

## Večfazni tokovi v industriji in okolju

### Multiphase flows in industry and environment



Čisto ozračje je eden najpomembnejših dejavnikov, ki poleg ohranjanja zdravja vpliva tudi na počutje ljudi. Vsi vemo, da je pogled s hriba veliko lepši, ostrejši in seže dlje, če se na hrib povzpemo dan po močnem deževju. Za uspešen boj za čisto ozračje je razumevanje nastanka in razširjanja onesnaževal po ozračju ključnega pomena. Na žalost se izkaže, da je obnašanje onesnaževal v toku izredno pestro s široko paleto različnih režimov. Mnogokrat ni intuitivno in nas večkrat preseneti. Napovedovanje koncentracij onesnaževal v ozračju je zaradi tega velik izziv. *Clear air is one of the most important factors, which besides preserving health, affects the general well being of people. We are all aware that a view from a hill is crystal clear only on days after heavy rain. Understanding of the origin and expansion of pollutants in the atmosphere is of vital importance in the battle for clean environment. Unfortunately, it has been shown, that pollutant dispersion is a very complex process with a wide range of regimes. Many times it is not intuitive and can be surprising. This makes prediction of pollutant concentrations quite a challenge.*

V praksi in naravi se srečujemo z različnimi kombinacijami večstavnih in večfaznih tokov. Naletimo na kombinacije plina in kapljevine (mehurčki v kapljevini ali kapljice v plinu), plina in trdnine (trdni delci v zraku), kapljevine in trdnine (suspenzija trdnih delcev v kapljevini) in tudi na trofazne tokove (delci in kapljice v plinu). Obnašanje takšnih mešaníc snovi skušamo razumeti na dveh nivojih. Naprej na nivoju strojev in naprav, kjer bi z natančnim poznavanjem razmer v stroju radi izboljšali delovanje in zmanjšali izpuste v okolje. Na drugem nivoju pa poskušamo razumeti, kako se tokovi z onesnaževali obnašajo v okolju.

Večfazni tokovi so izrednega pomena v industriji. Cela vrsta naprav izkorišča lastnosti tokov za izvedbo procesov. Na primer - kar nekaj prehrambnih proizvodov pri procesu izdelave uporablja razpršilni sušilnik. Zmes tekočine in trdnih delcev razpršimo ob vstopu v sušilnik. Kapljice s trdnimi delci se osušijo ob stiku s sušilnim plinom, ki priteče v sušilnik tangencialno, tako da se v sušilniku ustvari velik vrtnec, ki poveča čas preleta delca skozi sušilnik in tako omogoči temeljitejšo sušenje. Tokovno polje v sušilniku je izredno kompleksno. Izogniti se želimo nalaganju suhe oziroma delno posušene snovi na stenah. Porazdelitev temperature je odvi-

zna od lokalne koncentracije snovi, kar lahko privede do neenakomernega sušenja.

Z ekološkega gledišča je odstranjevanje delcev in kapljic iz industrijskih izpustov izrednega pomena, saj je odstranjevanje onesnaženja na izvoru najbolj učinkovito. Poznamo več načinov in naprav za odstranjevanje onesnaževal iz večfaznih tokov. Če so delci, ki potujejo po zraku, dovolj veliki in imajo karakteristično dimenzijo preko 50 mikrometrov, lahko za odstranjevanje uporabimo posedalne komore. Takšni delci so dovolj veliki, da se v sprejemljivem času posedejo na dno komore. Pri manjših delcih je razmerje med silo teže in silami, s katerimi tekočina deluje na delce, manj v prid sili teže, zato se čas posedanja podaljša. V nekaterih primerih pride do pojava, ko vrtinci v toku posrkajo delce vase in jih ne izpustijo več. Zato za delce s karakteristično dimenzijo okoli pet mikrometrov uporabljamo ciklonski separator. Tok, onesnažen z delci, pripeljemo v komoro okroglega prereza, kjer se zavrtinči. Centrifugalne sile delce odnesejo proti stenam, kjer padejo proti dnu in se tam zberejo. Kljub temu, da je način delovanja takšnih naprav že dolgo znan, načrtovanje še vedno temelji predvsem na izkušnjah. Samo tokovno polje in mehanika potovanja delcev sta zelo zapletena. Zato je načrtovanje naprav za nestandardne kombinacije tokov in delcev zelo težavno.

