



Analysis of modelled distribution of air pollutants around buildings at different meteorological conditions

Anton Petrov

*National Institute of Meteorology and Hydrology,
Tsarigradsko shose 66, 1784 Sofia, Bulgaria*

Abstract. This paper presents the study and the obtained results from atmospheric dispersion model simulated air pollutant distribution in the area surrounding an apartment building, situated in close proximity to a boulevard. Model runs were performed for different meteorological conditions. Windless situations were chosen, as well as some, in which the wind flow direction is either perpendicular or parallel to the building of interest, in combination with different atmospheric stability conditions. The influence of the surrounding buildings over the approaching flow was taken in consideration as well. The boulevard is presented as a constant emission rate line source.

Keywords: Atmospheric dispersion model (ADM), Urban air pollution, Urban air pollution modelling.

Анализ на моделираното разпределение на замърсители около сгради при различни метеорологични условия

Антон Петров

*Национален Институт по Метеорология и Хидрология,
бул. «Цариградско шосе» №66, София 1784*

Резюме. В тази статия са представени изследванията и получените резултати от симулираните от атмосферен дисперсионен модел разпределения на концентрациите на замърсители около жилищен блок, намиращ се в непосредствена близост до голям булевард. Симулациите са осъществени за различни метеорологични условия. Избрани са ситуации на безветрие и такива, при които вятърът духа перпендикулярно или успоредно на разглежданата сграда, при три различни класа на атмосферна устойчивост. Отчетено е също влиянието на околните сгради върху характера на

постъпващия въздушен поток. Булевардът е представен като линеен източник с постоянни емисии.

Ключови думи: Атмосферен дисперсионен модел (АДМ), Градско атмосферно замърсяване, Моделиране на атмосферното замърсяване.

1. УВОД

Бурното развитие на изчислителната техника през последните две десетилетия даде възможност за решаването на задачи със скорост, която до преди е била немислима. С голяма сила това важи за изчисления свързани с различни явления в атмосферата, особено когато се разглеждат в локален и микро мащаб. При моделирането на атмосферното замърсяване се сблъскваме и с допълнителното усложнение от това, че различните замърсители имат определено поведение, свързано с техните химични свойства. В градска среда, където заради влиянието на сградите, полетата на различните метеорологични елементи се отличават с наличието на големи градиенти, разпределението на замърсителите добива по-трудно предвидим характер. Намиращите се в непосредствена близост до натоварени пътища жилищни блокове се явяват естествена бариера срещу проникването на изгорелите газове в междублоковите пространства. Това неминуемо води до големи разлики в концентрациите на замърсители от двете страни на такава сграда. Различните метеорологични условия могат да модифицират разпределението на отпадъчните газове, както в благоприятна, така и в крайно неблагоприятна посока. Целта на настоящата работа е търсенето на определени закономерности, свързани с влиянието на сградите върху разпределението на атмосферните замърсители, за всеки един конкретен случай.

2. ОПИСАНИЕ НА ИЗПОЛЗВАНИЯ АТМОСФЕРЕН ДИСПЕРСИОНЕН МОДЕЛ

Изследването е осъществено с GRAL v.20.01 (Graz Lagrangian Model) - Лагранжев дисперсионен модел, създаден през 1999 г. в Технически Университет - Грац, Австрия, където се използва широко за регулаторни цели и научни изследвания (Oettl, 2019). Основна причина за създаването на GRAL са проблемите възникващи от честите епизоди на застой на атмосферни замърсители в планинските долини на Австрия, където в 90% от наблюдаваните случаи скоростта на вятъра не превишава 1.5 ms^{-1} (Lazar & Podesser, 1999). Аналогични ситуации се наблюдават и в нашата страна - особено по котловинните полета, което е причина да се спрем на този модел. GRAL е част от системата GRAMM/GRAL. GRAMM (Graz Mesoscale Model) е мезомащабен прогностичен модел, който изчислява полетата на вятъра, отчитайки влиянието на релефа върху въздушния поток. Изходящата информация

от GRAMM след това се усвоява от GRAL. В представеното тук изследване GRAMM не се използва и симулацията е зададена за равен терен. В GRAL е наличен вграден микромашабен потоков (CFD) модел, който отчита влиянието на сградите и растителната покривка върху въздушните потоци. Лагранжевият модул, който се явява главното ядро на моделната система, изчислява:

