

Sylva DRÁBKOVÁ\*, Milada KOZUBKOVÁ\*\*

**FYZIKÁLNÍ EXPERIMENTY V AERODYNAMICKÉM TUNELU A JEJICH  
VÝZNAM PŘI NUMERICKÉM MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ A ROZPTYLU  
PLYNNÝCH LÁTEK V OVZDUŠÍ**

WIND TUNNEL SIMULATIONS AND THEIR IMPORTANCE FOR THE NUMERICAL  
MODELLING OF ATMOSPHERIC FLOW AND POLLUTANT DISPERSION

**Abstrakt**

Měření realizovaná v aerodynamických tunelech umožňují analyzovat modifikaci proudového pole v důsledku obtékání terénních nerovností a budov, simulovat rozptyl znečišťujících látek z bodových, liniových či objemových zdrojů, zkoumat rozptyl lehkého a těžkého plynu, apod. Mají velký význam pro poznání a pochopení složitých jevů spojených s řešením ekologických úloh a také pro definici matematického modelu těchto dějů. Fyzikální experiment poskytuje při numerickém modelování základní informace pro sestavení matematického popisu daného jevu, definici okrajových podmínek a především verifikaci výsledků. V příspěvku jsou uvedeny některé příklady experimentálního měření v aerodynamickém tunelu a jejich následná numerická interpretace.

**Abstrakt**

Experiments carried out in the wind tunnels allow to investigate the flow field modification produced by building structures and terrain configuration, to simulate the pollutant dispersion from the point, line or volume sources, to predict the dense or heavy pollutant dispersion, etc. They are of great importance for the understanding of transport phenomena connected with the solution of ecological problems and for their mathematical interpretation. Physical experiments provide the basic information for the mathematical description of the phenomena, boundary conditions definition and verification of the results obtained from the mathematical model. The presented study gives several examples of the wind tunnel simulation followed by the numerical experiment.

**Key words:** wind tunnel simulation, physical experiment, mathematical modelling, atmospheric flow, turbulence, pollutant dispersion

---

\* Ing. Ph.D., VŠB – Technická univerzita Ostrava, FS, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 708 00 Ostrava – Poruba, [sylva.drabkova@vsb.cz](mailto:sylva.drabkova@vsb.cz)

\*\* doc. RNDr., CSc., VŠB – Technická univerzita Ostrava, FS, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 708 00 Ostrava – Poruba, [milada.kozubkova@vsb.cz](mailto:milada.kozubkova@vsb.cz)

## Úvod

Matematické modelování úniku toxických látek [4] v souvislosti s průmyslovou činností umožňuje předvídat a redukovat následky havárií ohrožujících lidskou populaci a životní prostředí. Stává se proto účinným nástrojem analýzy rizik a bezpečnostního inženýrství. Rychlý rozvoj výpočetní techniky a její cenová dostupnost umožňují dnes realizovat výpočty v mnohem kratším čase a s poměrně malými náklady. Rozvoj numerických metod přispěl k upřesnění fyzikálního modelu proudění a rozptylu příměsí v ovzduší, zůstává však základní otázka: „Nakolik odpovídají výsledky numerického modelování skutečnosti?“ Je nutné si uvědomit, že model vždy představuje určitá zjednodušení a nemůže postihnout všechny faktory ovlivňující modelované děje, jejichž fyzikální podstata je navíc velmi složitá. K tomu přistupuje také nedostatek vstupních dat potřebných pro definici meteorologických podmínek a parametrů turbulence v daném místě, podrobný popis terénu, zástavby, teplotních toků ze země, apod. Výsledky matematického modelu je nutné správně interpretovat a také je alespoň částečně verifikovat pomocí dat získaných měřeními.

Srovnání výsledků modelování s daty naměřenými v reálném terénu je ve většině případů nemožné. Dojde-li k ekologické havárii, je veškeré úsilí věnováno nejprve její likvidaci, měření je většinou realizováno až následně, přičemž jsou sledovány zejména koncentrace toxických látek v ovzduší. Realizace komplexního měření v terénu, jehož cílem je získat informace o průběhu meteorologických a turbulentních veličin v závislosti na vzdálenosti od zemského povrchu, je velmi nákladná, vyžaduje speciální měřicí zařízení a je předmětem experimentálních projektů zaměřených na zkoumání mezní vrstvy atmosféry. Tyto experimenty jsou pečlivě dokumentovány a získané soubory dat slouží k verifikaci matematických modelů mezní vrstvy. Jsou však realizovány převážně v rovinném terénu bez zástavby.

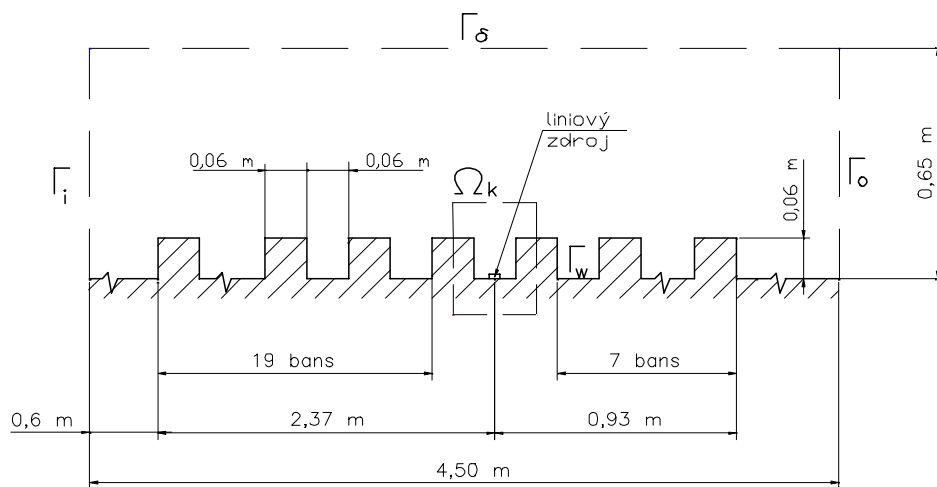
Další možností, jak vypočtená data ověřit, je jejich srovnání s výsledky fyzikálních experimentů realizovaných v aerodynamických tunelech. První pokusy fyzikálního modelování proudění přes topografické překážky byly provedeny a publikovány již před 70 lety (Abe, Field and Warden - 1929). Modelování proudění s rozptylem příměsí následovalo o něco později (Sherlock, Stalker - 1940). Tyto případy simulující proudění v mezní vrstvě atmosféry jsou většinou modelovány za meteorologických podmínek blízkých neutrálnímu teplotnímu zvrstvení. Simulace stabilního a nestabilního teplotního zvrstvení v aerodynamickém tunelu je obtížná, je realizována pouze na několika pracovištích (např. University of Surrey, Universität Karlsruhe) a je předmětem dalšího výzkumu. Jednou z velkých výhod experimentů v aerodynamických tunelech je jejich opakovatelnost a variabilita.