Delci, ki nastajajo pri zgorevanju fosilnih goriv v elektrarnah, imajo premer okrog enega mikrometra. Za odstranjevanje takšnih delcev navadno uporabljamo elektrostatične precipitatorje. V tok vgradimo tanke žice in med njimi in stenami ustvarimo visoke napetosti. Te v toku, navadno zraka, ustvarijo nabite ione, ki zaradi Coulombovih sil potujejo proti stenam. Med potjo ionizirajo delce onesnaževala, ki nato potujejo proti stenam, kjer se naložijo. S periodičnim tresenjem sten delci padejo v zbiralne posode. Interakcije med delci in plinom vplivajo na koncentracijo delcev in s tem na električno polje. V tok je s pomočjo orebritev vnešena tudi turbulenca. Načrtovanje elektrostatičnih precipitatorjev je v veliki meri osnovano na empiričnih formulah prav zaradi kompleksnosti integracij med tekočino, delci in električnim poljem.

Pri obravnavi toka kapljevine ali plina, v katerem so razpršeni delci, ločimo več primerov. Če je delcev v toku malo in so majhni glede na dimenzije tokovnega polja, lahko govorimo o samo enostranskem vplivu toka na delce in o zanemarljivem povratnem vplivu delcev na tok. Tako na primer saje v izpuhu dizelskega avtomobila nimajo močnega vpliva na tok izpušnih plinov. Prav tako dvigovanje in razširjanje prahu iz odlagališč odpadkov nima skorajda nikakršnega vpliva na vetrove v okolici. Na drugi strani pa ima kamenje v toku blata zelo močan vpliv na sam tok.

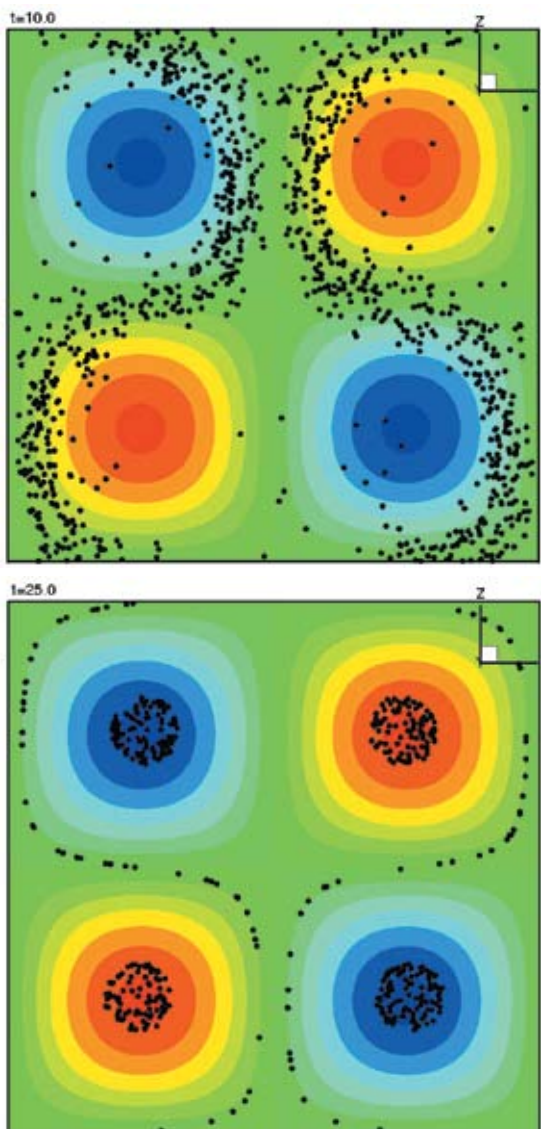
Oglejmo si najprej preprostejši primer. Zamislimo si majhen trden delec v zraku. Na njegovo gibanje najodločneje vpliva razmerje gostote delca in gostote tekočine. Če je delec gostejši od tekočine, je vzgon manjši od teže in delec v mirujoči tekočini pada. Če pa je delec redkejši od tekočine, se v mirujoči tekočini dviga. Poleg teže in vzgona na delec delujeta še sili upora in dinamičnega vzgona. Zaradi prve pri vetru v prsi težje kolesarimo, drugo pa pri letenju izkoriščajo letala. Upor je sorazmeren s čelno površino delca in s kvadratom hitrosti glede na tekočino. Zato delec, ki pada v tekočini najprej pospešuje, dokler ne doseže hitrosti, pri kateri se teža, vzgon in upor ne izenačijo. Tej hitrosti pravimo hitrost posedanja oziroma terminalna hitrost. Pomembna je pri načrtovanju posedalnih komor, saj določa zadrževalni čas delcev v komori, ki je potreben, da se le-ti posedejo. Tak preprost zapis upora velja samo za delce, pri katerih je razmerje med premerom, relativno hitrostjo in viskoznostjo tekočine manjše od števila ena. Viskoznost tekočine je tista snovna lastnost, ki pove, kako tekočina teče. Najbrž je povsem razumljivo, da se delci ne obnašajo enako v zraku, vodi, glicerinu ali medu. K sreči je pogoj za veljavnost preprostega zapisa upora v praksi mnogokrat izpolnjen. Na primer za desetmikronske delce v zraku je ta vrednost pod ena do relativne hitrosti 56 km/h. Ker je to relativna hitrost, torej razlika med hitrostjo vetra in hitrostjo delca, je ta približek za razširjanje delcev v atmosferi ustrezen. Pri večjih delcih, na primer pri letu žogice za golf, se tok okoli delca vrtinči, je časovno spremenljiv in močno odvisen od hitrosti in oblike delca. Zato je odvisnost upora od hitrosti bolj zapletena in včasih presenetljiva. Žogica za golf je posuta z majhnimi udrtinami zato, da se ji pri letu zmanjša upor. Enako velika žogica z gladko površino doseže pri enakem udarcu veliko manjšo razdaljo.

