

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

**Ing. Jiří Pospíšil**

**ŘEŠENÍ ROZPTYLU EMISÍ PRODUKOVANÝCH  
AUTOMOBILY V MĚSTSKÉ ZÁSTAVBĚ**

**SOLUTION OF TRAFFIC POLLUTANTS  
DISPERSION IN URBAN AREAS**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Inženýrská mechanika

Školitel: Prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc

Školitel specialista: Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

Oponenti: doc. RNDr. Milada Kozubková, CSc

prof. Ing. Karol Filakovský, CSc

RNDr. Jan Macoun, Ph.D.

Datum obhajoby: 26. února 2003

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

znečištění ovzduší, CFD modelování, dynamika provozu, dopravou generované proudění

## **KEY WORDS**

pollutants dispersion, CFD modeling, traffic dynamics, traffic induced flow

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

Odbor termomechaniky a techniky prostředí

Energetický ústav

Fakulta strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

© Jiří Pospíšil, 2003

ISBN 80-214-2385-4

ISSN 1213-4198

# OBSAH

1 ÚVOD	5
2 SOUČASNÝ STAV ZNALOSTÍ	6
2.1 Statistické metody	6
2.2 Numerické modelování	6
3 CÍLE PRÁCE	7
4 POUŽITÝ MATEMATICKÝ MODEL	8
4.1 Pohybové rovnice	8
4.2 Rovnice kontinuity	8
4.3 Model turbulence	8
4.4 Zahrnutí vlivu pohybujících se automobilů	9
5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	11
5.1 Jednoduchý uliční kaňon	11
5.2 Modelová křižovatka	15
5.3 Časově závislé řešení provozu v prostoru skutečné křižovatky	19
6 ZÁVĚR	22
7 SUMMARY	23
8 POUŽITÁ LITERATURA	24
9 AUTROVY PUBLIKACE	24
10 ŽIVOTOPIS AUTORA	26



# 1 ÚVOD

Vývoj lidské společnosti je doprovázen zvyšující se spotřebou energií. Velký rozvoj techniky v posledním století zapříčinil několikanásobně větší spotřebu energetických zdrojů, které jsou přeměňovány dílem na elektrickou energii, dílem na tepelnou energii a dílem na mechanickou energii. Tyto tři základní druhy energie se staly každodenní potřebou našeho života a jejich omezování v blízké době nemůžeme předpokládat.

Životní úroveň každé společnosti těsně souvisí s velikostí spotřeby energie a efektivností jejího využívání. Přeměna energie vázané ve fosilních palivech do využitelných forem se z největší části realizuje spalováním. Produktem této přeměny jsou spaliny, které při dlouhodobé a intenzivní produkci mohou zamořit rozlehlé oblasti a znehodnotit, v extrémních případech i zničit životní prostředí. Tyto skutečnosti se v posledních čtyřech desetiletích staly tak alarmující, že bylo nutné přijmout řadu opatření na ochranu životního prostředí a zdraví obyvatel.

Po omezení produkce škodlivin z velkých zdrojů znečištění, kterými jsou elektrárny, teplárny a průmyslová zařízení, se pozornost upřela na malé zdroje, které jsou v naší těsné blízkosti ve značném množství. Typické zdroje takového znečištění jsou automobily, které projíždějí v těsné blízkosti lidských obydlí. Jejich zvyšující se počet zvyšuje množství emisí přicházejících do nejnižší vrstvy atmosféry, která je rozhodující pro život všech živých organismů.

Požadavky na dopravu se v důsledku zvětšování trhů a zvyšování životní úrovně stále stupňují. Cena automobilů a jejich provozu se dostala na takovou úroveň, že se cestování automobilem stalo každodenní samozřejmostí řešící přepravu pro miliony lidí na celé planetě. Také zboží se dopravuje ve velkém množství na stále větší vzdálenosti.

Tyto skutečnosti způsobují velmi intenzivní provoz na pozemních komunikacích, jehož logickým důsledkem je silné dopravní zatížení v místech křižovatek významných silničních tahů. Místy nejintenzivnějšího provozu automobilů jsou velká města, která jsou křižovatkou hlavních komunikací a zároveň místem pobytu velkého množství lidí.

Prognózy vývoje automobilového trhu naznačují, že trend zvyšování počtu automobilů na pozemních komunikacích bude pokračovat. Z toho důvodu musíme počítat i se zvyšujícím se imisním zatížením okolí pozemních komunikací. Je tedy nutné hledat nové nástroje, které pomohou správně posuzovat šíření znečišťujících látek v městských aglomeracích a s jejich pomocí minimalizovat negativní důsledky.

## 2 SOUČASNÝ STAV ZNALOSTÍ

V současné době jsou používány k vypracování rozptylových studií dva odlišné přístupy. Starším přístupem je statistická metoda. Novější a teprve prosazující se metody jsou založeny na počítačovém řešení problémů z oboru mechaniky tekutin. Využitím tohoto nového přístupu se zabývá tato práce.

### 2.1 Statistické metody

Statistické metody při určování znečištění ovzduší využívají statistického vyhodnocení oblasti na základě běžně dostupných vstupních parametrů. Využívá se gaussovského modelu rozptylu kouřové vlečky a stabilitní klasifikace ovzduší. Stabilitní klasifikace podle [1] rozeznává pět tříd stability s rozdílnými rozptylovými podmínkami. Klasifikace zahrnuje tři třídy stabilní, jednu třídu normální a jednu třídu labilní.

Pro vyhodnocení dané oblasti je nutné vždy nejprve zpracovat větrnou růžici a to s postihnutím směrů, rychlostí a četností větrů. Přesná geometrie řešené oblasti není pro tuto metodu vyžadována a omezuje se jen na nadmořskou výšku zdroje znečištění a kontrolního bodu, dále pak na vlnitost terénu ohodnocenou koeficientem vlnitosti. Tyto parametry společně se zvolenou četností jednotlivých tříd stability jsou dosazeny do vztahů uvedených v [1].

Tento přístup je oprávněný při vyšetřování rozptylu znečištění v otevřené krajině. Přesnost získaných hodnot se při přibližování ke zdroji znečišťujících látek rychle snižuje. V těsném okolí zdroje jsou pak určeny hodnoty již tak odlišné od skutečných koncentrací, že je není možné uspokojivě používat jako výchozí data pro další analýzy.

Při aplikaci této metody na liniový zdroj, představovaný frekventovanou komunikací, dochází k zanedbání velmi výrazných vlivů souvisejících s pohybem automobilů.

### 2.2 Numerické modelování

V předkládané práci je pro vyšetřování rozptylu emisí použito numerické modelování. Tento nástroj velmi rychle nachází uplatnění při řešení nejrůznějších problémů v oblasti mechaniky tekutin. Stále jsme ale odkázáni na úlohy, jejichž rozměr je omezen možnostmi počítačového vybavení.

Neustálé zvyšování možností počítačů dovoluje i zvětšovat řešené oblasti, v současné době je možné detailně řešit výseky městské zástavby o rozměrech 1000 x 1000 m. Prostorové omezení naznačuje, že není možno pojmout tento způsob řešení jako alternativu ke klasickému (statistickému přístupu). Jde ale o velmi kvalitní prostředek, který umožňuje řešit problémy znečištění v místech, která nedokážeme jiným způsobem postihnout.

Dále je nutné uvést, že výsledkem numerického řešení není statistické rozložení koncentrací imisí, ale konkrétní výsledek odpovídající zadaným parametrům.

Získané hodnoty odpovídají okamžitým hodnotám získaným například mobilními monitorovacími stanicemi.

Hlavní přednosti využití numerického modelování k stanovení hodnot imisního zatížení jsou:

- detailní postžení geometrie oblasti
- zohlednění konkrétních meteorologických podmínek
- zahrnutí vlivu provozu
- možnost návrhu a otestování vhodných technických opatření
- možnost řešení nestacionárních situací

K výpočtům je využíván výpočetní software STAR-CD, který je celosvětově využíván při řešení problémů mechaniky tekutin a jeho použití na tisícovkách nejrůznějších úkolů a jejich porovnání s experimenty je dostatečnou zárukou k získání důvěry v správnost řešení tohoto prostředku.

### 3 CÍLE PRÁCE

Zvyšující se počet automobilů v ulicích měst a s tím související vyšší množství produkovaných znečišťujících látek je v rozporu s požadavky obyvatel na co nejčistší prostředí v místě jejich dlouhodobého pobytu. Tento požadavek jsou nuceni řešit urbanisté a ostatní zainteresovaní pracovníci, kteří jsou odpovědní za další rozvoj výstavby a minimalizaci nežádoucích vlivů dopravy v již realizované zástavbě.

Ministerstvo životního prostředí vydává metodické pokyny, které mají za úkol sjednotit způsoby odborného posouzení šíření znečišťujících látek z jejich zdrojů. Současné znění metodického pokynu, který se touto problematikou zabývá [1], vymezuje detailně oblasti jeho použití. V metodickém pokynu je uvedeno, že uvedená metodika není použitelná pro výpočet znečištění ovzduší uvnitř městské zástavby „pod úrovní střech budov“. Právě oblast „pod úrovní střech budov“, ve které je tato metodika nepoužitelná, je znečišťujícími látkami z automobilů nejvíce zasažena. Z důvodu absence jiné metodiky zabývající se rozptylem emisí v městské zástavbě, zůstává tato oblast bez vhodného matematického popisu.