Nejnepříznivější podmínky pro rozptyl znečišťujících látek vznikají v městských zástavbách, kde dochází ke značnému zavírání v ulicích při obtékání budov a koncentrace emisí se tak udržují ve vysokých hodnotách. Právě při řešení těchto problémů se významně uplatňují experimenty v aerodynamických tunelech a také matematické modelování, které umožňují zkoumat vliv uspořádání zástavby, výšky a tvaru budov, meteorologických podmínek, parametrů zdrojů a fyzikálních vlastností znečišťujících látek. V příspěvku jsou uvedeny příklady měření v aerodynamickém tunelu, které byly modelovány numericky s cílem dosáhnout co největší shody vypočtených a naměřených dat.

Rozptyl plynné příměsí z liniového zdroje v kaňonu ulice

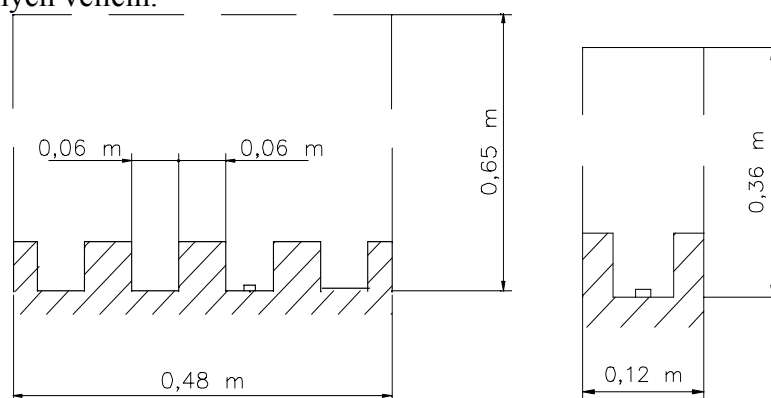
První úloha vycházela z fyzikálního experimentu v aerodynamickém tunelu Meteorologického institutu University v Hamburku, realizovaného M. Pavageau v dubnu 1996 [1]. Předmětem experimentu byla simulace rozptylu studené plynné látky z liniového zdroje v kaňonu ulic s různým nastavením výšek a šířek domů a typů střech. Úloha byla simulována bez vlivu teploty, což odpovídá předpokladu neutrálního teplotního zvrstvení. Jeden případ měření byl modelován numericky pomocí programového komplexu Fluent. Byl testován vliv geometrie oblasti, okrajových podmínek a použitého matematického modelu turbulence na koncentrační a proudové pole [2], [6].

Rozměry oblasti byly dány uspořádáním fyzikálního modelu. Experiment byl proveden pro oblast dlouhou 4,50 m a vysokou 0,65 m. Rovnoběžné řady domů byly definovány jako překážky o výšce a šířce 0,06 m. Počet a rozmístění jednotlivých řad domů jsou znázorněny na obr. 1. Liniový zdroj plynné příměsi byl umístěn ve vzdálenosti 2,97 m od vstupu do oblasti  $\Gamma_i$ . Směr větru byl k překážkám kolmý.



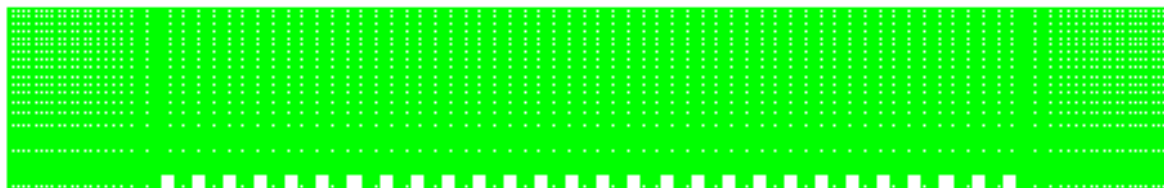
obr. 1 Schéma modelované oblasti dle fyzikálního experimentu

Nejprve byla modelována celá oblast dle geometrie fyzikálního experimentu, viz obr. 1 a následně dvě zúžené oblasti (střední oblast, zahrnující čtyři ulice a malá oblast, představující samotný uliční kaňon s liniovým zdrojem), viz obr. 2, s cílem získat podrobnější obraz o průběhu sledovaných veličin.



obr. 2 Schéma střední a malé oblasti

Pro výpočet byla použita strukturovaná, nerovnoměrně zhuštěná síť, generovaná pro velkou, střední i malou oblast, viz obr. 3.



obr. 3 Výpočetní síť - velká oblast

Na hranicích velké oblasti byly definovány tyto okrajové podmínky [5]:

vstup  $\Gamma_i$  : mocniný rychlostní profil  $u(y) = u_{ref} \left( \frac{y - d_0}{y_{ref} - d_0} \right)^\alpha$ , kde  $u_{ref} = 3,463 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,

referenční výška  $y_{ref} = 0,48 \text{ m}$ ,  $d_0 = 0,002 \text{ m}$ ,  $\alpha = 0,28$

