

## Оценка на работата на гаусовия дисперсионен модел AERMOD като средство за ранно предупреждение при замърсяване на въздуха в градска среда

**А. Петров, Е. Бъчварова, М. Коларова**

Национален институт по метеорология и хидрология,  
Българска академия на науките,  
бул. Цариградско шосе 66, 1784 София

**Abstract.** Some of the most important tasks within the scope of COST Action 1006 are: evaluations (by means of statistical, experimental and computational methods) for the use and improvement of local-scale emergency prediction and response tools for airborne hazards in built environments, as well as compiling a detailed inventory of different models and methodologies currently in use, to characterize their performance and to establish strategy for their improvement.

In this work, the application of one of many models participating in the first of three examinations altogether, is considered – the Gaussian dispersion model AERMOD.

At the first stage of the experiment, multiple measurements of the concentrations of passive tracer gas – ethane ( $C_2H_6$ ) are performed. The experiment took place in a wind tunnel (WOTAN, Laboratory of the Meteorological Institute at the University of Hamburg), where a model of the central part of a typical small Western-European town (Michelstadt) of the scale of 1:225 was built. A large database consisting of information of the measured concentrations and meteorological conditions at certain points in the city domain, was collected.

At the second stage, for the purpose of sensitivity testing towards different input parameters, AERMOD was run with varying wind direction, friction velocity scale and surface roughness.

At the third stage, by means of comparison between measured and modelled data and statistical analysis, an assessment of AERMOD's applicability as emergency response tool was made. The model does not resolve the flow between the buildings. Nevertheless, the output results, for 1 hour averaged concentrations, are to a great extent satisfactory.

## 1 Въведение

Оценяването на приложимостта на атмосферни дисперсионни модели (АДМ) за използването им в аварийни ситуации привлича интереса на все повече софтуерни разработчици и на потребители, работещи в областта на опазването на околната среда. За да могат да бъдат оценени изходящите резултати от симулации и да се подобри работата на моделите, през 2012 г. беше започната процедура по провеждане на изследвания в областта и тяхното валидиране в лицето на COST Акция ES1006 – “Оценка, усъвършенстване и насоки за използването на средства за ранно предупреждение и прогнозиране на разпространението на замърсители на въздуха в локален мащаб, причинено от аварии в застроени площи.”

За постигане на крайния резултат – адекватна оценка за работата на модела, са необходими експериментални данни, покриващи широк спектър от най-различни сценарии. Опитните постановки трябва да имат ясно разграничение в отделните случаи, било то микромащабни, засягащи дадена градска улица или микрорайон, квартал, или по-големи застрашени зони в открит терен [1].

В настоящата работа се разглежда поведението на гаусовия дисперсионен модел AERMOD при прилагането му като средство за ранно предупреждение при аварийна ситуация на замърсяване на въздуха в градска среда. Направени са серии от тестове с вариране на входящите параметри – посока на вятъра, параметър на грападост и динамична скорост. По този начин по-качествено се определя чувствителността на модела към промяната на гореспоменатите величини. Това е необходимо, за да може чрез последващия статистически анализ на получените данни да се добие представа за пригодността на AERMOD към поставената задача.

## 2 AERMOD: кратко описание на модела

AERMOD е интегрална моделна система, която включва три модула: стационарен гаусов (плум) модел (AERMOD), метеорологичен препроцесор AERMET и теренен препроцесор AERMAR. Интегрирането на основното адвективно-дифузионно уравнение (1) в опростени стационарни (непроменящи се с времето) и еднородни за всяка точка от разглежданата равнина метеорологични условия, са главният действащ алгоритъм на такъв тип модели [2].