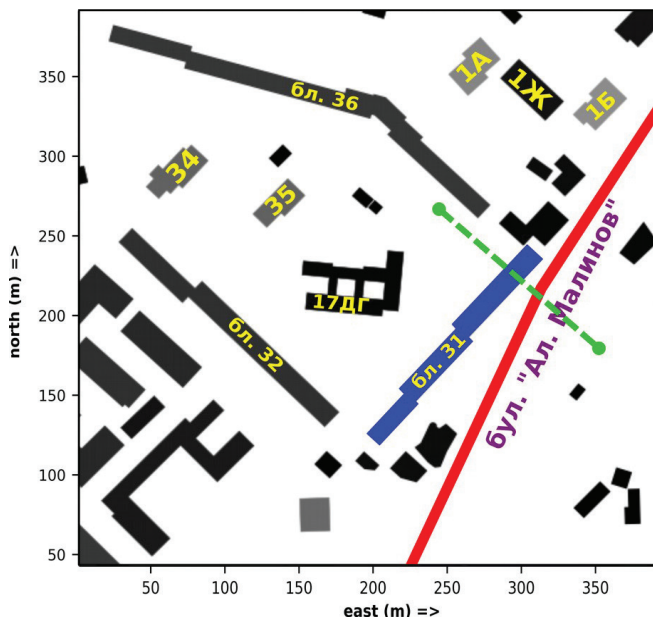
- Дисперсия на химически неактивни замърсители;
- Разпространение на миризми;
- Суха и мокра депозиция и седиментация;
- Дисперсия на замърсители от вход/изход на тунели;
- Дисперсия на замърсители за широк диапазон скорости на вятъра, без долна граница и за всички класове на устойчивост;
- Разпространение на замърсители със зададено от потребителя време на живот (прилага се за радиоактивни вещества, бактерии и др.).

Едно от най-ценните качества на модела, е възможността за класифициране на метеорологичните ситуации по скорост и посока на вятъра, и по клас на устойчивост. При множество симулации, или при такива, които обхващат по-голям времеви интервал включващ разнообразни метеорологични ситуации, изчисляването на полето на вятъра повлиян от условията на силно нееднородна повърхност би отнело твърде много време. Затова, основните действащи върху разпространението на замърсителите фактори - скорост и посока на вятъра, и обобщената под формата на клас на устойчивост температурна стратификация, биват класифицирани в дискретни интервали. Моделът използва 7 степенна модификация на класовете на устойчивост по Pasquill-Gifford (Pasquill, 1961; Gifford, 1976), която е строго определена и не може да се променя от потребителя. По принцип, за целите на атмосферните дисперсионни модели (АДМ), такъв тип стратификационни схеми работят добре. Не е такъв случаят обаче, когато класификацията по Pasquill се използва като самостоятелен критерий за атмосферна устойчивост, извън приложенията му в АДМ (Kahl and Chapman, 2018). Скоростта и посоката на вятъра могат да бъдат разделени на произволно много интервали, но в модела са зададени препоръчителни стойности по подразбиране: например - посоката на вятъра се дели на 36 сектора по 10° , а скоростта му се дели на 5 класа. По този начин, броят на изчисляваните метеорологични ситуации се ограничава до 1260. Всяка една от тях се съхранява в отделен файл и се усвоява от модела при съвпадение с подадените входни метеорологични данни. Така, необходимостта от повтарящи се изчисления на триизмерното поле на вятъра отпада и остава само пресмятането на дисперсията на замърсителите.

3. ОПИСАНИЕ НА ОПИТНАТА ПОСТАНОВКА

За целта на експеримента е подбрана област на моделиране, която съдържа в себе си конфигурация от жилищен блок и намираща се в непосредствена близост

натоварена пътна артерия. На това изискване отговарят показаните на Фигура 1 блок 31 (оцветен в синьо) и почти успоредно разположения на него бул. «Ал. Малинов» в ж.к. «Младост» 1, София. Зелената пунктирна линия обозначава сечението, в което се разглеждат вертикалните разпределения на концентрациите на замърсителите.