Dále byla definována intenzita turbulence  $I = 5\%$  a charakteristická turbulentní délka  $L = 6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ .

výstup  $\Gamma_o$  : Neumannova okrajová podmínka  $\frac{\delta u}{\delta x} = \frac{\delta v}{\delta x} = 0$

horní hranice oblasti  $\Gamma_\delta$  :  $u = u_{ref}$ ,  $v = 0$

dolní hranice oblasti  $\Gamma_w$  :  $u = v = 0$

V případě střední a malé oblasti byly okrajové podmínky na vstupu pro  $u, k, \varepsilon$  získány z výsledků výpočtu proudění v předchozí větší oblasti a byly zadávány jako po částech lineární funkce v závislosti na výšce oblasti  $y$ .

Liniový zdroj byl modelován jako  $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$  široká a  $0,9 \text{ m}$  dlouhá štěrbin, ze které vytékala konstantní rychlostí směs etanu  $C_2H_6$  se vzduchem:

celkový objemový průtok  $Q_v = 54 \text{ l}\cdot\text{hod}^{-1}$ .

objemový průtok etanu  $Q_e = 4 \text{ l}\cdot\text{hod}^{-1}$

objemový průtok vzduchu  $Q_{vz} = 50 \text{ l}\cdot\text{hod}^{-1}$ .

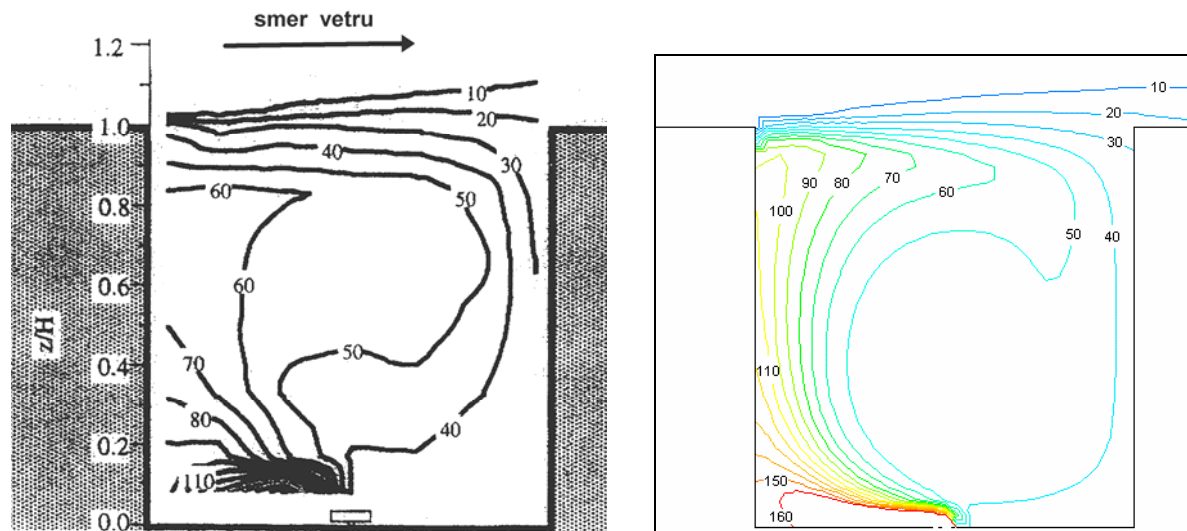
výtoková rychlost ze zdroje  $v = 0,083 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

koncentrace ve zdroji  $C(2,97;0) = 0,08$ , tj. 8%

Úloha byla modelována jako dvourozměrná. Protože překážky probíhaly přes celou šířku tunelu, bylo měření realizováno také jako 2D v rovině symetrie oblasti. Pro srovnání s experimentem byly k dispozici rychlostní profily měřené po směru i proti směru proudění v různých vzdálenostech od zdroje a grafické vyhodnocení bezrozměrných koncentrací v zářezu mezi domy, viz obr. 4a.

V průběhu numerického modelování [6] se projevil vliv velikosti výpočtové oblasti. Ve velké oblasti byla šířka a výška domů v porovnání s celkovou délkou a výškou oblasti malá a jejich vliv na proudění nebyl výrazný. Souvisle a pravidelně uspořádané překážky se projeví jako drsnost. Došlo k posunutí rychlostního profilu ve svislém směru, horní stěny překážek (střechy) působily jako povrch s nulovou rychlostí. Také při modelování