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right), \quad (1)$$

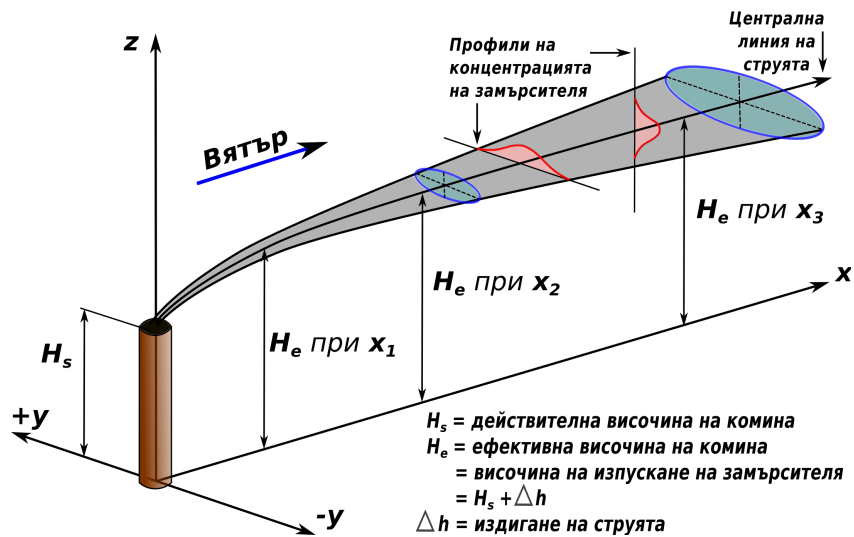
където  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$  са компонентите на средния вятър,  $\bar{c}$  е е средната концентрация на пасивен замърсител и  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  – коефициенти на

турбулентна дифузия. Концентрацията на замърсители се представя чрез гаусово разпределение (в хоризонтална и вертикална равнина) и зависи от емисиите, средния вятър, устойчивостта на атмосферата, височината на изхвърляне на замърсителя и разстоянието до източника. В най-общ вид гаусовото дисперсионно уравнение [3] има вида:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right], \quad (2)$$

където  $Q$  е мощност на източника [g/s],  $U$  е средната скорост на вятъра на височината на източника [m/s],  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  са стандартните отклонения на разпределението на концентрацията на замърсителя по осите  $y$  и  $z$  съответно,  $H$  е ефективната височина на комина [m], която е сумата от височината на комина (източника) и първоначалното издигане на струята над него (дължащо се на архимедовите сили). На Фиг. 1 може да се види схематично, как един гаусов модел представя разпространението във въздуха на замърсител, изпускан от точков източник.

В проведения експеримент използването на препроцесорите не се налага, тъй като условията са опростени и входящата информация е в синтезиран вид.



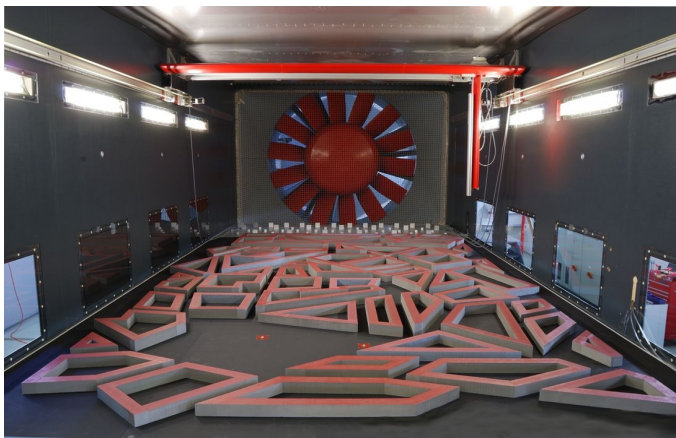
Фиг. 1: Схематично представяне на плум от гаусов дисперсионен модел.

*А. Петров, Е. Бъчварова, М. Коларова*

Като гаусов модел изискванията на AERMOD към изчислителния ресурс са скромни – достатъчна е компютърна конфигурация с налични само 2 МВ RAM и 80 MHz процесор. Използваното пространство на твърдия диск варира и е тясно свързано с обема на получената изходяща информация.

### **3 Описание на експеримента**

Във ветровия тунел “WOTAN” (Фиг. 2) в лабораторията на Метеорологичния Институт към Хамбургския Университет са проведени измервания на въздушните потоци (U, V и W компоненти) и на дисперсията на пасивен трасер – етан ( $C_2H_6$ ), за съставяне на сравнителна база данни, по която ще се прави оценка на различни атмосферни дисперсионни модели (АДМ).



Фиг. 2: Ветровият тунел WOTAN, лаборатория на Метеорологичния институт към Хамбургския университет.

В тунела е издигнат опростен макет на централната част на типичен малък западноевропейски град (Michelstadt, Хесен, Германия, население: 16642 д. по данни от 2015 г.) с мащаб 1:225. Като важно уточнение следва да се спомене, че оттук нататък в това изследване пространствените характеристики (разстояния и координати) са дадени в приведен към пълен мащаб вид и мерни единици (m), както и емисиите (kg/s).