Фиг. 1. Избрана област на моделиране. Със зелен пунктир е отбелязана линията на сечение, по която се разглеждат вертикалните разпределения на концентрациите на азотен оксид.

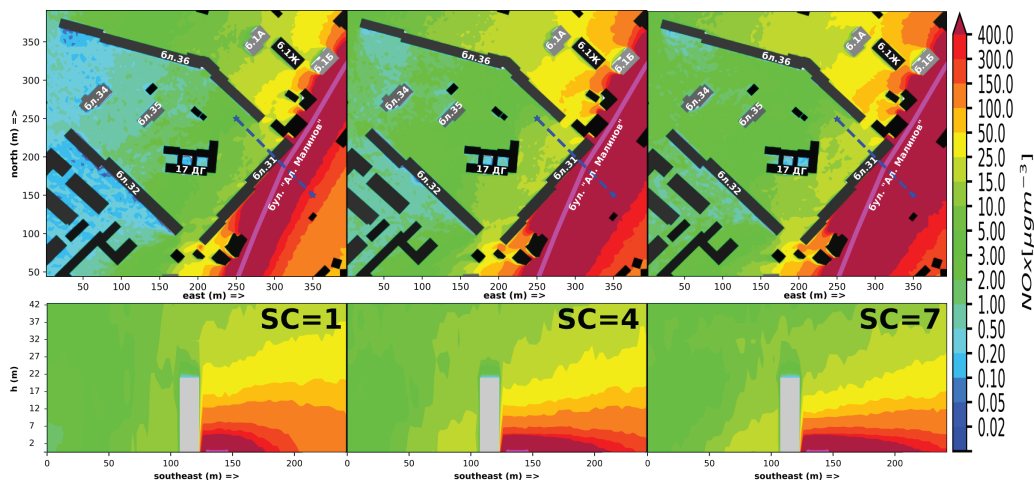
Fig. 1. Selected modelling domain. The green dashed line marks where a vertical slice of NO concentration distribution is taken.

Различните моторни превозни средства отделят различни по състав отпадъчни газове, димни и фини прахови частици, в зависимост от използваното от тях гориво, а също и от амортизацията на двигателя, стила на шофиране и скоростта на автомобила. Основните вещества, които по маса участват с повече от 1% в газовата смес са: вода (H_2O), въглероден диоксид (CO_2), азот (N_2), кислород (O_2), въглероден оксид (CO) и водород (H_2). По-малко от този процент се пада на серните окиси (SO_2 , SO_3), азотните окиси (NO , NO_2), алдехидите (главно формалдехид - $HCHO$), органичните киселини ($HCOOH$ и др.), алкохолите (CH_3OH и др.) и въглеводородите (C_nH_m) (Martin et al., 1955). Понастоящем, особено внимание се обръща и на фините прахови частици с размери до $2.5 \mu m$ и $10 \mu m$ (ФПЧ2.5 и ФПЧ10 съответно), заради доказаното им негативно въздействие върху човешкото здраве (World Health Organization (WHO), 2013).

От всичките изброени по-горе отпадъчни вещества се спираме на азотните окиси (NO_x), като «тестов замърсител». В случая, булевард «Ал. Малинов» се разглежда като постоянно действащ линеен източник на NO_x с мощност $0.0278 \text{ gs}^{-1}\text{m}^{-1}$ ($100 \text{ kg h}^{-1} \text{ km}^{-1}$). Съобразено с ориентацията на блок 31 са приложени 4 различни посоки на вятъра. В два от изследваните случаи направлението на вятъра е по дължината (успоредно) на блока (югозападен и североизточен вятър), а в другите - перпендикулярно, по линията на сечение (северозападен и югоизточен вятър). За всеки от гореизброените случаи са правени симулации при условия на безветрие и при скорости на вятъра от 3 и 7 m s^{-1} , при класове на устойчивост 1, 4 и 7, отговарящи съответно на силно неустойчива, неутрална и силно устойчива температурна стратификация. Тук следва да се отбележи, че не всички комбинации от клас на устойчивост и скорост на вятъра са възможни в действителност. При пълно безветрие например, могат да се реализират само класове 1 и 7. С увеличаване на скоростта на вятъра идва момент, в който динамично генерираната турбулентност започва за взима превес над термично генерираната такава, зависимост, която добре се описва от теорията за подобие на Монин-Обухов (Сираков, 2011). При представената стойност на скоростта на вятъра от 7 m s^{-1} в това изследване, смесването в хоризонтално и вертикално направление е добре изразено, което води до изравняване на температурите във всички части на подслоя на грапавост в градския АГС. При такива условия е възможна само неутрална температурна стратификация (клас на устойчивост 4). В големите населени места често се наблюдават области с най-различен характер на подложната повърхност - територии заети от паркове, големи площи, гъсто застроени площи и др. Според особеностите на всяка такава област се формира и съответния вътрешен граничен слой (Бъчварова, 2006). В настоящия случай обаче, се разглеждат въздействия от микромасшабен характер - такива, които се ограничават основно в тази част от подслоя на грапавост, която наричаме слой на градските неравности. CFD модула на GRAL може да пресметне поток обтичащ дадена конфигурация от сгради, но доколко температурната стратификация, изразена чрез клас на устойчивост, може да бъде уловена от модела в този мащаб, само резултатите от числения експеримент могат да покажат. Именно заради това са приложени всички възможни комбинации от дадените скорости на вятъра и класове на устойчивост, за да се провери, дали и доколко GRAL отчита тези зависимости.

4. РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗ

На Фигура 2 са показани изчисленията от модела хоризонтални полета на височина 2 m на средночасовото замърсяване с азотни окиси (горния ред) и вертикалните разрези (долния ред) в условия на безветрие, при класове на устойчивост 1 (ляво), 4 (средата) и 7 (дясно).

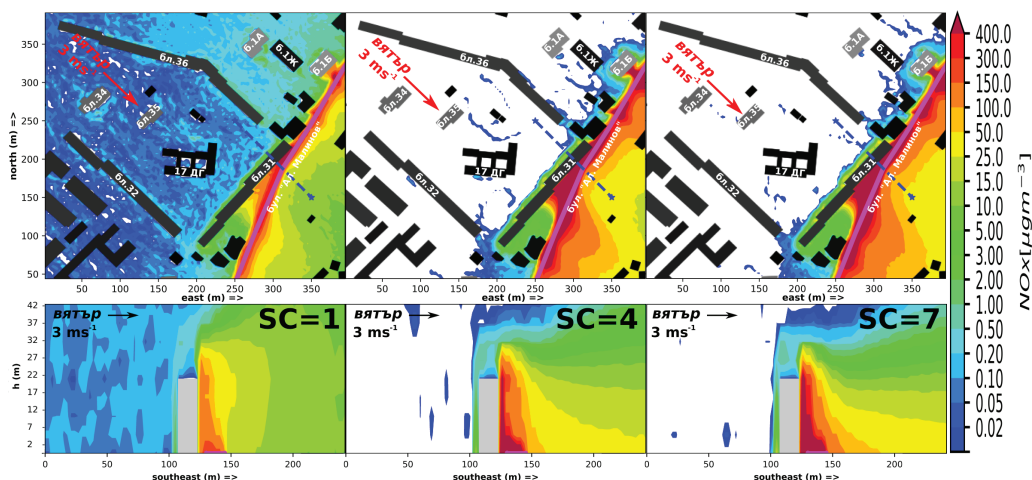


Фиг. 2. Горизонтални полета на средночасово замърсяване с NO_x на височина 2 m (горе) и вертикални разрез (долу) в условия на безветрие, при класове на стабилност SC = 1 (ляво), SC = 4 (средата) и SC = 7 (дясно). Синият пунктир (горе) обозначава мястото на вертикалния разрез.

Fig. 2. Fields of horizontal NO_x 1 hour averaged distribution at receptor height of 2 m (top) and vertical slices (bottom) in still conditions, at stability classes SC = 1 (left), SC = 4 (middle) and SC = 7 (right). The blue dashed line (top) shows the place of vertical slicing.