Uvedené skutečnosti vedly k vypracování této práce, jejímž cílem je využít možnosti počítačového modelování při řešení městských oblastí „pod střechami budov“ z pohledu šíření znečišťujících látek z automobilové dopravy. V rámci řešení tohoto úkolu je pomocí počítačového modelování zahrnut do výpočtu co nejdříve vliv pohybu automobilů na pozemních komunikacích a produkce znečišťujících látek z automobilů. Výsledky řešení poskytnou informace o zákonitostech šíření znečišťujících látek v městské zástavbě při různých režimech provozu a různé hustotě provozu se zohledněním vlivu meteorologických podmínek.

Vyvíjený matematický popis směřuje k vytvoření nového nástroje využívajícího metodu kontrolních objemů, který bude schopen řešit problémy rozptylu emisí v městské zástavbě s detailním zahrnutím vlivu automobilů.

## 4 POUŽITÝ MATEMATICKÝ MODEL

### 4.1 Pohybové rovnice

Pro řešení proudového pole pomocí metody kontrolních objemů je nezbytné sestavit řešitelnou soustavu rovnic, která chování tekutiny jednoznačně popisuje. Základem pro sestavení takové soustavy jsou pohybové rovnice vyjadřující silovou rovnováhu na elementu kapaliny. Pohybové rovnice v podobě použitelné pro řešení turbulentního proudění mají tvar:

$$u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \left( \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \quad (4.1a)$$

$$u \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{v} - \left( \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \quad (4.1b)$$

$$u \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \nabla^2 \bar{w} - \left( \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right). \quad (4.1c)$$

Pohybové rovnice je nutné doplnit o vhodný model turbulence. Model turbulence souvisí se zavedením turbulentní viskozity  $\mu_t$ . Na rozdíl od laminární viskozity  $\mu$  jako fyzikální vlastnosti dané látky, turbulentní viskozita  $\mu_t$  je vlastnost toku látky a udává jak intenzivní výměna hybnosti se pomocí turbulentních vírů uskutečňuje. Reynoldsova napětí jsou pak podle Boussinesqovy hypotézy vyjádřena vztahem.

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{\rho u'_k u'_k} \quad (4.2)$$

### 4.2 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity je další rovnicí nezbytnou pro popis proudění. Z fyzikálního hlediska vyjadřuje zákon zachování hmoty a její matematický tvar má formu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (4.3)$$

Časový člen na levé straně rovnice (4.3) je pro případ stacionárního proudění roven 0. Po úpravě získáme konečný tvar popisující stacionární, nestlačitelné proudění.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.4)$$

### 4.3 Model turbulence

Pro řešení byl použit nelineární k- $\epsilon$  model pro nízká Reynoldsova čísla (Shih, T. H., 1993) [7]. Rovnice pro kinetickou energii v případě ustáleného nestlačitelného proudění v izotermním poli může být zapsána ve formě:



$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t P - \rho \varepsilon + P_{\text{NL}} + S_k \quad (4.5)$$

Kde  $k$  představuje kinetickou energii turbulence,  $\varepsilon$  je její disipace a  $\mu_{\text{eff}}$  je efektivní viskozita daná vztahem

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (4.6)$$

Člen  $P$  vyjadřuje produkci kinetické energie turbulence způsobenou smykovým a normálovým napětím,  $P_{\text{NL}}$  je dodatečný člen zohledňující nelineární příspěvek.  $S_k$  je dodatečný člen zahrnující produkci kinetické energie turbulence od projíždějících automobilů.

Rovnice pro disipaci kinetické energie má tvar:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_{\text{NL}} \quad (4.7)$$

Hodnota turbulentní viskozity je počítána ze vztahu:

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.8)$$

Použité modelové konstanty nabývají hodnoty:  $C_1=1.44$ ,  $C_2=1.92$ ,  $C_\mu=0.09$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ ,  $f_\mu$  je dodatečný člen, který je v našem případě počítán dle P. V. Nielsen [2] jako:

$$f_\mu = e^{\left( \frac{-3.4}{\left(1 + \frac{R_t}{50}\right)^2} \right)} \quad (4.9)$$

#### 4.4 Zahrnutí vlivu pohybujících se automobilů

Rozptyl emisí v prostoru ulice nebo křižovatky je ovlivněn prouděním, které se zde vytvoří. Jeho směr a rychlost je ovlivněna větrem a v těsné blízkosti nad vozovkou se přidávají pohybující se automobily. Vliv automobilů je pro řešení prostoru nad vozovkou a v těsném okolí komunikace ve většině případů dominantní. Obzvláště v situaci, kdy je přirozené vymývání nedostatečné (například v období bezvětrí), rozhoduje o rychlosti šíření znečišťujících látek do okolí, a tím o maximálních hodnotách koncentrací znečišťujících látek, které mohou v některých případech překračovat hygienické limity.

Problém pohybu automobilů můžeme rozdělit na dvě části, které jsou odděleně zahrnuty do výpočtů.

- Silové působení automobilů na obtékající vzduch
- Produkce kinetické energie turbulence vyvolaná pohybem automobilů

## Odporová síla

Odporovou sílu při obtékání automobilu můžeme zapsat ve tvaru:

$$\vec{F}_D = \vec{F}_\tau + \vec{F}_f. \quad (4.10)$$

Kde  $\vec{F}_\tau$  je síla vyjadřující třecí odpor tělesa a  $\vec{F}_f$  je síla vyjadřující tvarový odpor obtékaného tělesa. První člen rovnice (4.10) se uvažuje pouze v případech laminárního proudění. Reakcí k odporové síle je síla, kterou těleso působí na tekutinu. Toto působení zahrneme do výpočtu jako objemovou sílu působící v místech, kterými automobily projíždí. V prvním kroku je nutné vyčlenit objemové elementy, které reprezentují oblast ve které se automobily pohybují. Pro jednotlivé objemové elementy je pak vypočtena síla nahrazující pohyb automobilů. Její velikost se získá ze vztahu (4.11) korekcí na příslušný objemový element.

$$\vec{F}_i = \vec{F}_D \cdot f(i) \cdot \dot{Q}_{car} / |\vec{U}_{car}| \quad (4.11)$$

Kde  $f$  označuje korekční faktor,  $\dot{Q}_{car}$  hustotu provozu a  $U_{car}$  rychlost jízdy automobilu.

## Dodatečné zdroje kinetické energie turbulence

Pohybující se objekty indukují přídavnou kinetickou energii turbulence, která je do rovnice (4.5) zahrnuta pomocí členu  $S_k$ . Z různých studií např. Eskritge a Hunt (1979), Sedefian et al. (1981) a Sini a Mestayer (1997) vyplývá, že turbulence vzniká převážně v úplavu za automobilem. Proto můžeme dodatečné zdroje zahrnout pouze podél trajektorie automobilu, do paprsků kontrolních objemů využitých pro zdroje hybnosti. Po otestování různých tvarů rovnic pro výpočet dodatečné produkce kinetické energie turbulence byl použit následující vztah, který je pro pohyb automobilů v uličním kaňonu nejvhodnější.

$$S_k = C_{car} \rho_\infty (U_{car} - U_\infty)^2 \dot{Q}_{car} \quad (4.12)$$

Kde  $C_{car}$  je modelová konstanta a  $\rho_\infty$  je hustota okolního vzduchu.

## Zdroje emisí

Konečná podoba koncentračního pole znečišťující látky produkované automobily v městské zástavbě je ovlivněna polohou vyústění výfukových potrubí. Při tvorbě počítačového modelu je nutné zachovat tuto polohu co nejděle. Protože jsme však omezeni jistou velikostí kontrolních objemů, vybereme všechny, kterými vyústění výfukových potrubí při jízdě prochází. Do vybraných kontrolních objemů je potom v transportní rovnici pro řešený skalár zadána hodnota zdroje skalární veličiny, která odpovídá místní produkci emisí.

Látky vycházející z výfuků automobilů nahrazujeme obecným pasivním skalárem. Toto zjednodušení je velmi výhodné pro zrychlení výpočtů. Odpadá tak řešení transportních rovnic pro všechny škodliviny paralelně, ale řešíme jediný pasivní skalár a jeho řešením získáme výsledky udávající tzv. normalizovanou koncentraci  $C^*$ .