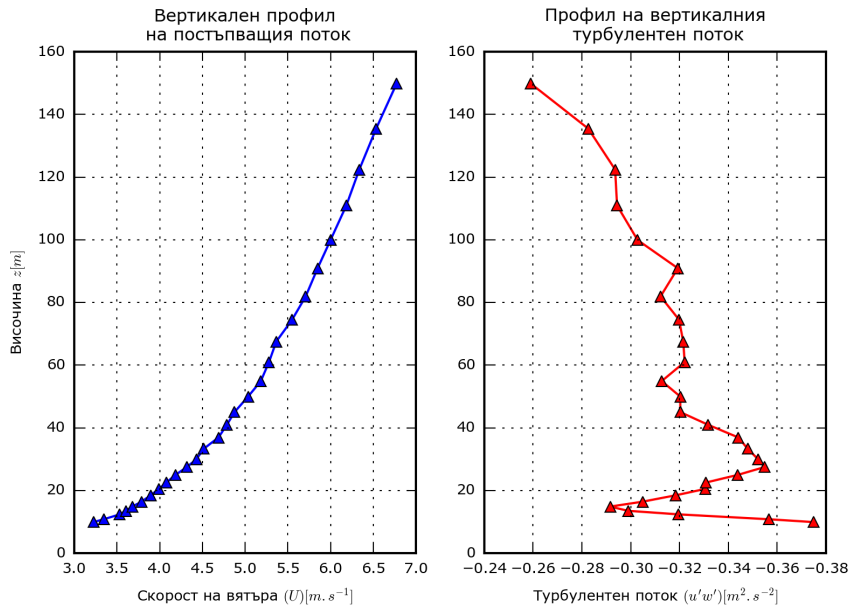
Входящите данни, използвани за гаусовия дисперсионен модел AERMOD, са дадени в Таблица 1.

Като правило, когато се захранва гаусов модел с метеорологична информация, е необходимо – с цел максимална представителност,

Таблица 1: Входящи данни, използвани от AERMOD

<b>Входящи данни за източника</b>	
Замърсител, вид	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (етан)
Обозначение	S2
Координати (x, y, z) [m]	(-361.6, 125.1, 0.0)
Диаметър [m]	1.575
Скорост на струята [m/s]	0.21
Емисии [kg/s]	0.5
Температура на изхвърляния тестов замърсител [K]	293.15
<b>Входящи данни за рецепторите</b>	
Пространствена стъпка на рецепторната мрежа	5 × 5 m (49051 точки)
Височина на мрежата над земната повърхност [m]	7.5
Начало на рецепторната координатна мрежа (x, y) [m]	(в центъра на Michelstadt областта)
<b>Данни за терена</b>	
Зададена е опция "FLAT" – равен терен	
<b>Метеорологичен вход</b>	
<b>Приземни данни</b>	
Скорост на вятъра (на 10 m височина) [m/s]	3.32
Посока на вятъра (на 10 m височина) [°] (преизчислена за AERMOD)	268.2 (Тестове за чувствителност: -10 (258.2), -5 (263.2), +5 (273.2), +10 (278.2))
Температура на 2 m височина [K]	293.15
Параметър на грапавост [m]	0.8 (направени са тестове за чувствителност към входящите данни със z <sub>0</sub> = 0.5, 0.8, 1.0, 1.25 и 1.5 m)
Динамична скорост u* [m/s]	0.4 (направени са тестове за чувствителност към входящите данни с u* = 0.35, 0.4, 0.45, 0.5 и 0.566 m/s)
<b>Вертикален профил на скоростта на вятъра</b> (използван е профилът на постъпващия поток)	

данните да се черпят от точка, разположена възможно най-близо до източника на замърсяване. В конкретния експеримент обаче вместо информацията от такава точка е използвана тази за вертикалният профил на постъпващия поток извън града (Фиг. 3а). Причината за този избор е, че в самия домейн на Michelstadt поради наличието на сгради се наблюдава силно смущаване на въздушния поток на височини до около 35 m. Когато в AERMOD постъпи информация



Фиг. 3: (а) (ляво): вертикален профил на постъпващия във ветровия тунел поток; (б) (дясно): вертикален профил на вертикалните турбулентни потоци.