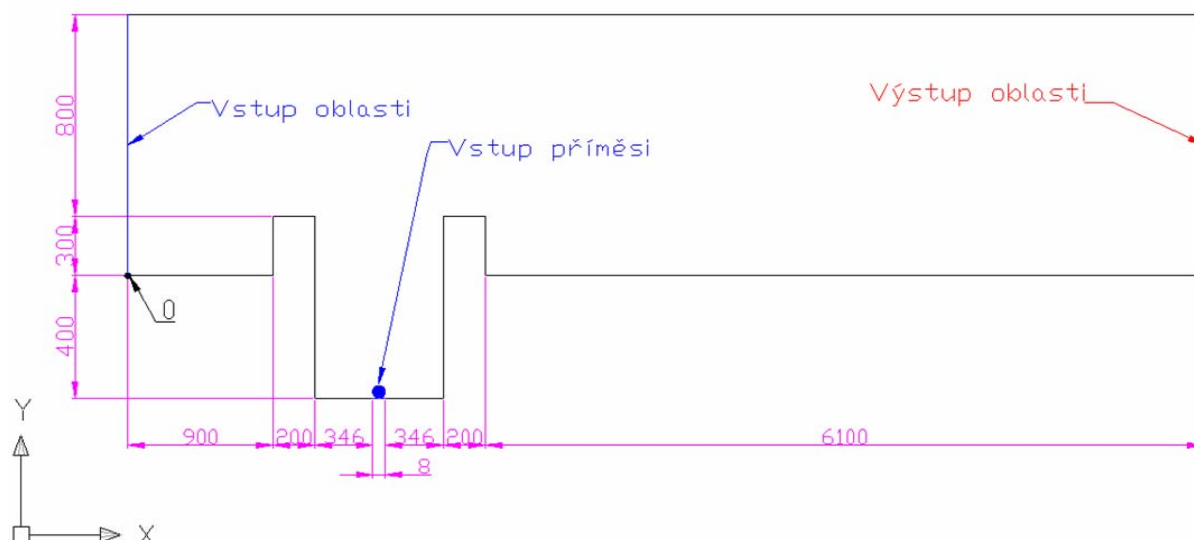
v zastavěném terénu není možné postihnout všechny budovy, ale je možné jejich vliv do modelu zahrnout právě pomocí drsnosti. Doporučené hodnoty drsnosti nejen pro zástavbu ale i pro různé typy vegetačního krytu lze nalézt v literatuře, např. [9]. V případě malé oblasti byla tato příliš úzká a i přes velmi jemnou výpočetní síť poskytovala nejhorší výsledky ve srovnání s experimentem. Chyběla návaznost na nejbližší okolí, které svým uspořádáním pohyb přiměsí v zářezu mezi domy také ovlivňuje. Střední oblast byla dostatečně dlouhá před zdrojem i za zdrojem. Na rozdíl od malé oblasti tak koncentrační pole etanu zasahovalo i nad střechy následujících domů i do sousedního zářezu mezi překážkami (uličního kaňonu). Hodnoty bezrozměrných koncentrací se nejvíce blížily výsledkům z experimentu, zejména v oblasti nižších hodnot, viz obr. 4b.



obr. 4 Porovnání experimentu s numerickým modelováním - střední oblast  
a) experiment                      b) numerické modelování (RNG k-ε model)

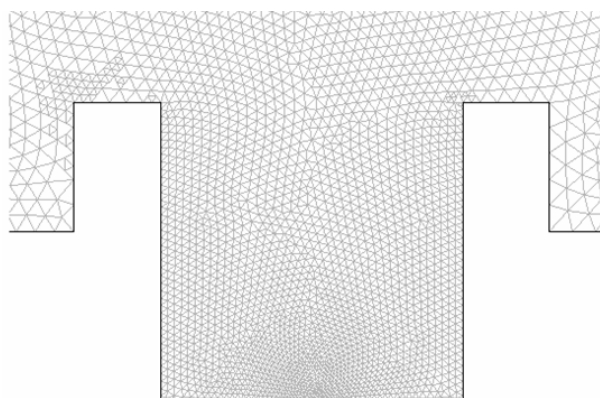
Tato úloha nabízí další možnosti testování v souvislosti s prouděním v kaňonu ulice, např. proudění s přenosem tepla, modelování časově závislé úlohy, a je také zajímavá z hlediska definice liniového zdroje, který může simulovat např. souvislou řadu aut. Podobný experiment byl proveden v aerodynamickém tunelu Ústavu termomechaniky AV ČR [3]. Předmětem experimentu byla simulace rozptylu studené plynné látky z liniového zdroje v kaňonu ulice a vyhodnocení pole koncentrací pro různé hodnoty referenční rychlosti. Úloha se odlišovala geometrií a rozměry oblasti a také simulací liniového zdroje, který v tomto případě byl představován porézní trubičkou. V důsledku propustnosti stěny unikala rovnoměrně plynná příměs do uličního kaňonu.

Experiment byl proveden pro oblast dlouhou 8,1 m, vysokou 1,5 m a 1,5 m širokou. Objemový zdroj plynné látky byl umístěn uprostřed ulice ve vzdálenosti 1,45 m od vstupu do oblasti. Geometrie oblasti je znázorněna na obr. 5. Směr větru byl kolmý na kaňon ulice. Úloha byla modelována numericky pomocí software Fluent [8].

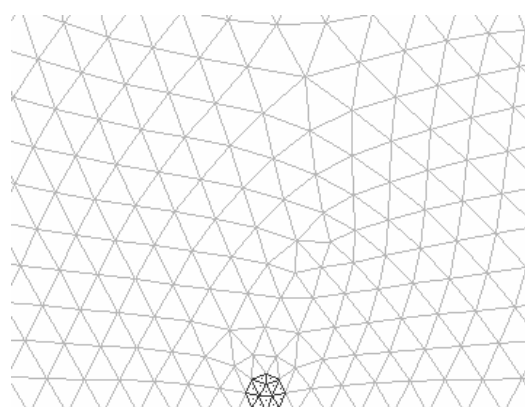


obr. 5 Schéma modelované oblasti dle fyzikálního experimentu

Síť byla vzhledem k definici objemového zdroje vytvořena jako nestrukturovaná z trojúhelníkových elementů, nerovnoměrně zhuštěná, v průběhu výpočtu byla dále adaptována, viz. obr. 6,7.



obr. 6 Trojúhelníková síť – detail ulice kolem zdroje



obr. 7 Trojúhelníková síť – detail

Na hranicích oblasti byly definovány tyto okrajové podmínky:

$$\text{vstup do oblasti :} \quad \text{logaritmický rychlostní profil } u = \frac{u^*}{\kappa} \cdot \ln \frac{y-z_0}{z_0}$$

kde  $u^*$  je třetí rychlost,  $z_0$  aerodynamická drsnost a  $\kappa$  von Kármánova konstanta. Referenční rychlost  $u=1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dále byla definována intenzita turbulence  $I=0,1\%$  a hydraulický průměr  $h_d=1,1\text{m}$ .

$$\text{výstup :} \quad \text{Neumannova okrajová podmínka} \quad \frac{\delta u}{\delta x} = \frac{\delta v}{\delta x} = 0$$