Hodnota zdroje skalární veličiny v kontrolních objemech procházených výfuky automobilů je zadávána tak, že automobil při rychlosti 50 km/h na vodorovné komunikaci produkuje hmotnostní zdroj skalární veličiny 1 kg/s. Pro řešení transportních rovnic je nutný přepoččet, který nám určí příspěvek skalární veličiny do každého kontrolního objemu. Tento přepoččet se provádí dle vztahu:

$$S_k^s = \frac{\dot{S}_{car} \cdot \Delta l \cdot \dot{Q}_{car}}{U_{car}} \quad (4.13)$$

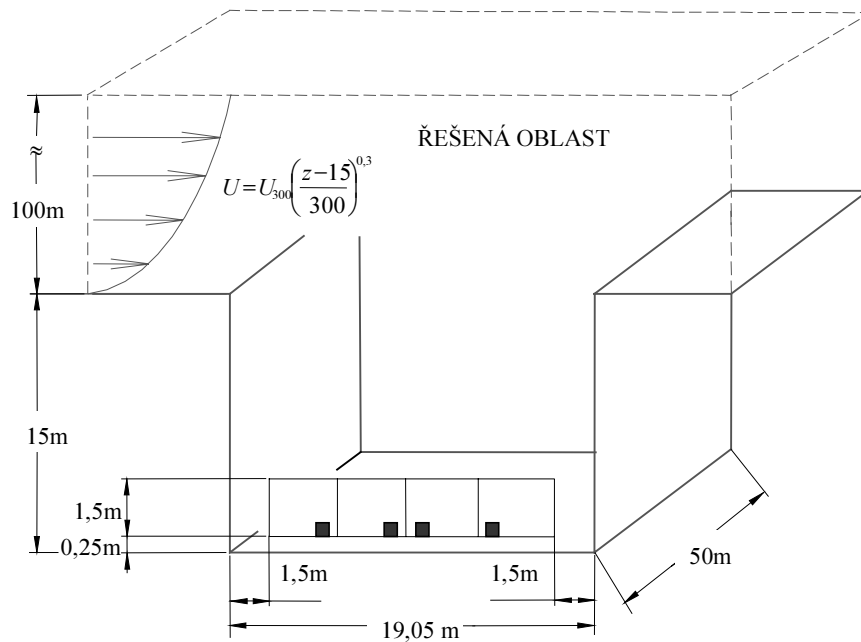
## 5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Městské aglomerace, ve kterých studium rozptylu emisí nachází největší uplatnění, jsou tvořeny sítí komunikací. Ty jsou vedeny v budovami zastavěném území. Centrální části měst jsou ve většině případů charakteristické těsným umístěním souvislé řady budov kolem komunikace. Proluky mezi budovami jsou v tomto případě vytvořeny pouze v místech křížení s jinou komunikací. Pro vlastní studium rozptylu emisí v městské aglomeraci je vhodné se seznámit s vlivem opakovaně vyskytujících se prvků městské zástavby. Z těchto prvků byl vybrán uliční kaňon a jednoduchá křižovatka pro hlubší seznámení se zákonitostmi šíření znečišťujících látek.

### 5.1 Jednoduchý uliční kaňon

Pro detailnější seznámení s rozptylem znečišťujících látek právě v uličním kaňonu byl vytvořen matematický model geometricky jednoduchého uličního kaňonu. Šířka uličního kaňonu byla zvolena 19 m. Vozovka šířky 16,5 m je umístěna v horizontální rovině, rozdělena je do čtyř jízdních pruhů, každý o šířce 4 m. Čtyři jízdní pruhy umožňují testovat jednosměrný nebo protisměrný provoz pouze změnou orientace vektoru rychlosti automobilů, v příslušném jízdním pruhu, zadávaného do řešení pro pohyb automobilů. Stěny jednoduchého uličního kaňonu jsou tvořeny svislou rovinnou stěnou sahající až do výšky 15 m, ve které je umístěna střecha budov. Střecha je vytvořena rovinnou plochou umístěnou v horizontální rovině. Délka řešeného 3D kaňonu je 50 m. Schéma modelovaného jednoduchého uličního kaňonu i s uvedenými rozměry je vyobrazeno na obr. 5.1.

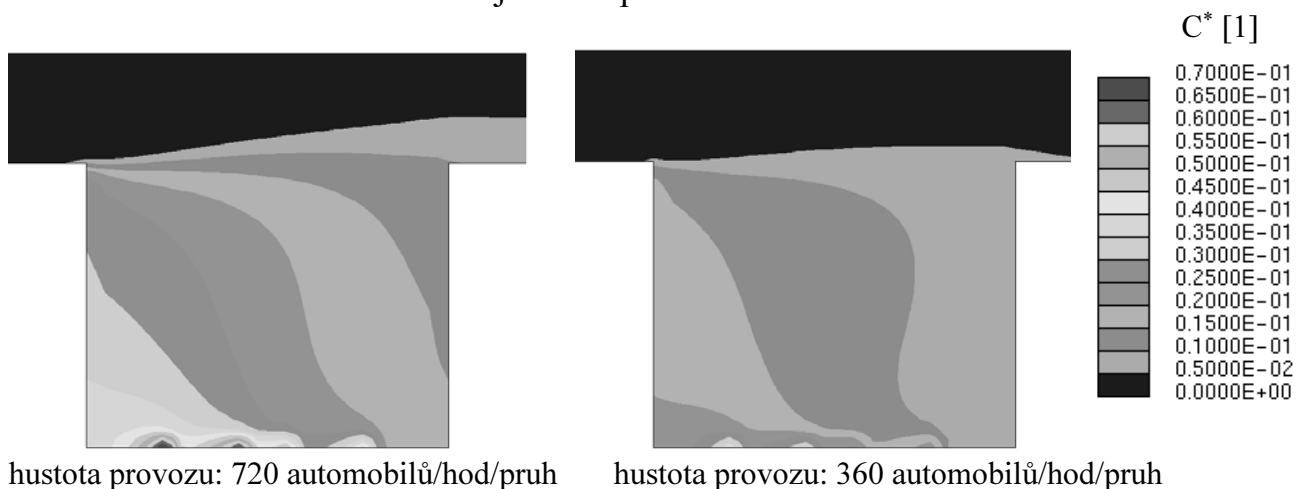
Pro zobecnění výsledků získaných na tomto jednoduchém uličním kaňonu bylo vhodné na předním a zadním čele kaňonu použít cyklickou okrajovou podmínku. Získané výsledky je v takovém případě možno považovat za výsledky získané na nekonečně dlouhém uličním kaňonu. Vítr proudící nad střechami budov byl popsán pomocí mocninného profilu, který je uveden v obr. 5.1. Orientace větru byla volena kolmo na uliční kaňon. Na obrázku jsou dále vyobrazena obdélníková pole nad vozovkou znázorňující kontrolní objemy do kterých byly zadány dodatečné zdroje hybnosti a dodatečné zdroje turbulence. Také jsou vyobrazeny malé černé čtverečky označující kontrolní objemy, do kterých byl zadán zdroj emisí. Tato poloha odpovídá vyústění automobilových výfuků.



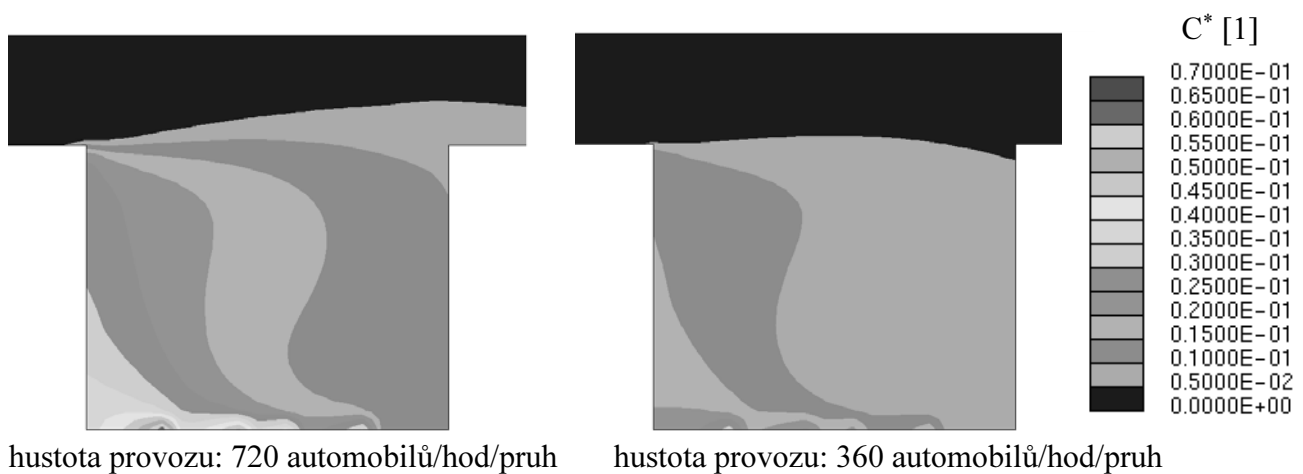
Obr. 5.1 Schéma modelovaného jednoduchého uličního kařonu

Proudění nad střechami budov tvořících uliční kařon způsobuje příčné proudění v prostoru kařonu. Jeho důsledkem je vytvoření rovnoměrně otáčejícího se víru, který zaujímá celý prostor kařonu. Hybnost je víru předávána v úrovni střech, kde dochází ke kontaktu otáčející se masy vzduchu a vzduchu pohybuujícího se nad střechami budov. V místě kontaktu čerstvého vzduchu a horní části vytvořeného víru dochází k promíchávání, které je rozhodující pro rozptyl látek produkovaných nad vozovkou. Oblast kontaktu je jediným místem, kudy je v případě nekonečného kařonu možno odvádět emise z prostoru uličního kařonu.