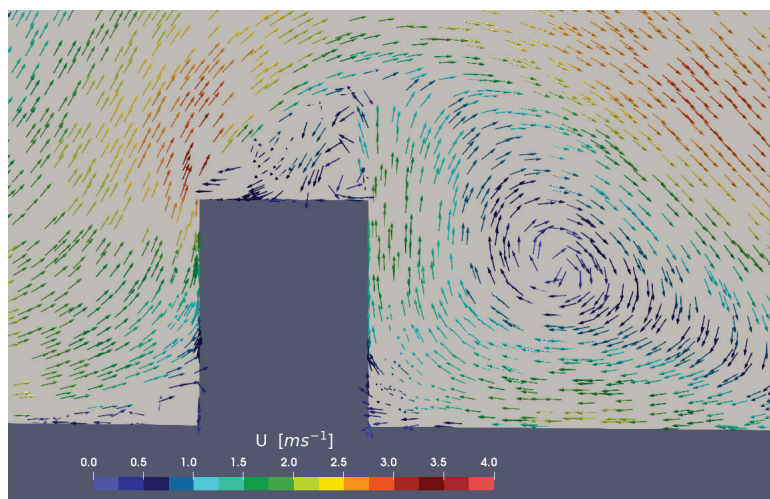
Резултатите в този конкретен случай ясно показват по-голямо разпространение на замърсител във вертикална посока, когато е налице силна неустойчивост. За краткия период от 1 час жилищният блок се явява като добра преграда от проникване на NO_x във вътрешността на района, където се намира и 17 ДГ «Мечо Пух». При класове на устойчивост 4 и 7 разликите в пространственото разпределение на замърсителя са по-малки, тъй като в такъв мащаб и в дадения случай, и при неутрална, и при устойчива стратификация моделираното смесване в приземния слой има близки по значение стойности. Както беше споменато в т. 3, при скорости на вятъра по-малки от 2 ms^{-1} могат да бъдат налице условия или за неустойчива (през деня), или за устойчива (в нощните часове) стратификация. В този случай, моделът, съобразявайки подадената информация превключва от предварително зададения клас 4 към клас 6 - 7, т.е. GRAL успешно коригира класа на устойчивост, според зададената скорост на вятъра.

Най-интересният от гледна точка на това изследване случай на замърсяване наблюдаваме, когато бул. «Ал. Малинов» се оказва от подветрената страна на блок 31, т.е. когато вятърът духа от северозапад (315°), Фигура 3.



Фиг. 3. Хоризонтални полета на средночасово замърсяване с NO_x на височина 2 m (горе) и вертикални разрези (долу) при северозападен вятър със скорост 3 ms^{-1} , при класове на устойчивост SC = 1 (ляво), SC = 4 (средата) и SC = 7 (дясно).

Fig. 3. Fields of horizontal 1 hour averaged distribution of NO_x at receptor height of 2 m (top) and vertical slices (bottom), at northwesterly wind $U = 3 \text{ ms}^{-1}$, at stability classes SC = 1 (left), SC = 4 (middle) and SC = 7 (right).



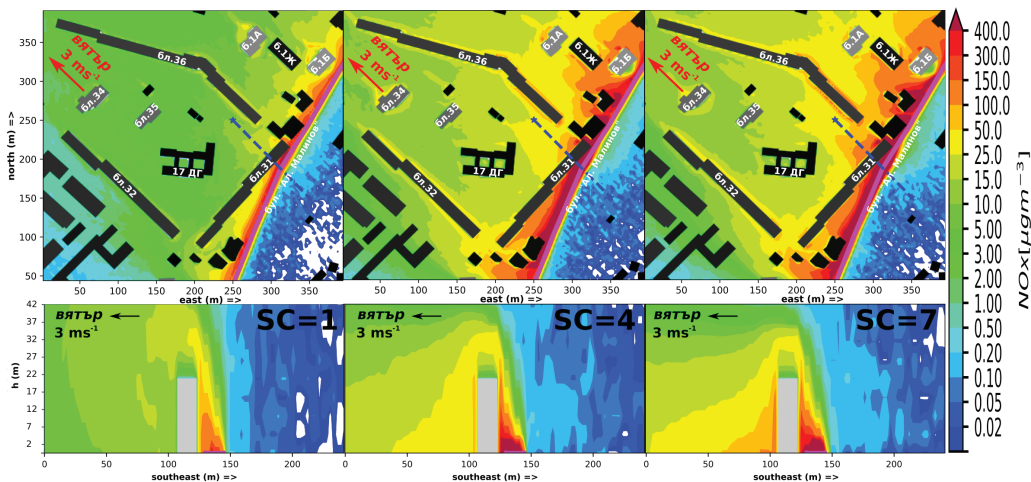
Фиг. 4. Вертикално сечение на полето на вятъра около бл. 31. Ясно се вижда рециркулацията на въздушния поток откъм подветрената страна на жилищния блок.