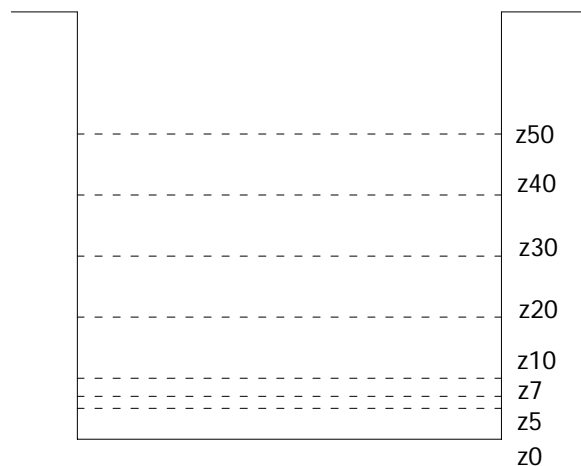
$$\text{horní hranice oblasti :} \quad u = 1,5 \text{ ms}^{-1}, v = 0$$

$$\text{dolní hranice oblasti: } u = v = 0$$

Objemový zdroj byl modelován jako perforovaná trubička o průměru  $8 \cdot 10^{-3}$  m, do které je vhnána směs plynného methanolu ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) a vzduchu o celkovém hmotnostním průtoku  $Q=(8,3 \cdot 10^{-5} \pm 2 \cdot 10^{-6})$  g/s. Směs tvořilo 99,5% methanolu a 0,5% vzduchu.

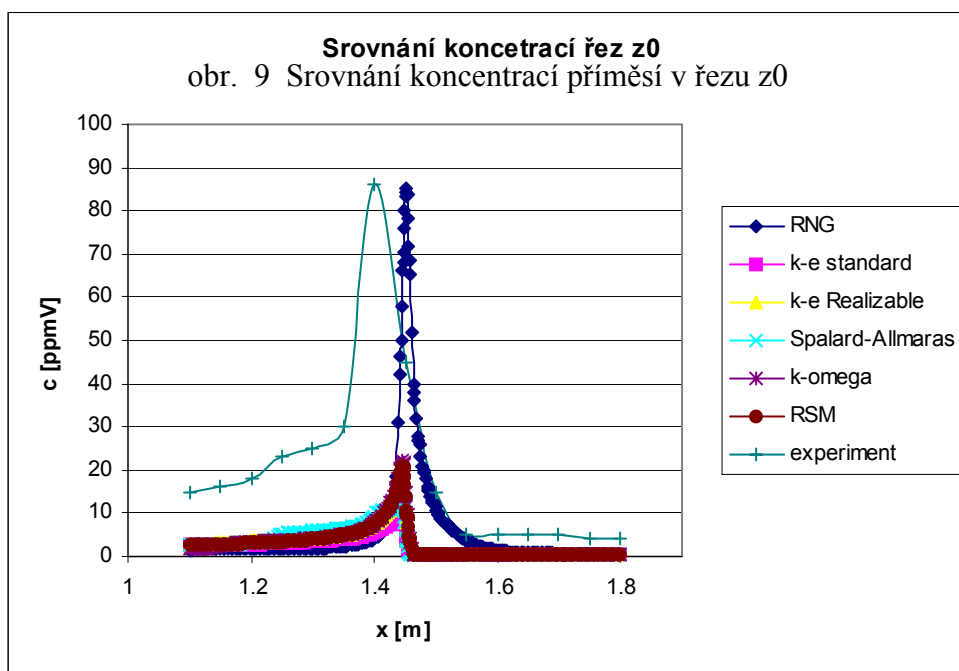
Úloha byla modelována jako trojrozměrná, časově závislá, byly použity různé modely turbulence a parametry řešení. Z výsledků [8] bylo zřejmé, že koncentrace příměsi je ovlivněna polohou víru, který se vytvoří v kaňonu ulice. Při srovnání s výsledky měření byla nejlepší shoda patrná pro RNG k- $\varepsilon$  model turbulence.

Z experimentu byly známy hodnoty koncentrací příměsi ve vodorovných řezech ulicí ve výšce 5, 7, 10, 20, 30, 40 a 50 cm od dna ulice (obr. 8).

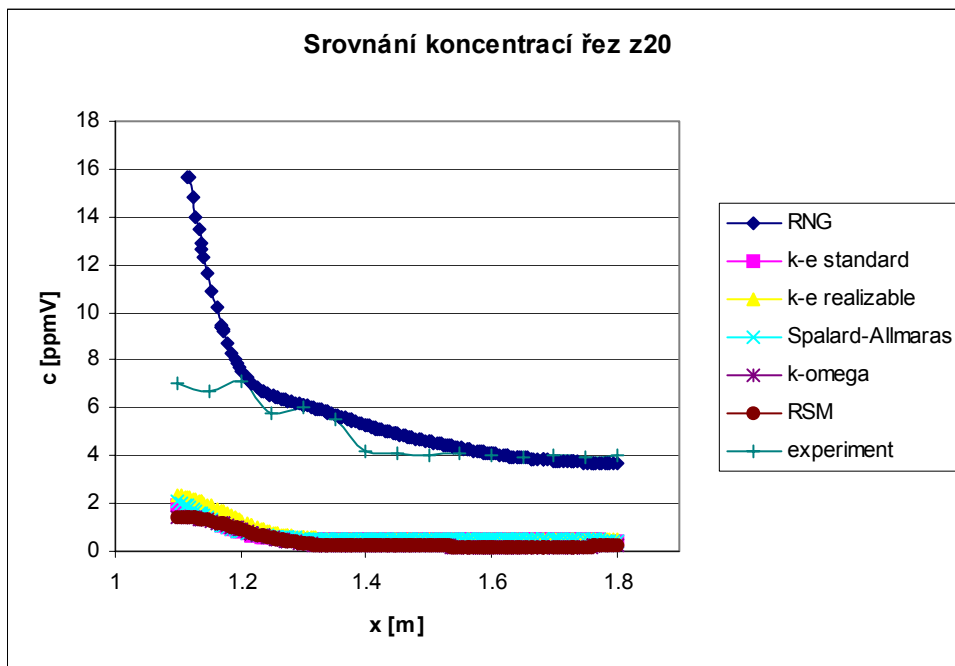


obr. 8 Vodorovné řezy ulicí

Nejvíce se svými výsledky přiblížil experimentu model RNG k- $\varepsilon$ , jak je patrné z vyhodnocení koncentrací na obr. 9 a 10. Vír vznikající mezi domy byl v případě použití tohoto modelu turbulence umístěn výše než u ostatních modelů. Poloha vypočteného maxima byla vzhledem k experimentu posunuta více do středu ulice.