Ukázka získaných koncentračních polí ovlivněných příčným prouděním při působení větru o charakteristické rychlosti 4m/s je vyobrazena pro obousměrný provoz v obr. 5.2 a pro jednosměrný provoz v obr. 5.3. V obrázcích jsou vedle sebe vyobrazeny koncentrační pole v příčném řezu kařonu pro hustotu provozu 360 a 720 automobilů za hodinu v každém jízdním pruhu.



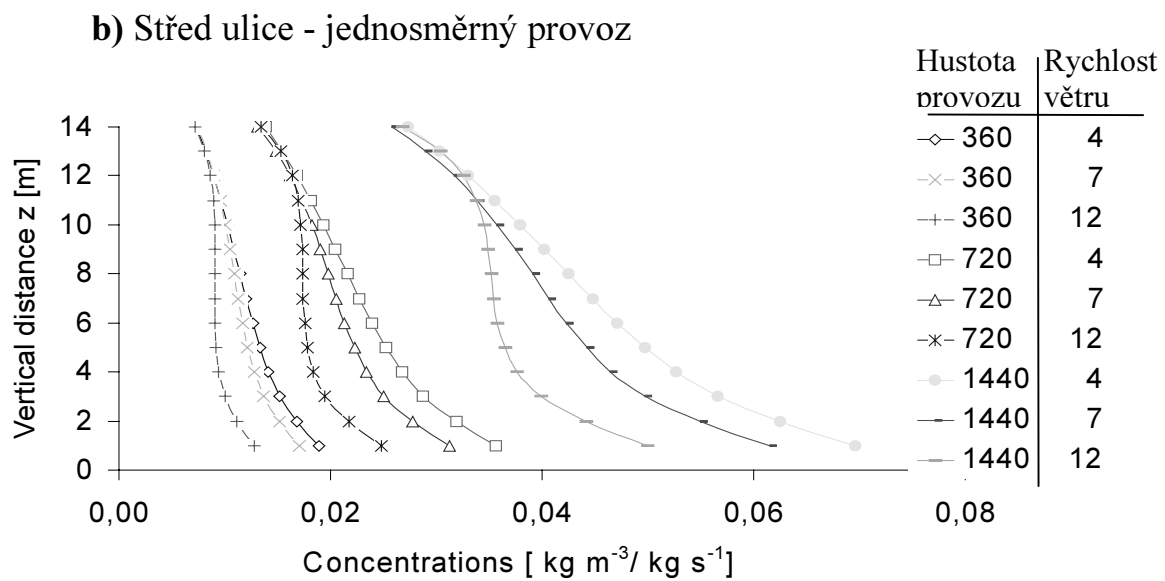
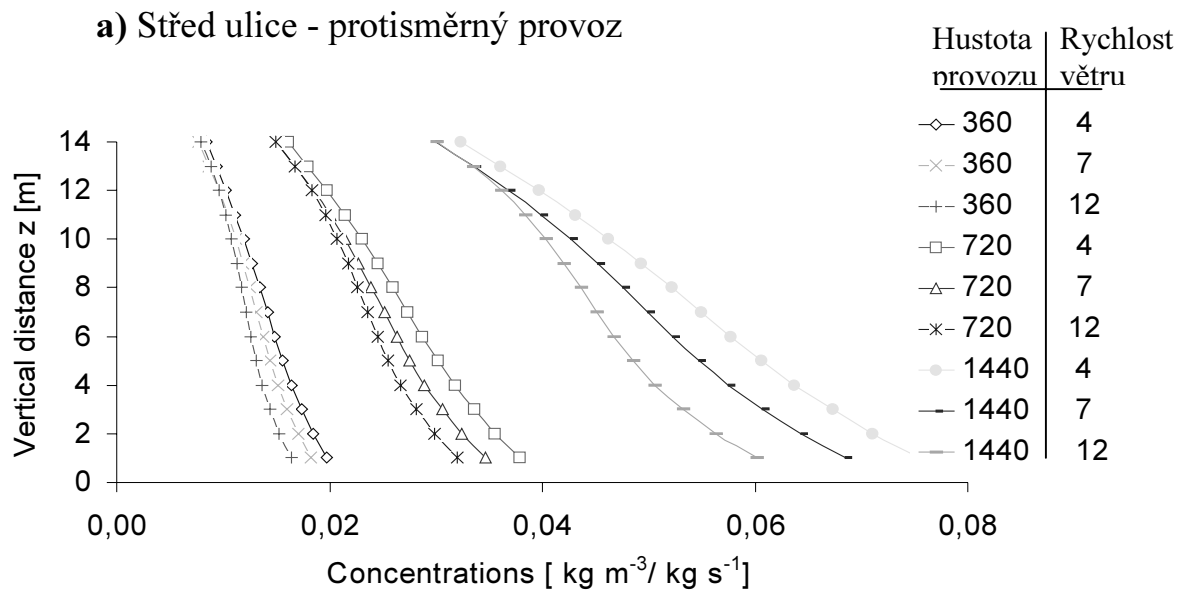
Obr. 5.2 Koncentrační pole v příčném řezu uličního kařonu – obousměrný provoz



*Obr. 5.3 Koncentrační pole v příčném řezu uličního kaňonu – jednosměrný provoz*

Koncentrační pole vyobrazená na obr. 5.3 poskytují dobrou představu o způsobu transportu znečišťujících látek opouštějící výfuky automobilů v prostoru uličního kaňonu. Vítr proudící nad střechami budov zleva vytváří příčný vír v kaňonu, který se otáčí po směru hodinových ručiček. Emise opouštějící výfuky automobilů jsou unášeny příčným prouděním a postupně zaplňují prostor uličního kaňonu. Příčné proudění vytváří charakteristické prohnutí kontur koncentračních polí. Znečištěný vzduch odchází nad střechou budovy tvořící pravou stěnu uličního kaňonu. Porovnáme-li výsledky získané při zadání hustoty provozu 720 a 360 automobilů za hodinu v každém jízdním pruhu je zřejmá podobnost tvaru koncentračních polí. Úměrně k zvýšenému provozu je zvýšena i koncentrace znečišťujících látek v kaňonu.

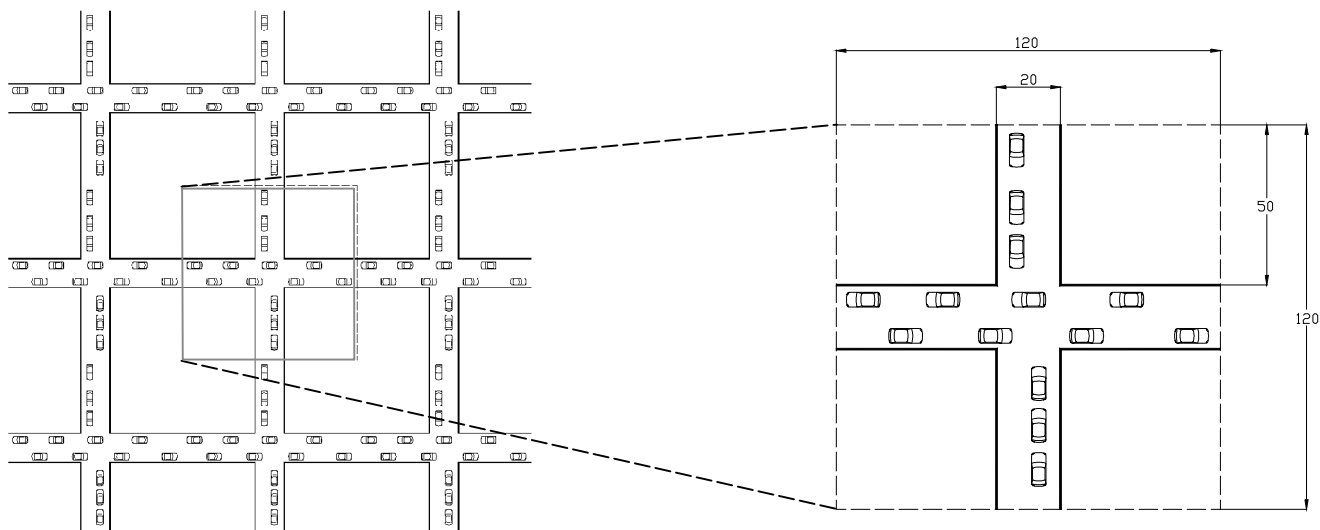
Na obr. 5.4a a obr. 5.4b jsou uvedena vertikální rozložení koncentrací emisí ve středu šířky kaňonu (mezi dvěma vnitřními jízdními pruhy) při protisměrném a jednosměrném provozu. Koncentrace jsou počítány jako pasivní skalár a jsou normalizovány hodnotou skaláru vycházející z výfuku jednoho automobilu. Ve středu ulice můžeme pozorovat značný rozdíl v koncentracích. Jednosměrný provoz vytváří nižší hodnoty koncentrací než obousměrný. Větší rychlost větru přispívá také k celkově nižším hodnotám koncentrací znečišťujících látek.