Fig. 4. Vertical slice of the wind field in the region around apartment block 31. A clearly distinguishable recirculation can be seen at the leeward side of the building.

Въдушният поток минаващ покрай сградата се повлиява по такъв начин, че от подветрената страна се образува зона на рециркулация. (Фигура 4). Както се вижда на Фигура 3, на мястото, където бул. «Ал. Малинов» се намира в непосредствена близост до блок 31, замърсителят попада в тази зона и се натрупва. Като резултат концентрациите му там значително се повишават.

Отново, както и в случая на безветрие, въздушните потоци при неустойчива стратификация осигуряват по-добро разпространение на NO_x във вертикално направление, което намалява иначе високите концентрации при стената на блока, наблюдавани в случаите на неутрално и устойчиво стратифициран приземен слой. Както се вижда обаче, това става за сметка на повишаване на концентрациите на замърсителя от наветрената страна на сградата, в междублоковото пространство.

При вятър духащ от югоизточна посока (Фигура 5), в случая с $\text{SC} = 1$ (силна неустойчивост), сравнително малка част от замърсителя попада в зоната на рециркулация от подветрената страна на блока, защото основното количество NO_x се увлича от конвекцията и се отнася на по-голяма височина.



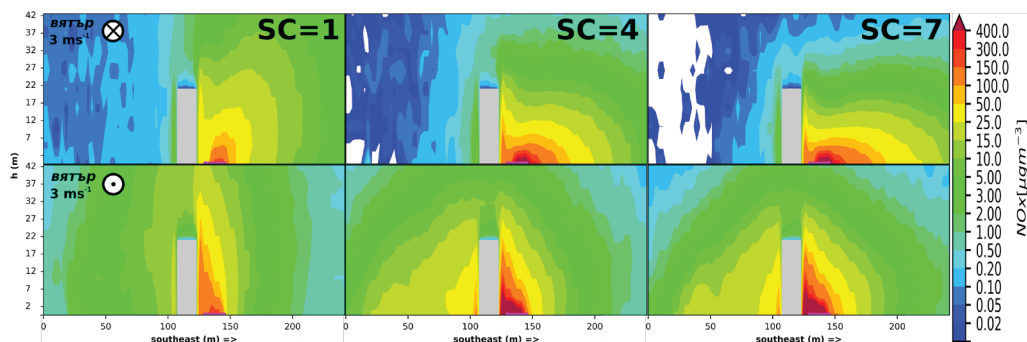
Фиг. 5. Хоризонтални полета на средночасово замърсяване с NO_x на височина 2 m (горе) и вертикални разрез (долу) при югоизточен вятър със скорост 3 ms^{-1} , при класове на устойчивост $\text{SC} = 1$ (ляво), $\text{SC} = 4$ (средата) и $\text{SC} = 7$ (дясно).

Fig. 5. Fields of horizontal 1 hour averaged distribution of NO_x at receptor height of 2 m (top) and vertical slices (bottom), at southeasterly wind $U = 3 \text{ ms}^{-1}$, at stability classes $\text{SC} = 1$ (left), $\text{SC} = 4$ (middle) and $\text{SC} = 7$ (right).

Когато е налице неутрална или устойчива стратификация се наблюдават високи концентрации, както при наветрената директно повлияна от струята замърсител стена, така и откъм подветрената страна.