за метеорологичните условия в дадена точка, тя се счита валидна за цялата подлежаща на моделиране област, т.е. приема се, че например полетата на скоростта и посоката на вятъра са еднородни. Тъй като височината на рецепторната мрежа е зададена на 7.5 m., изчисленото разпределение на концентрацията на етан и посоката му на разпространение, получени от дисперсионния модел на тази височина, ще бъдат съобразени със съответната посока на вятъра в избраната точка от мрежата. Като следствие, ако метеорологичната информация се вземе от точка в застроената част на града, моделираната ориентация на плума би била съвсем различна от реално наблюдаваната, именно заради възможността посоката на вятъра на това място да е променена от смущението във въздушния поток.

Динамичната скорост  $u_*$  е изчислена по данните от измерения вертикален кинематичен поток на импулс  $(\overline{u'w'})$  на постъпващия вятър (графично представен профил на Фиг. 3б), като по дефиниция [4] тя е:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{(-\overline{u'w'})^2} \text{ [m/s]}, \quad (3)$$

където  $\tau$  е тензорът на турбулентните (Рейнолдсови) напрежения,

## Оценка на работата на гаусовия дисперсионен модел AERMOD ...

$\rho$  е плътността на въздуха, а  $u'$  и  $w'$  са съответно хоризонталната и вертикална компонента на пулсациите на скоростта на вятъра при зададено привилегировано направление по оста  $Ox$ .

Във всички точки на ветровия тунел температурата е една и съща и не се използва допълнително подгряване или охлаждане на постилщата повърхност. Следователно в експеримента се разглежда разпространението на замърсители при елементарния случай на неутрално стратифициран граничен слой. При това положение мащабът на Монин-Обухов  $L \rightarrow \infty$  и използването му като входящ параметър отпада.

### 4 Реализация на модела

Тестовите с AERMOD са осъществени на преносим компютър HP Compaq 630 със следните характеристики:

- CPU: Intel(R) Core(TM) i3 M370, 2.4GHz – Dual core
- RAM: 4.00 GB (2.99 GB usable)
- OS: Windows7 Ultimate (32-bit)

Този изчислителен ресурс е достатъчен за такъв тип модел. За единствен сценарий на замърсяване с един точков източник, 20-30 дискретни рецептора и рецепторна мрежа с пространствена стъпка 5 m (49051 точки) изчислителното време е приблизително 7 s. При провеждане на тестове за чувствителност с вариращи динамична скорост  $u_*$ , параметър на грапавост  $z_0$ , направление на постъпващия поток и местоположение на източниците, общият брой на сценариите е 375, което отнема 45 минути компютърно време за изчисления.

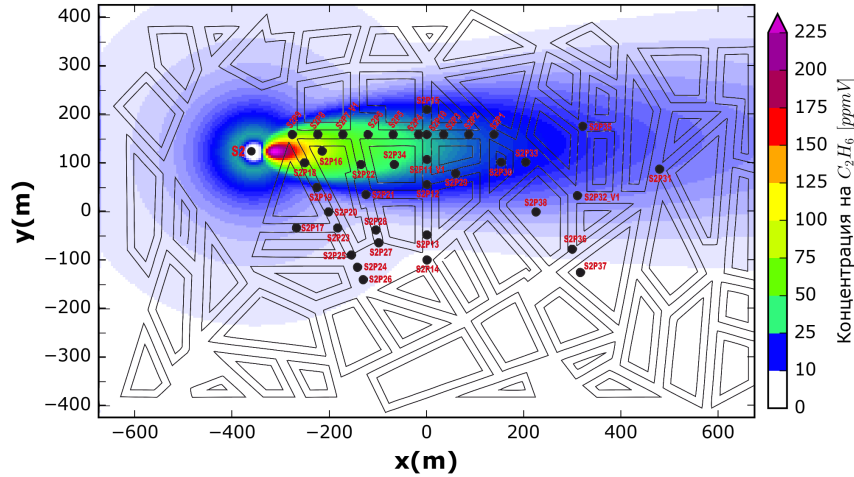
### 5 Моделни резултати, статистическа оценка и сравнителен анализ

На Фиг. 4 може да се види полето на замърсяване с етан така, както го представя AERMOD. В различните случаи на промяна на входящите параметри ( $z_0$ ) се наблюдават и съответните изменения в размера и формата на плума.

От таблица 2 може да се види, че най-малкото относително отклонение (fractional bias, FB) на моделните резултати спрямо измерените се наблюдава в случая, когато  $z_0 = 0.8$  m и посоката на вятъра е  $0^\circ$ , а най-висок коефициент на корелация ( $R$ ) – при случаите на зададено направление на вятъра от минус  $10^\circ$ . Добрата корелация, обаче, се дължи основно на факта, че при тази ориентация на плума моделираните показания на много от близко разположените рецептори съвпадат с измерените, а там стойностите на концентрацията на замърсител са най-високи.