Obr. 5.4 Normalizované koncentrace imisí po výšce uličního kaňonu

## 5.2 Modelová křižovatka

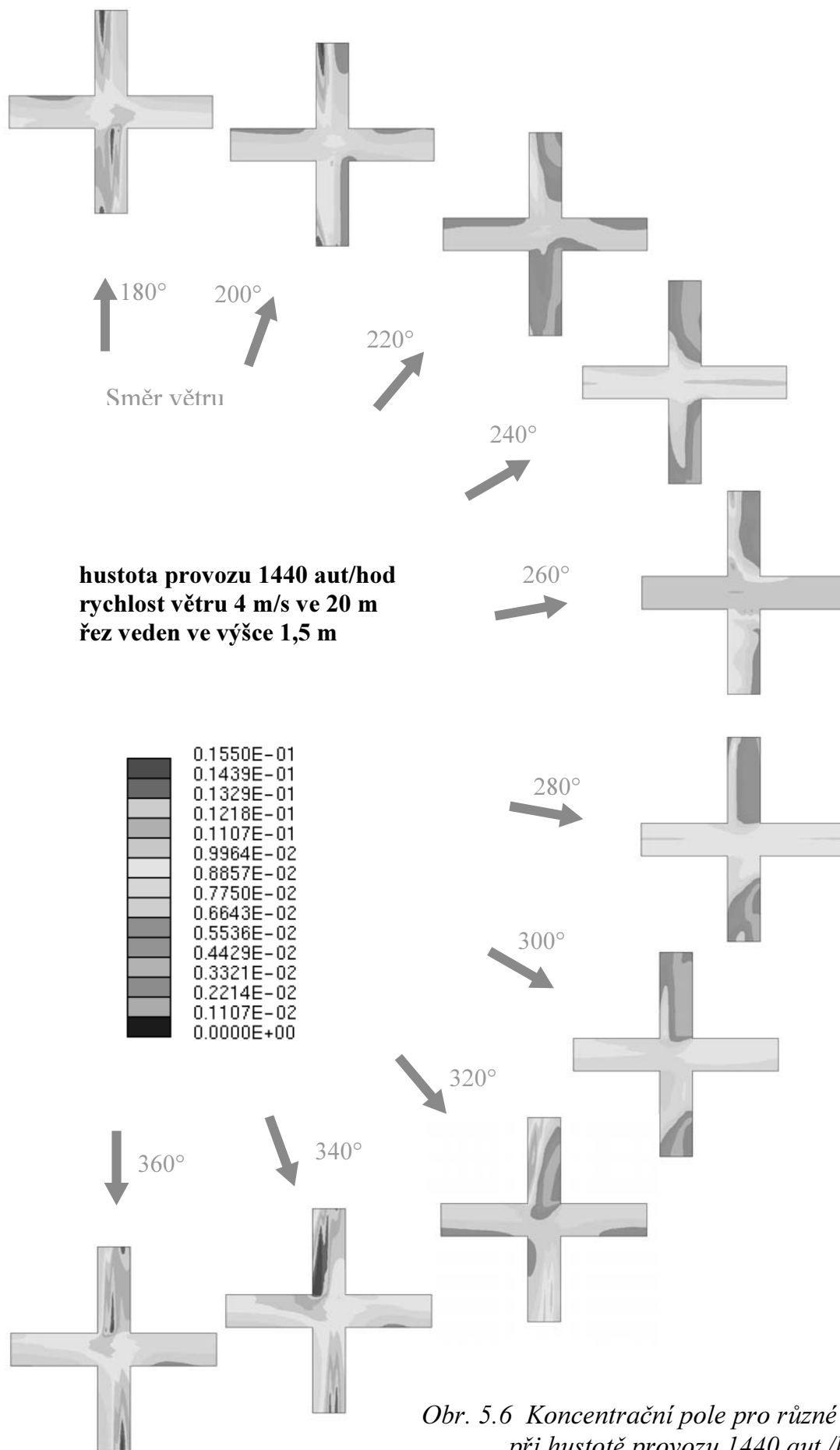
Dalším sledovaným prvkem je modelová křižovatka tvořená kolmým průnikem dvou jednoduchých uličních kaňonů. Takto získáme výřez ze sítě uličních kaňonů procházejících v pravidelných roztečích městskou zástavbou. Toto uspořádání je znázorněno na obr. 5.5.



Obr. 5.5 Oblast s pravidelnou sítí vzájemně kolmých uličních kaňonů a řešený výřez

Rozměry modelovaného výřezu jsou 120 x 120 x 115 m. Délka částí uličních kaňonů ústících do prostoru křižovatky je 50 m, šířka uličních kaňonů je 20 m a výška 15 m. Aby mohl modelovaný výřez reprezentovat co nejvěrněji část pravidelné pravoúhlé sítě uličních kaňonů, byla na boční stěny omezující modelovaný výřez přiřazena cyklická okrajová podmínka. Ta zajišťuje, že hodnoty všech veličin vzduchu na jedné straně modelovanou křižovatku opouštějící jsou na protilehlé straně modelu použity jako hodnoty veličin popisující vzduch do oblastí vstupující. Nad střechami budov byla do řešení zahrnuta vrstva vzduchu o výšce 100 m, která posloužila k vytvoření exponenciálního tvaru rychlostního profilu větru nad střechami budov. Ukázka získaných koncentračních polí pro hustotu provozu 1440 aut./hod./jízdni pruh je uvedena na obr. 5.6.

Z prezentovaných polí koncentrace znečišťující látky v prostoru křižovatky při působení různých směrů větru je patrné, že k nejlepšímu vymývání řešené křižovatky dochází, pokud je směr větru orientován v ose půlící úhel mezi rameny jednotlivých uličních kaňonů. Lépe vymývaný je uliční kaňon orientovaný kolmo na směr proudícího větru. Lepšímu vymývání přispívá příčné proudění v tomto kaňonu, které vynáší znečišťující látky do horní části uličního kaňonu a odtud odcházejí do vzduchu proudícího na střechami budov. V uličním kaňonu orientovaném ve směru proudícího větru nedochází k příčnému proudění, ale vlivem větru nad střechami budov dochází k intenzivnímu podélnému proudění ve směru působícího větru. Znečišťující látky produkované automobily nad vozovkou jsou unášeny uličním kaňonem a opouštějí oblast.



Obr. 5.6 Koncentrační pole pro různé směry větru při hustotě provozu 1440 aut./hod./pruh



Uliční kaňony orientované ve směru působícího větru jsou v rozsáhlé zástavbě charakterizovány vyššími koncentracemi znečišťujících látek, neboť podélný pohyb vzduchu v kaňonu nepodporuje výměnu znečištěného vzduchu za čerstvý a postupným průchodem zastavěnou oblastí dochází k zvyšování koncentrací znečišťujících látek.

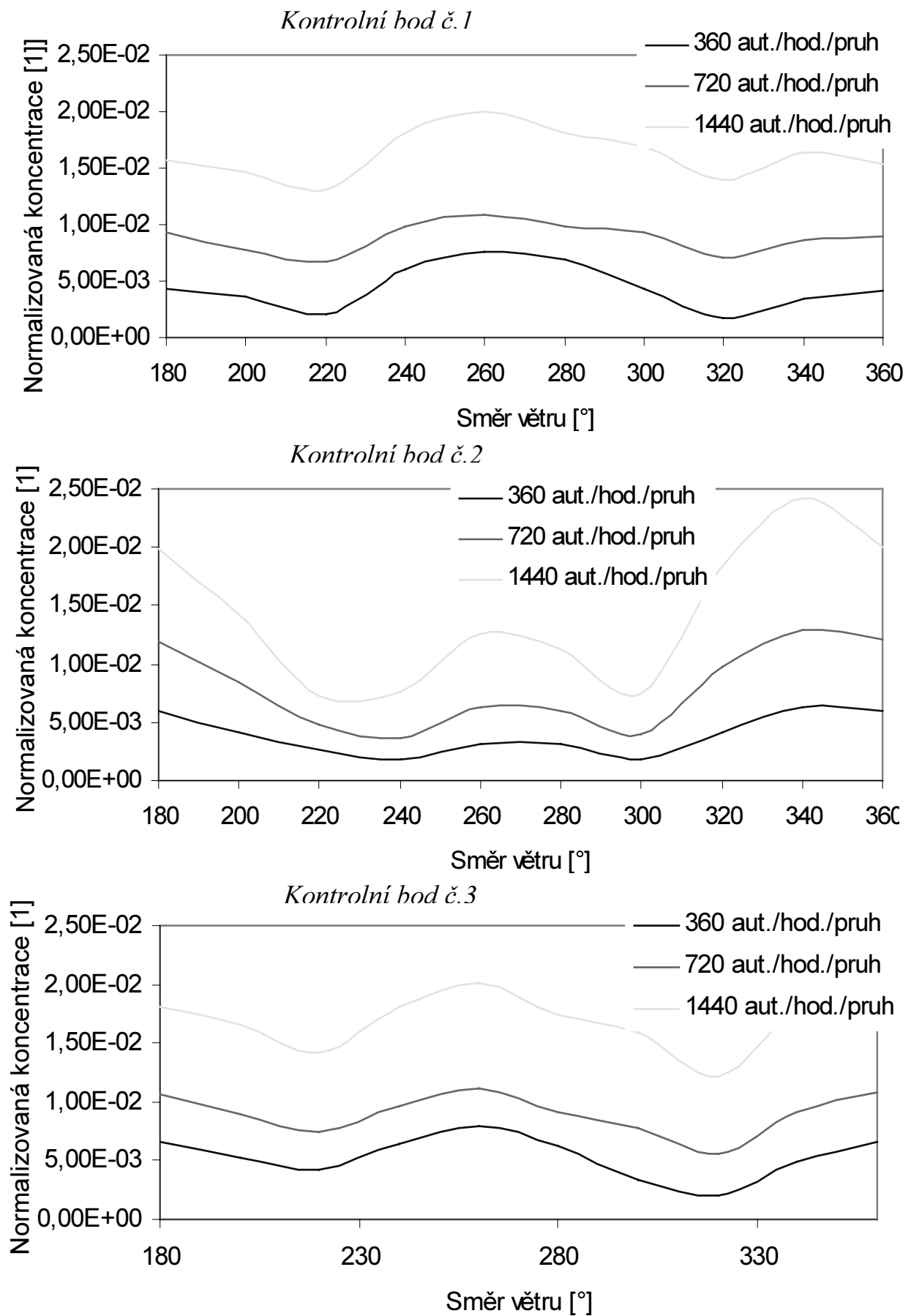
Nejvyšších koncentrací bylo dosaženo při působení větru ve směru ulice zaplněné stojícími automobily ( vertikální uliční kaňon ). V této ulici automobily vytvářejí frontu začínající na hranici křižovatky. Stojící automobil produkuje nižší množství znečišťujících látek odpovídající provozu motoru ve volnoběžném režimu. Automobily však stojí ve frontě v těsných roztečích a výsledná produkce emisí na délkovou jednotku uličního kaňonu dosahuje vyšší hodnoty než produkce emisí na délkovou jednotku od projíždějících automobilů. V ulici zaplněné stojícími automobily jsou současně horší podmínky pro rozptyl znečišťujících látek než v ulici ve které se automobily pohybují.