В случаите, когато направлението на вятъра е успоредно на сградата (Фигура 6), разпределението на концентрациите на замърсителите по стената откъм

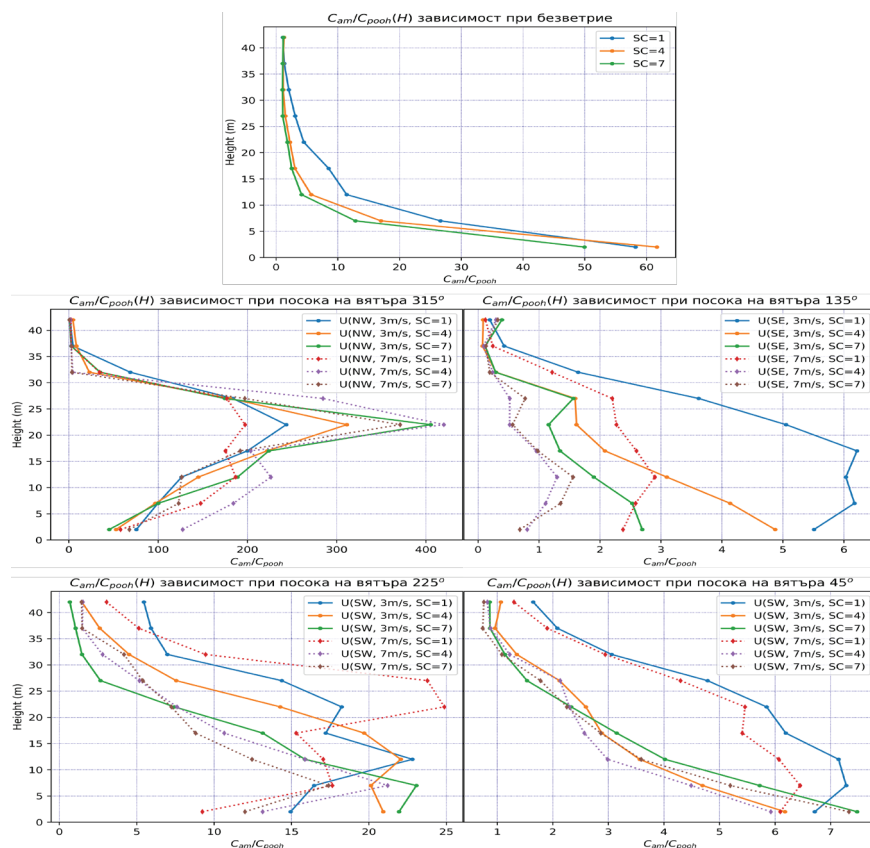
междублоковото пространство е повлияно главно от позицията на източника на замърсяване спрямо блока. Тъй като бул. «Ал. Малинов» сключва малък ъгъл с блок 31, е налице асиметрия в това разпределение. При североизточен вятър (Фигура 6, долу), NO_x проникват до по-голяма степен в междублоковото пространство, отколкото при югозападен. Във втория случай се получава нещо като «приплъзване» на въздушния поток по сградата. Като следствие NO_x се отвеждат на североизток по булеварда.



Фиг. 6. Вертикални разреза на средночасовото замърсяване с NO_x при югозападен (горе) и североизточен (долу) вятър със скорост 3 ms^{-1} , при класове на стабилност $SC = 1$ (ляво), $SC = 4$ (средата) и $SC = 7$ (дясно).

Fig. 6. Vertical slices of hourly NO_x concentrations at southwesterly (top) and northeasterly (bottom) wind $U = 3 \text{ ms}^{-1}$, at stability classes $SC = 1$ (left), $SC = 4$ (middle) and $SC = 7$ (right).

Във всички случаи, освен в тези при вятър със скорост $U = 7 \text{ ms}^{-1}$ от югоизток при приложени класове на стабилност 4 и 7, концентрациите на NO_x на височина 2 m са по-високи откъм бул. «Ал. Малинов» (Фигура 7). При северозападен вятър, при подветрената стена на сградата се наблюдават до над 400 пъти по-високи концентрации на замърсител, отколкото при наветрената стена. В този конкретен набор от случаи, рецикулацията на въздушния поток се оказва над източника на замърсяване, което води до блокиране и застой на значителни количества замърсител в тази зона. От другата страна на блока постъпва свеж въздух и концентрациите на NO_x са ниски. Това е добре илюстрирано на Фигура 3, където са показани полетата на замърсяване при северозападен вятър със скорост 3 ms^{-1} . Най-големите разлики в нивото на замърсяване се наблюдават на височина 22 m, т.е. малко под нивото на покрива на сградата. При $U=3 \text{ ms}^{-1}$ това е случаят с клас на устойчивост $SC=7$, а при $U=7 \text{ ms}^{-1}$, $SC = 4$ и $SC = 7$.



