Estimating vertical diffusion from routine meteorological tower measurements, *Atmospheric Environment, Volume 13*, Issue 11, pp. 1559-1564.
- Kolesnik, V. Ye., A.V. Pavlichenko, Yu. V. Buchavy. 2016. Termination of dynamic parameters of dust emission

- from a coal mine fang. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), pp. 81–87.
- Kolesnyk, V., A. Pavlychenko, O. Borysovska, Y. Buchavyi, D. Kulikova. 2020. Justification of the method of dust emissions localization on mobile crushing and sorting complexes of quarries with the use of air-andwater ejectors, *E3S Web of Conferences* 168, 00029, pp.14.
- Kolev, N., P. Savov, M. Vatzkitcheva, K. Velichkova, D. Dimitrov, B. Vladkova, S. Toncheva. 2019. The impact of outdoor mining activities on atmospheric air quality in nearby settlements. *Journal of Mining and Geological Sciences, Volume 62*, Number 2, pp. 45-49.
- Myronova, I., 2015. The level of atmospheric pollution around the iron-ore mine. *New Developments In Mining Engineering*, pp. 193-197.
- Petrov, A., E. Batchvarova, M. Kolarova. 2016. Performance Assessment of Gaussian Dispersion Model AERMOD as a Tool for an Urban Air Quality Emergency Response, *3rd National Congress on Physical Sciences*, 29 Sep. - 2 Oct. 2016, Sofia, pp. 1-9. (in Bulgarian with English abstract).
- Savov, P., N. Kolev, M. Vatzkitcheva, K. Velichkova, D. Dimitrov, B. Vladkova. 2021. Urban parks and their relation to air pollution. *Annual of University of mining and geology “St. Ivan Rilski” – Sofia, volume 64*, pp. 81-86.
- Vambol, S., V. Vambol, I. Bohdanov, Y. Suchikova, N. Rashkevich. 2017. Research of the influence of decomposition of wastes of polymers with nanoinclusions on the atmosphere. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 10(90), pp. 57-64.
- Vatzkitcheva, M., K. Velichkova, N. Kolev, P. Savov. 2020. A study of horizontal distribution pattern of particulate pollutants near a highway, *Annual of University of mining and geology “St. Ivan Rilski” – Sofia, volume 63*, pp. 113-117.
- Venegas, L. E., N. A. Mazzeo, M. C. Dezzutti. 2014. A simple model for calculating air pollution within street canyons, *Atmospheric Environment* 87, 77-86.