Uvedené výsledky odrážejí skutečnost, že model byl řešen jako výřez z nekonečné sítě uličních kaňonů. Z tohoto důvodu do oblasti nevstupuje vždy zcela čistý vzduch, ale vzduch znečištěný průchodem předcházejícími uličními kaňony. Na uvedených výsledcích je dobře patrné chování cyklických okrajových podmínek, které zajišťují na stranách řešené oblasti pravidlo - co z řešené oblasti na jedné straně vystupuje musí na protilehlé straně vstupovat.

Pro zpracování získaných výsledků byly vybrány tři charakteristické body, ve kterých byla sledována koncentrace znečišťující látky. Kontrolní bod č.1 byl umístěn v geometrickém středu křižovatky. Kontrolní bod č.2 byl umístěn uprostřed uličního kaňonu v místě, kde je vertikálně orientovaný uliční kaňon ukončen na svém spodním konci stěnou omezující řešenou oblast. Kontrolní bod č.3 se nacházel obdobně na pravém konci horizontálně orientovaného uličního kaňonu. Všechny tři kontrolní body jsou umístěny ve výšce 1,5 m nad vozovkou.

Hodnoty normalizovaných koncentrací znečišťujících látek byly odečteny v kontrolních bodech pro všechny vyšetřované směry větru a všechny sledované hustoty provozu. V obr. 10.11 je vyobrazena závislost normalizované koncentrace znečišťující látky na směru působícího větru v kontrolních bodech pro všechny řešené hustoty provozu.

Z grafů uvedených v obr. 5.7 je patrný téměř lineární nárůst koncentrací znečišťujících látek v závislosti na hustotě provozu v celém rozsahu sledovaných směrů větru. Minimálních koncentrací znečišťujících látek v kontrolních bodech č.1 a č.3 je dosaženo při směru větru  $220^\circ$  a  $320^\circ$ . Maximální koncentrace je dosaženo v těchto kontrolních bodech při působení větru ve směru  $260^\circ$ , který nejbližší odpovídá směru větru orientovaného shodně s ulicí projížděnou automobily. V kontrolním bodě č.2 jsou minimální koncentrace znečišťující látky dosahovány při směrech větru  $230^\circ$  a  $330^\circ$ . Maximální hodnota znečišťující látky je dosahována při směru větru  $340^\circ$ .



Obr. 5.7 Vypočtené koncentrace znečišťující látky v kontrolních bodech

### 5.3 Časově závislé řešení provozu v prostoru skutečné křižovatky

Řešení rozptylu emisí je možno provádět za předpokladu stacionárního nebo nestacionárního proudění. Stacionární přístup je jednoznačně určen pro případy, kde se rychlost jízdy a hustota provozu mění velmi pomalu nebo jsou změny tak malé, že je můžeme zanedbat. Typickým příkladem použití jsou dlouhé uliční kaňony bez dopravních vln.

Časově závislé úlohy jsou dalším přiblížením ke skutečnosti v oboru modelování rozptylu emisí. Prostory křižovatek řešené stacionárním přístupem poskytují zkreslené výsledky. Při střídavém režimu, který je na světelné křižovatce zcela pravidelný, dochází v okamžiku rozjezdů k mnohem větší produkci emisí a naopak při stání automobilů, kdy jsou motory provozovány ve volnoběžném režimu, dochází k minimální produkci znečišťujících látek. Zde je tedy na místě hovořit o krátkodobých maximálních a minimálních koncentracích. Jejich predikce je možná právě pouze s využitím časově závislé úlohy.

Před vlastním řešením časově závislé úlohy je nutno zpracovat zadávané parametry do vhodné podoby, tj. popsat je jako časově závislé. V případě rozptylu znečišťujících látek produkovaných dopravou jde především o vyjádření časové závislosti pro rychlost automobilů, produkci emisí, dodatečné zdroje turbulence a meteorologické podmínky.

#### Popis sledované lokality

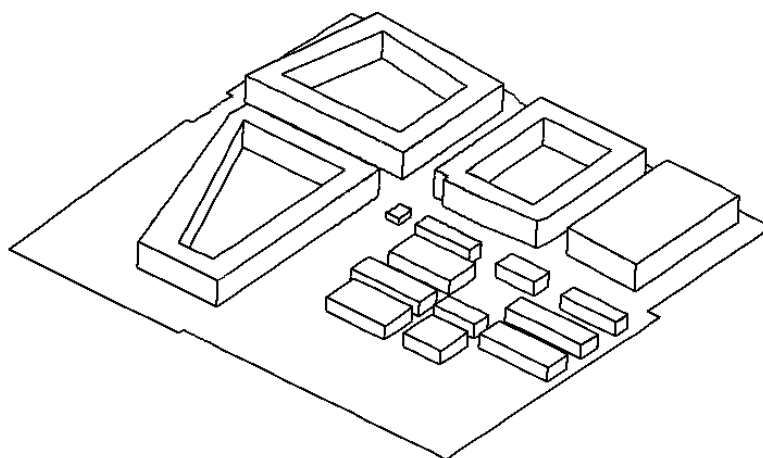
Zvolená křižovatka ulic Kotlářská/Kounicova se vyznačuje semaforem řízeným provozem a v její těsné blízkosti se nachází automatická monitorovací stanice zaznamenávající koncentrace znečišťujících látek. Provoz v křižovatce je řízen semaforem umístěnými na hraně křižovatky. Vozovka v ulici Kotlářská je široká 15,24 m a je rozdělena do čtyř jízdních pruhů, kde každý směr jízdy využívá dva pruhy. V ulici Kounicova je obousměrný provoz veden ve dvou pruzích a v blízkosti křižovatky je zaveden prostřední pruh sloužící k odbočení vlevo. Šířka vozovky v ulici Kounicova je 11 m. Tři kvadranty okolí křižovatky jsou zaplněny pětipatrovými vzájemně navazujícími budovami. Tyto budovy formují konečnou podobu uličního kaňonu. Poslední kvadrant je vyplněn jednopatrovými až čtyřpatrovými budovami různých tvarů. Tyto budovy vzájemně nenavazují, ale jsou rozmístěny v tomto kvadrantu tak, že jasně neomezují prostor uličního kaňonu. Semaforem řídí provoz v křižovatce v nerovnoměrném dopravním cyklu, kdy průjezd ulicí Kotlářskou je umožněn po dobu 55 s a průjezd ulicí Kounicovou je umožněn po dobu 45 s.

Měřicí kontejner využívaný k měření koncentrací znečišťujících látek byl umístěn v blízkosti hrany křižovatky v kvadrantu bez souvislé zástavby budov. Jeho vzdálenost od kraje vozovky v ulici Kotlářské byla 7 m a vzdálenost od okraje vozovky v ulici Kounicově 4 m. Odběr znečištěného vzduchu pro analýzu složení vzduchu byl prováděn ve výšce 3,5 m nad vozovkou.

Koncentrace  $\text{NO}_x$  byla v průběhu měření zaznamenávána v měřícím kontejneru každých 10s. Při následném vyhodnocování bylo zjištěno, že střídání výrazných lokálních maxim a minim koncentrace  $\text{NO}_x$  se opakuje s periodou odpovídající periodě přepínání světla na semaforech.