Фиг. 7. Зависимости на отношенията на концентрациите на NO_x при задната и предната стена на блока от височината, за различните случаи на посока и скорост на вятъра, и атмосферна стратификация. C_{am} - концентрация на NO_x откъм бул. «Ал. Малинов» (задна страна на блока), C_{pooH} - концентрация на NO_x откъм ДГ «Мечо Пух» (предна страна на блока), U - скорост на вятъра (ms⁻¹), SC - клас на стабилност (1 - силно неустойчива стратификация, 4 - неутрална стратификация, 7 - силно устойчива стратификация).

Fig. 7. Rear and front wall NO_x concentrations ratio dependencies for the different cases of wind speed and direction, and stability class. C_{am} - NO_x concentrations at the wall facing towards “Al. Malinov” blvd. (rear wall), C_{pooH} - NO_x concentrations at the wall facing towards “Winnie the Pooh” kindergarten (front wall), U - wind speed (ms⁻¹), SC - stability class (1 - strongly unstable stratification, 4 - neutral stratification, 7 - strongly stable stratification).

5. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Влиянието върху разпространението на атмосферни замърсители на обекти с форми, които обикновено не се срещат в природата, носи съответните специфични ефекти на локално въздействие върху околната среда. Изследването ясно показва,

че се наблюдават високи концентрации на замърсители при стените на сгради, намиращи се с лице към непосредствено разположен до тях наземен източник на замърсяване, независимо от посоката на вятъра в дадения момент. Резултатите от тестовите с модела GRAL насочват към следните изводи:

- Неустойчивата температурна стратификация в приземния слой благоприятства процесите на почистване на въздуха в засегнатия от замърсяване район;
- Наличието на рециркулация на въздушния поток от подветрената страна на дадена сграда оказва съществено влияние върху разпределението на концентрациите на замърсителите. По отношение на качеството на атмосферния въздух, това влияние е винаги негативно като въздействие;
- В някои конфигурации на разположение на натоварена улица спрямо жилищна сграда, дори по-високи скорости на вятъра ($U = 7 \text{ ms}^{-1}$, в проведените тестове с модела), се оказват недостатъчни за почистване от замърсители - т.нар. «продухване» на района.

БЛАГОДАРНОСТИ

Към Национална програма „Млади учени и постдокторанти“ на Министерството на образованието и науката.

ЛИТЕРАТУРА

- Бъчварова, Е. (2006) Теоретични и експериментални изследвания на височината на конвективния граничен слой в атмосферата при различни постилащи повърхности (Дисерт. д.ф.н.), НИМХ-БАН.
- Сираков, Е. (2011) Атмосферен граничен слой: структура, параметризация, взаимодействия, Херон Прес ООД, ISBN 9780954-580-293-5.
- Gifford, F.A. (1976) Turbulent diffusion-typing schemes: a review, Nucl. Saf., 17, 68-86.
- Kahl, J. D. W., Chapman, H. L. (2018). Atmospheric stability characterization using the Pasquill method: A critical evaluation, Atmospheric Environment, 187, 196-209, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.058>.
- Lazar, R., Podesser, A. (1999) An urban climate analysis of Graz and its significance for urban planning in the tributary valleys east of Graz (Austria), Atmospheric Environment 33, 4195-4209.
- Elliott M. A., Nebel, G. J., Rounds, F. G. (1955) The Composition of Exhaust Gases from Diesel, Gasoline and Propane Powered Motor Coaches, Journal of the Air Pollution Control Association, 5:2, 103-108, DOI: 10.1080/00966665.1955.10467686.
- Oettl, D. (2019) Documentation of the Lagrangian Particle Model GRAL (Graz Lagrangian Model) Vs. 20.1, Government of Styria Department 15 Energy, Housing, Technology, Air Quality Control, Landhausgasse 7, 8010 Graz, Austria.
- Pasquill, F. (1961) The estimation of the dispersion of windborne material, Meteorol. Mag., 90, 33-49.
- WHO (2013) Health effects of particulate matter: Policy implications for countries in eastern Europe Caucasus and central Asia, WHO Regional Office for Europe UN City, Marmorvej 51DK-2100 Copenhagen, Denmark, ISBN 97892 890 0001 7.