А. Петров, Е. Бъчварова, М. Коларова

AERMOD: Разпределение на концентрацията на етан ( $C_2H_6$ ) над Michelstadt  
 Източник: S2 ( $x, y, z$ ) = (-361.9, 125.1, 0.0), рецепторна мрежа:  $z = 7.5m$   
 Посока на постъпващия поток =  $0^\circ$ ,  $u_* = 0.4m \cdot s^{-1}(0.71u_{*0})$ ,  $z_0 = 0.80m(1.00z_{00})$



Фиг. 4: AERMOD: Разпределение на концентрацията на етан над Michelstadt.

Таблица 2: Сравнение на статистическите показатели при  $u_* = 0.4 m/s$  ( $71\% u_{*0}$ ) и вариращи параметър на грапавост ( $z_0$ ) и посока на вятъра

S2 ( $0^\circ$ ), $u_* = 0.4$ ( $71\% u_{*0}$ )				S2 ( $+5^\circ$ ), $u_* = 0.4(0.71\% u_{*0})$			
$z_0$	FB	R	NMSE	$z_0$	FB	R	NMSE
0,50	-0,06	0,74	1,01	0,50	-0,03	0,56	1,05
0,80	0,01	0,77	0,88	0,80	0,04	0,62	0,91
1,00	0,05	0,79	0,85	1,00	0,08	0,65	0,87
1,25	0,11	0,8	0,84	1,25	0,13	0,67	0,86
1,50	0,14	0,81	0,85	1,50	0,16	0,69	0,86

S2 ( $-5^\circ$ ), $u_* = 0.4(0.71\% u_{*0})$				S2 ( $-10^\circ$ ), $u_* = 0.4(0.71\% u_{*0})$			
$z_0$	FB	R	NMSE	$z_0$	FB	R	NMSE
0,50	-0,02	0,86	1,05	0,50	0,09	0,9	1,18
0,80	0,05	0,87	0,92	0,80	0,16	0,91	1,02
1,00	0,1	0,88	0,89	1,00	0,2	0,91	0,98
1,25	0,15	0,88	0,87	1,25	0,24	0,91	0,96
1,50	0,19	0,88	0,88	1,50	0,28	0,91	0,97

## 6 Заключение

Като гаусов модел AERMOD може да бъде един добър инструмент за ранно предупреждение, защото минималните му изисквания към изчислителните ресурси го правят по-бърз в ситуации на аварийно замърсяване. За съжаление оценките, които той дава, са с по-ниска точност поради факта, че не се отчита влиянието на сградите върху



### *Оценка на работата на гаусовия дисперсионен модел AERMOD ...*

преминаващия въздушен поток. Друг недостатък се явява липсата на възможност за симулиране на краткотрайни (пуф) изхвърляния и минималното време за осреднение на концентрациите от 1 час. Независимо от това, AERMOD се явява незаменимо средство за първоначална оценка, когато времето за реакция при авария е силно ограничено.

#### **Литература**

- [1] Hunt, J.C.R., Carruthers, D.J., Britter, R.E., Daish, N.C. (2004): Dispersion from Accidental Releases in Urban Areas., Cambridge Environmental Consultants Ltd., 3 Kings Parade, Cambridge CB2 1SJ, 100 p.
- [2] Buske, D., Túllio Vilhena, M., Tirabassi, T., Bodmann, B., 2012: Air Pollution Steady-State Advection-Diffusion Equation: The General Three-Dimensional Solution. Journal of Environmental Protection, 2012, 3, 1124-1134 ; <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2012.329131> Published Online September 2012 (<http://www.SciRP.org/journal/jep>).
- [3] Srivastava, A., Rao, S. 2011, Urban Air Pollution Modeling, Air Quality Models and Applications, Popovic, D. (ed.), [www.intechopen.com/books/air-quality-models-and-applications/urban-air-pollution-modeling](http://www.intechopen.com/books/air-quality-models-and-applications/urban-air-pollution-modeling).
- [4] Сираков, Е. 2011, *Атмосферен Граничен Слой: Структура, Параметризация, Взаимодействия*, Херон прес ООД, София, 394 с.