### Výpočty provedené na modelu skutečné křižovatky

Křižovatka Kotlářská / Kounicova byla zpracována pro potřeby výpočtu do podoby matematického modelu. Tento model zahrnuje kromě vlastního prostoru křižovatky také jistou část okolí. Celé území, které bylo zahrnuto do modelu, je vyobrazeno se znázorněnými konturami budov na obr. 5.8.

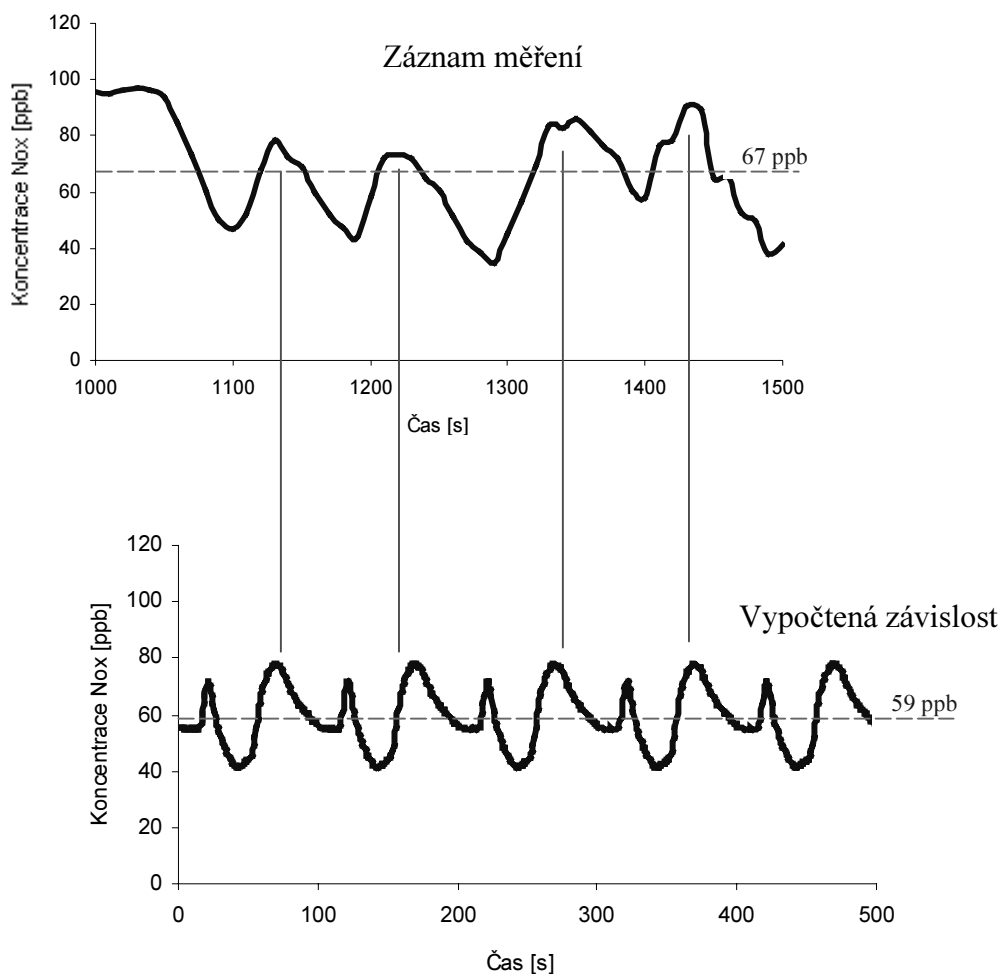


Obr. 5.8 Model řešené lokality – křižovatka Kotlářská/Kounicova

Část získané časové závislosti koncentrace  $\text{NO}_x$  z provedeného letního měření je uvedena na obr. 5.9 společně s hodnotami získanými výpočtem na matematickém modelu pro odpovídající situaci. Dynamika provozu je patrná na pravidelném kolísání naměřené hodnoty koncentrace. Střední hodnota koncentrace  $\text{NO}_x$  v průběhu měření je 67 ppb. Střední hodnota získaná z výpočtu je 59 ppb.

Pomocné červené čáry naznačují v obrázku polohu lokálních maxim koncentrace v průběhu měření. Perioda naměřených lokálních maxim odpovídá periodě lokálních maxim ve vypočtené závislosti. Periodou opakování je délka trvání dopravního cyklu v našem případě 100 s.

Střední hodnoty koncentrace  $\text{NO}_x$  jsou vyšší pro naměřené hodnoty než pro vypočtené hodnoty. Tato skutečnost je důsledkem působení okolních dopravních komunikací, které jsou dalšími zdroji znečištění a zvyšují celkové znečištění oblasti.



Obr. 5.9 Detail časové závislosti koncentrace  $NO_x$  získané měřením a výpočtem

Z porovnání měření a výpočtu koncentrace  $NO_x$  je možné formulovat následující závěry. Vyvinutá metoda řešení zahrnující dynamiku provozu a poskytující časově závislé koncentrace znečišťující látky je schopna postihnout chování automobilů v prostoru světelné křižovatky a odpovídajícím způsobem popisuje i časově závislou produkci znečišťujících látek produkovaných automobily. Metoda je vhodná pro řešení situací za stabilních meteorologických podmínek. (stejná rychlost větru, stejný směr větru). V těchto situacích je možné výsledné hodnoty koncentrací získat přičtením vypočtené hodnoty k měřené koncentraci pozadí. Situaci s proměnnými rychlostmi a směry větru je nutné převést na řešení několika variant, kdy v každé je řešen jeden konkrétní případ meteorologických podmínek. Konečný výsledek je potom získán přepočtem získaných hodnot pomocí četností výskytu jednotlivých meteorologických podmínek.

Maximální a minimální hodnoty koncentrací  $NO_x$  v realizovaných měřeních nejsou způsobeny dynamikou provozu, ale jsou výsledkem časově proměnného chování vzdušné hmoty. Možnosti postihnouti tohoto proměnného chování jsou v současné době značně omezené a prezentované řešení je nepostihuje.

## 6 ZÁVĚR

Cílem předložené práce bylo využít možností počítačového modelování pro řešení rozptylu znečišťujících látek z automobilové dopravy v městských oblastech „pod střechami budov“. K tomuto účelu byl využit dostupný softwarový balík Star CD.

Uveden je popis zahrnutí pohybu automobilů do matematického modelu. Použitý způsob navazuje na publikované práce. Interakci mezi jedoucím automobilem a okolním vzduchem zohledňuje ve dvou krocích. Jako první krok je zohledněno vzájemné silové působení vzduchu a automobilu, vycházející z působení aerodynamických sil. V druhém kroku je popis doplněn o zdroj kinetické energie turbulence, který zohledňuje intenzivní promíchávání vzduchu, ke kterému dochází za jedoucím automobilem. Znečišťující látka, jejíž rozptyl je sledován, je řešena jako pasivní skalární veličina, šířící se pod vlivem difúzních a advektivních mechanismů. Zdroj znečišťující látky je při řešení zadáván v místech vyústění výfukových potrubí automobilů.

Práce seznamuje s provedenými výpočty získanými za použití stacionárního přístupu. Stacionární přístup uvažuje stejnou hustotu provozu a rychlost provozu po velmi dlouhou dobu. Výpočty byly zaměřeny na sledování rozptylu znečišťujících látek při různých hustotách provozu, rychlostech jízdy, směrech a rychlostech větru. Pro tyto účely byly vybrány základní prvky městské zástavby, kterými jsou jednoduchý uliční kaňon a modelová křižovatka. Provedené výpočty ukázaly zákonitosti šíření znečišťujících látek. Z nejvýznamnějších poznatků je možné uvést pro uliční kaňon - nejvyšší koncentrace znečištění u závětrné stěny kaňonu a nižší emisní zatížení při jednosměrném provozu v porovnání s protisměrným provozem. Výsledky výpočtů provedených na matematickém modelu uličního kaňonu byly porovnány s experimentem provedeným v aerodynamickém tunelu. Modelová křižovatka poskytla informace o tvaru rychlostního pole při různých směrech větru. Nejlepšího vymývání celého prostoru křižovatky, řešené jako součást okolní zástavby, bylo dosaženo při směru větru blízkém s osou kvadrantů tvořících křižovatku.

Významnou část práce tvoří nově vyvinutý model pohybu automobilů v prostoru světelné křižovatky se zohledněním změny rychlosti automobilů při rozjezdech a zpomalování. Tento model byl použit při řešení prostoru modelové křižovatky a následně při řešení skutečné křižovatky v centru Brna. Výpočty reálné křižovatky byly porovnány s provedeným měřením. Je možno konstatovat, že metoda řešení zahrnující dynamiku provozu a poskytující časově závislé koncentrace znečišťující látky je schopna postihnout chování automobilů v prostoru světelné křižovatky a odpovídajícím způsobem popisuje i časově závislou produkci znečišťujících látek produkovaných automobily.

Využití metody kontrolních objemů je v současné době jedinou známou metodou, která umožňuje zahrnout do výpočtu vliv pohybu automobilů, který je rozhodující pro šíření znečišťujících látek hlavně v situacích s malou rychlostí větru. Schopnost řešit i časově závislé dopravní situace otvírá nové možnosti při posuzování vlivu dopravy na překračování krátkodobých imisních limitů.