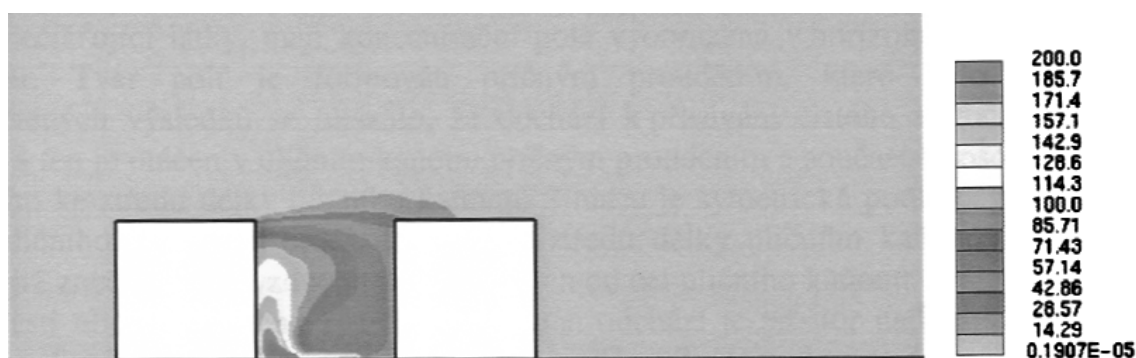






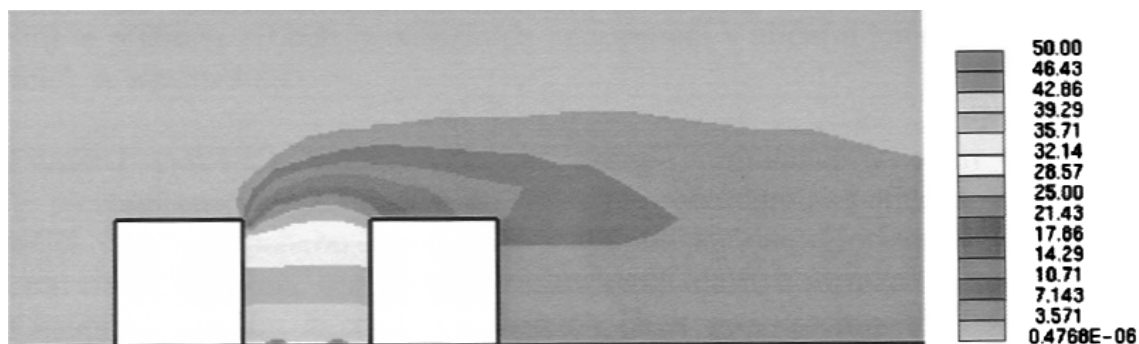
obr. 10 Srovnání koncentrací příměsí v řezu z20

Modelování liniového zdroje uvedenými postupy představuje určité zjednodušení, které umožňuje poměrně snadnou definici oblasti, zdroje a přípravu sítě. Při podrobnějším modelování lze uvažovat také vliv pohybujících se automobilů jako zdrojů hybnosti, turbulentní kinetické energie a emisí. Je možné i podrobné modelování geometrie jednotlivých vozidel, což je však mnohem náročnější na přípravu i samotné řešení úlohy. Je možné simulovat různé dopravní situace v uličních kařonech vznikající při jednosměrném a protisměrném provozu ve srovnání se stavem, kdy se v ulici automobily nepohybují. Tento složitější problém s oblastí podobnou předcházejícím úlohám, byl modelován na VUT Brno [7], viz obr. 11a, b, c.