## 7 SUMMARY

The aim of the author's PhD study was to develop a numerical procedure enable to include the impact of moving vehicles on turbulent flow and pollutant dispersion in urban areas. This goal was reached with utilizing of software Star CD. The submitted thesis represents a survey of the results obtained during the development of the task mentioned above.

Dispersion of pollutants originating from traffic is directly connected with the geometry of the urban area and traffic conditions. The urban area is mostly heavily built-up area and buildings and other obstacles may significantly influence local concentrations. Moving vehicles enhance both micro- and macro-mixing processes in their surrounding. Without taking account of traffic will lead to neglecting one of the most important phenomenon that influences mixing processes in the proximity of traffic paths. Influence of traffic is increasing namely in situation of very low wind speed.

The first area contains basic information from a field of traffic air pollution. The second area deals with interacting of moving cars and an ambient air. In first step we take into account influence of aerodynamic force. As it is known, moving vehicles induce a significant turbulence in surrounding areas. So second step implements the turbulence into model by using the additional source term. Air pollutants, coming from car exhaustive pipes, are solving as a passive scalar.

The third area describes results obtained from steady situations. Steady situation represents traffic with uniform traffic rate and uniform car speed. This situation is typical for very long street canyons without consider of car acceleration. A simple street canyon was used as basic for this study. Obtained results were compared with measurement in a wind tunnel. The difference between calculated and measured results is in range of 25% through the street canyon.

The street intersection is another considered component of an urban area. The intersection is formed with two street canyons intersecting perpendicularly. Each street has the same geometry. Different wind speeds, different traffic rates and different traffic conditions were considered. A real intersection was used for comparison of obtained results with measurement. This real intersection is located in center of Hanover.

The fourth area includes description of a developed model of moving cars in a traffic light controlled intersection. This model considers slowing-down and accelerating cars. Traffic dynamic was apply either in the model intersection or in the real intersection located in center of Brno. Obtained results were compared with a measurement.

The presented method is exploitable to prediction of pollutant concentrations in street intersections. The presented method is capable to provide a shot-term concentration of air pollutants. Inclusion of traffic dynamics leads to a better description of pollutant dispersion processes in an intersection, where peak values of concentrations are often located.

## 8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] J. Bubnik, J. Keder, J. Macoun, J. Maňák, *Metodická příručka pro výpočet znečištění ovzduší z bodových, plošných a liniových zdrojů*, MŽP, Praha, 1998
- [2] P. V. Nilsen, *The Selection of Turbulence Models for Prediction of Room Airflow*, Indoor Environmental Engineering, 1998, Paper no. 86
- [3] J. F. Sini, I. Calmet, J. M. Rosant, *Introduction of Dispersion at Street Canyon*, TRAPOS Kick-Off Meeting, Bruxelles, 1998
- [4] World Road Association, *Road Tunnels: Emission, Ventilation Environment*, LA DEFENSE Cedex, France 1995
- [5] P. Klein, J. F. Sini, E. Fedorovich, P. G. Mestayer, *Similarity concept for dispersion of car exhaust gases in street canyons tested against wind-tunnel and numerical model data*, Laboratory of Fluid Mechanics, Ecole Centrale de Nantes, France, 1998
- [6] J. Ehrhard, R. Kunz, N. Moussiopoulous, *On The Performance and Applicability of Nonlinear Two-Equation Turbulence Models for Urban Air Quality Modelling*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Urban Air Quality, Madrid, Spain, 1999
- [7] T. H. Shih, J. Zhu, J. L. Lumley, *A new Reynolds stress algebraic equation model*, Comput. Method Appl. Mech. Engrg 125, 287-302, 1994
- [8] P. Jonáš, O turbulenci, Inženýrská mechanika, 1998, roč. 5, č. 2, p. 89-106
- [9] J. Eichhorn, N. Beltz, O. Heil, A Microscale, *Dispersal Model for Road Traffic Related Pollution-Simulation and Measurements*, 4<sup>th</sup> Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Ostende, Belgium, 1996

## 9 AUTOROVY PUBLIKACE

- [A1] **J. Katolický, J. Pospíšil, M. Jícha**, Modelling of moving vehicles and their influence on the pollutant dispersion in a street canyon, *8<sup>th</sup> International Symposium Transport and Air Pollution*, Graz, Austria, 1999
- [A2] **J. Katolický, J. Pospíšil, M. Jícha**, Pollution dispersion in street canyon under traffic induced flow and turbulence, *2nd International Conference Urban Air Quality*, Madrid, Španělsko, 1999
- [A3] **J. Katolický, J. Pospíšil, M. Jícha**, Dispersion of pollution in street canyon under traffic induced flow and turbulence, *International Journal of Environmental monitoring and assessment*, č.65, s. 343-351, 2000
- [A4] **M. Jícha, J. Katolický, J. Pospíšil**, Dispersion of pollution in street canyon under traffic induced flow and turbulence, *Mezinárodní konference Kateder mechaniky tekutin a termodynamiky*, Praha, 1999



- [A5] **M. Jícha, J. Katolický, J. Pospíšil**, Dispersion of pollutants in street canyon and street intersection under traffic induced flow and turbulence using low-Re  $k-\epsilon$  model, *Sixth International Conference On Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purpose, Rouen, France, 1999*
- [A6] **J. Pospíšil, J. Katolický, M. Jícha**, Numerical modeling of wind and traffic impact on pollutants dispersion in vicinity of a city intersection, *Colloquium fluid dynamic 2000, 24.-25.2000, Praha, Česká Republika, 2000*
- [A7] **J. Pospíšil, J. Katolický, M. Jícha**, Dispersion of pollutants under traffic induced flow and turbulence in two street canyons forming an intersection, *Millenium NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and Its Application, Boulder, Colorado, USA, 2000*
- [A8] **M. Jícha, J. Katolický, J. Pospíšil**, Dispersion pollutants in street canyon and street intersection under traffic induced flow and turbulence using low-Re,  $k-\epsilon$  model, *Journal of Environment and pollution, bude publikováno v květnu 2002*
- [A9] **J. Pospíšil, J. Katolický, M. Jícha**, Traffic and its Impact on Urban Air Quality, *International Conference AESOP 2000, Brno, Česká Republika, 2000*
- [A10] **J. Pospíšil, J. Katolický, M. Jícha**, Modelování šíření emisí v městské zástavbě, *II. sborník příspěvků doktorandů FSI, Brno, Česká Republika, 2000*
- [A11] **J. Pospíšil, J. Katolický, M. Jícha**, Numerical Modeling of Wind and Traffic Impact on Pollutants Dispersion in Vicinity of City Intersection, *Colloquium Fluid Dynamics 2000, Praha, Česká Republika, 2000*
- [A12] **J. Katolický, J. Pospíšil, M. Jícha**, Predikce šíření exhalací z dopravy v oblasti mezi portály městských tunelů s uvažováním vlivu pohybujících se automobilů, *20. Mezinárodní konference kateder a ústavů mechaniky tekutin a termomechaniky, Kouty nad Desnou, pp. 81 – 84, 2001*
- [A13] **J. Katolický, J. Pospíšil, M. Jícha**, Predikce šíření exhalací z dopravy v oblasti horního portálu Pisárekého tunelu v Brně, *National Conference with International Participation ENGINEERING MECHANICS 2001, Svratka, Czech Republic, pp. 132 – 133, 2001*
- [A14] **J. Katolický, J. Pospíšil, M. Jícha**, CFD Prediction of Air Quality in the Area between Two City Road Tunnel Outlets Considering Moving Cars, *The Third International Conference on Urban Air Quality and Fifth Saturn Workshop, Greece, 2001*
- [A15] **J. Pospíšil, M. Jícha**, CFD modelling of dynamics of pollutants dispersion in city intersection and comparison with measurements, *Tenth International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution 2002, Segovia, Spain*

## 10 ŽIVOTOPIS AUTORA

**Narozen:** 23. února 1974 v Novém Městě na Moravě, okr. Žďár nad Sázavou

**Bydliště:** Nezvalova 6, Žďár nad Sázavou

### Vzdělání:

1987-1992 Střední průmyslová škola strojnická - Žďár nad Sázavou

1992-1995 Strojní fakulta VUT v Brně

1995-1997 Strojní fakulta VUT v Brně, Energetický ústav,  
Odbor tepelných a jaderných energetických zařízení

1997-2001 Interní doktorandské studium na Odboru termomechaniky  
a techniky prostředí

2001-nyní Asistent na Energetickém ústavu Fakulty strojního inženýrství  
VUT Brno

### Vědecká práce:

Výzkum v oblasti počítačového řešení problémů dynamiky tekutin se  
zaměřením na rozptyl znečišťujících látek.

Výzkum v oblasti energetického využívání biomasy.

### Výuka:

Základní kursy: cvičení Termomechanika

Specializace: cvičení Tepelné pochody, Zdroje a přeměna energie

### Jazykové znalosti:

Angličtina a ruština

### Účast na grantových projektech:

Podíl na řešení grantu EUROTRAC-2, Air Quality in Urban Areas OE32

Odpovědný řešitel grantu z fondu fakulty strojní - Modelování šíření emisí  
v blízkosti křižovatky ulic a vytvoření videozáznamu FP 390029, 2000