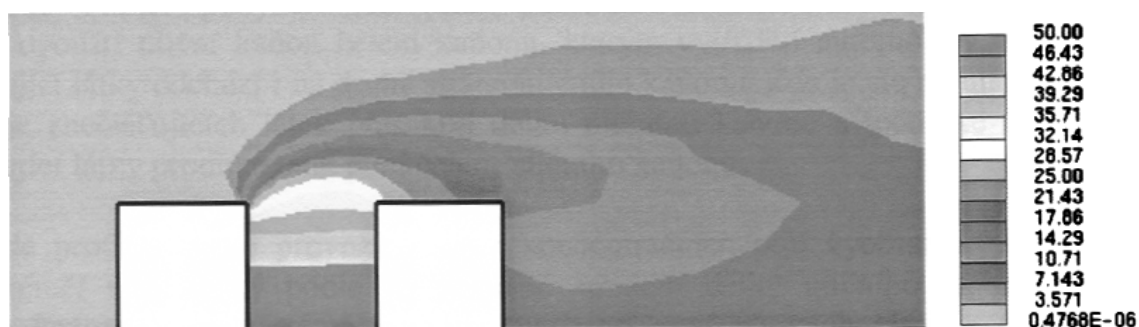


obr. 11a) Šíření emisí z uličního kařonu v situaci bez pohybu automobilů



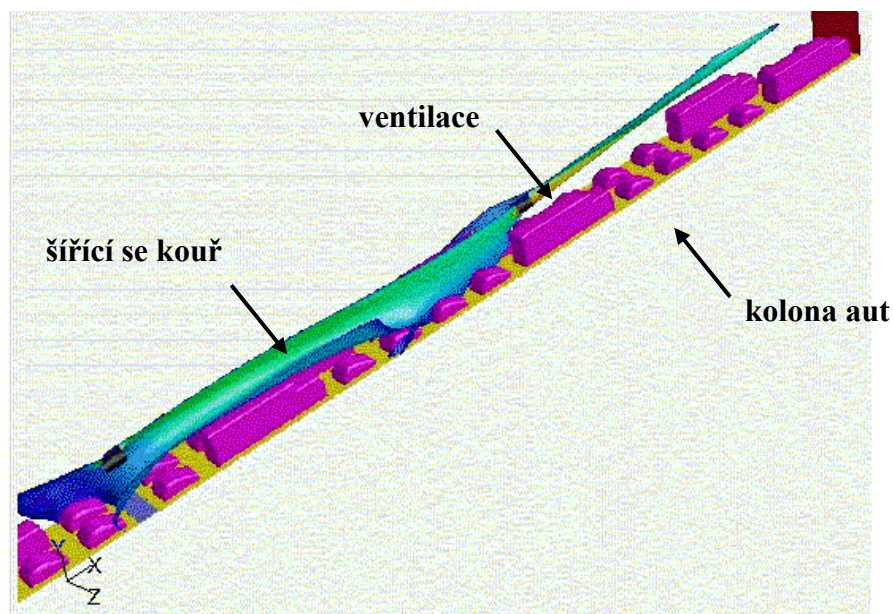


obr. 11b) Šíření emisí z uličního kařonu při jednosměrném provozu



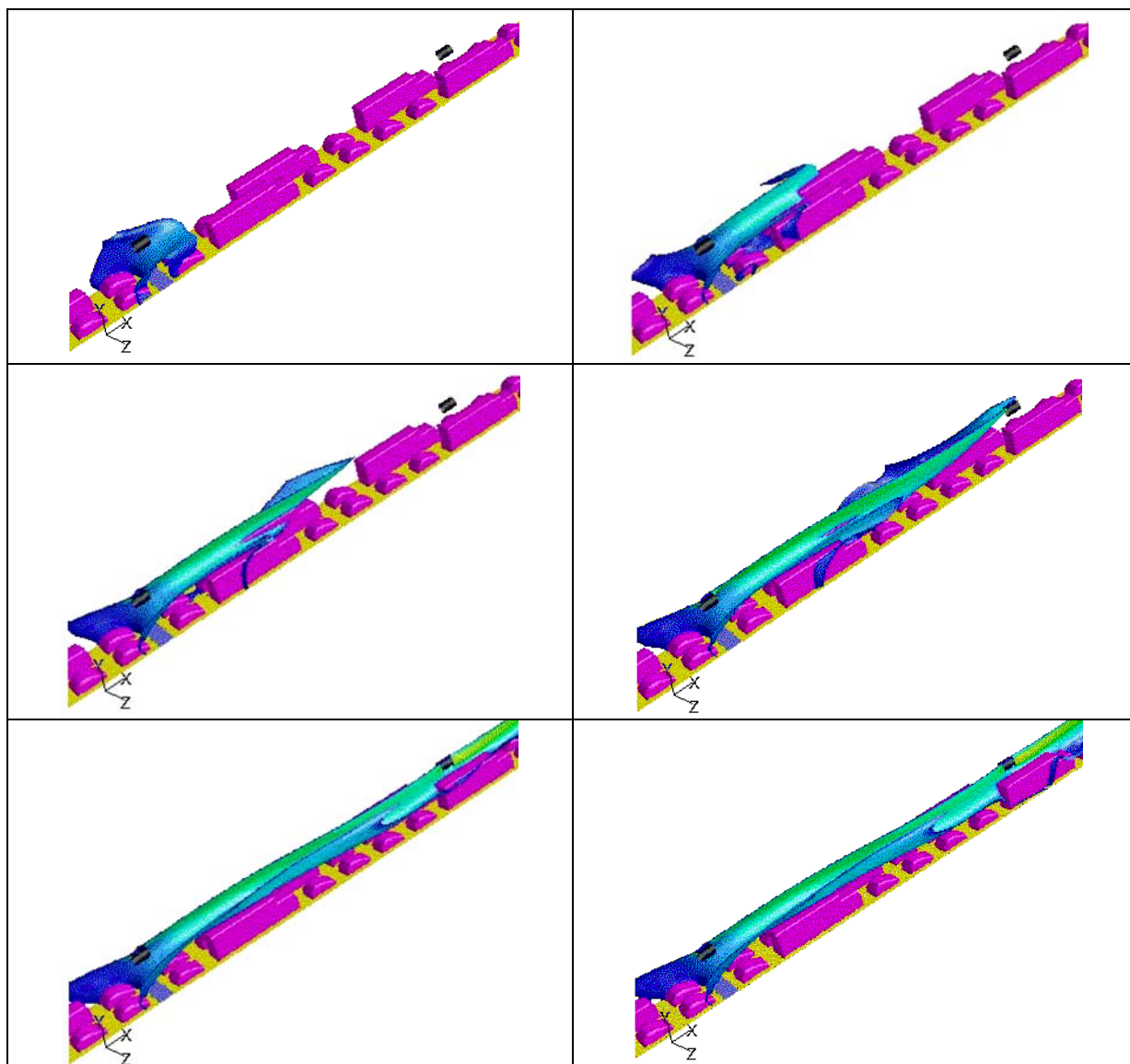
obr. 11c) Šíření emisí z uličního kařonu při obousměrném provozu

Další z možných aplikací je řešení závažného problému vzniku a šíření požáru v tunelech. V následujícím případě byla proveden fyzikální experiment a počítačová simulace šíření kouře v Memorial Wind Tunelu, West Virginia [10]. Úloha byla modelována pomocí software Fluent, výsledky byly verifikovány pomocí fyzikálního experimentu, viz obr. 12.



obr. 12 Modelování šíření kouře v Memorial Wind tunelu, počítačová simulace

Z následujícího sledu obrázků je patrný vývoj a šíření kouře v závislosti na čase a také význam větracího systému při jeho odstranění, viz obr. 13. Mohou být testovány různé varianty odvětrání tunelu a to s poměrně malými náklady.



obr. 13 Šíření kouře v tunelu v závislosti na čase

### Závěr

K přesnému modelování požárů, výbuchů, havarijních úniků toxických látek a jejich rozptylu je požadováno velké množství informací. Ne vždy jsou všechny tyto informace přístupné. Některé poznatky a údaje je možné získat z výsledků experimentů v aerodynamických tunelech. Při jejich přípravě je významná úzká spolupráce mezi fyzikálními a numerickými experimentátory zaměřená na to, aby naměřená data poskytovala vstupní informace pro matematické modelování a také umožňovala verifikaci

vypočtených výsledků. Numerické modelování pak může být užitečným nástrojem umožňujícím pochopení modelovaných jevů. Větší význam než samotné číselné hodnoty jednotlivých sledovaných veličin mají trendy, které je možné sledovat v souvislosti se změnou parametrů významných pro daný problém.

Práce byly realizovány za finanční podpory MŠMT v rámci mezi-fakultního projektu institucionálního výzkumu „Vývoj algoritmů pro řešení složitých průmyslových problémů“ CEZ J17/98:272400019 a v rámci projektu COST 715.60 „Numerical Modelling of the Small Scale Urban Air Flow and Pollutant Dispersion under Various Meteorological Conditions“.

## Literatura

1. Rafailidis, S., Pavageau, M., Schatzman, M.: Wind tunnel simulation of car emission dispersion in urban street canyons. In *Annalen der Meteorologie, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Munich 1995*
2. Drábková, S., Jaňour, Z., Kozubková, M., Šťáva, P.: Srovnání numerického a experimentálního modelování rozptylu příměsí v aerodynamickém tunelu. In *Dynamika tekutin '97, Praha, ÚT AV ČR, 1997, s. 11-12.*
3. Jaňour Z., Holpuch J., Strážník M.: Flow and Dispersion in an Street Canyon Simulation. In *EUROMECH Col. 391 "Wind tunnel modelling of dispersion in environmental flows", Book of Abstracts, Prague, 1999, s. 17-18.*
4. Kozubková, M., Drábková, S., Šťáva, P.: Matematické modely nestlačitelného a stlačitelného proudění, Metoda konečných objemů. *Skriptum, Ostrava VŠB-TU, 1999, 103 s.*
5. Kozubková, M.: Turbulence v atmosféře. Numerické modelování. *Habilitační práce, Ostrava VŠB -TU, 2000, 119 s.*
6. Drábková, S.: Numerické modelování neizotermních turbulentních proudů. *Doktorská disertační práce, Ostrava VŠB -TU, 2000, 138 s.*  
Pospíšil, J.: Řešení rozptylu emisí produkovaných automobily v městské zástavbě. *Doktorská disertační práce, VUT v Brně, 2002, 121 s.*
7. Vyroubal, M.: Rozptyl příměsí z liniového zdroje při proudění v aerodynamickém tunelu. *Diplomová práce, Ostrava VŠB -TU, 2002, 74 s.*
8. Stull, R.B.: An Introduction to Boundary Layer Meteorology, *Kluwer Academic Publishers, 1994, 666 str.*
9. <http://www.fluent.com/solutions/hvac/applications.htm>

## Summary

Wind tunnel experiments are important for the investigation of the flow field modification produced by building structures and terrain configuration. They allow to simulate the pollutant dispersion from the point, line or volume sources and to predict the dense or heavy pollutant dispersion. They also provide the background for the mathematical description of the investigated phenomena and enable to verify the results of mathematical experiments. Mathematical modelling of the atmospheric flow and pollutant dispersion enables to solve the environment related matters at relatively low cost. That is why numerical modelling is applied as a tool for dispersion studies and risk analyses. Physical experiments carried out in wind tunnels and numerical experiments are closely connected. The presented study gives several examples of wind tunnel simulation followed by the numerical modelling of the same problem. The Fluent CFD package was applied for numerical simulation.

In the first case the experiment carried out in the wind tunnel at the Meteorological Institute of the University Hamburg was simulated numerically. Flow structures and dispersion from the line source in the street canyon were investigated. The flow in the street canyon was assumed to be two-dimensional. The size of the computational domain, grid refinement and applied turbulence model were tested [1], [2], [6].

The second study is based on the experiment carried out at the Institut of Thermomechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic. A new wind tunnel was constructed there for research on flow and diffusion in a street canyon. The distribution of the pollutant concentration on the bottom and walls of the buildings was determined in dependence on the configuration of the street and reference velocity. In numerical model the flow was assumed to be three-dimensional. Attention was focused on the line source definition, grid generation and turbulence models testing [3], [8].

Results and experience from wind tunnel experiments are applied in the modelling of traffic pollution in cities, as can be seen in the study carried out in VUT Brno [7].

By the mathematical models it is possible to simulate complicated physical phenomena such as chemical reactions, heat transfer, radiation, etc. and test so complicated phenomena as smoke abatement in tunnels. FLUENT was used to simulate the development and spread of smoke with the Memorial Tunnel, West Virginia, and the results were compared to the experimental data. This simulation shows how smoke develops and spreads over time, and how effective the ventilation system in the tunnel is at removing it. Various ventilation scenarios can be tried out without the expense of physical modelling [9]

Application of numerical modelling as a tool for dispersion and risk analyses studies requires further testing and comparing the model predictions with observed data and data obtained from physical experiments. In this field wind tunnel experiments are of great importance.