Zelo pomemben podatek pri obravnavi potovanja delca v toku tekočine je tudi razmerje med odzivnim časom delca in karakterističnim časom tekočine. Karakteristični čas tekočine pove, kako hitro se dogajajo spremembe v tokovnem polju. Če se veter vrtinči zdaj v eno zdaj v drugo smer, nam karakteristični čas pove, kako hitro se spremeni smer vetra. Odzivni čas delca pa pove, kako hitro se delec odzove na spremembe v tokovnem polju. Bolj učeno povedano, to je čas, ki ga potrebuje delec, da pospeši iz mirovanja do 63 % hitrosti tekočine. Odzivni čas 100-mikronske vodne kapljice v zraku je 30 milisekund. Odzivni časi so zelo močno odvisni od velikosti delcev. Torej, če veter spremeni smer vsako sekundo, mu bodo 100-mikronske vodne kapljice sledile, saj bodo imele dovolj časa za odziv na spremembo smeri, medtem ko bo žogica za golf le počasi spremenila smer leta zaradi spremenljivih vetrovnih razmer. Pri obravnavi mehurčkov v kapljevini se obravnava še dodatno zaplete, saj je potrebno upoštevati spremembo oblike in delo, ki ga opravi mehurček za

odrivanje tekočine.

Obravnava povratnega vpliva delcev na tok je v načelu preprosta, v praksi pa izredno težavna. Ker velja načelo akcije in reakcije, je sila, s katero tekočina deluje na delec točno nasprotna sili, s katero delec deluje na tekočino. Upoštevanje teh vplivov pri simulaciji toka, predvsem pri velikih količinah delcev, pa je zelo dolgotrajno.

Nekaj pozornosti velja nameniti tudi interakcijami med delci. Za mnoge primere tokov z onesnaževali velja, da so prostorninski deleži delcev zelo majhni in zato v povprečju ne pričakujemo velikega števila trkov. Pa vendar, mnogokrat v tokovnem polju naletimo na območja, kjer je tok močno upočasnen (na

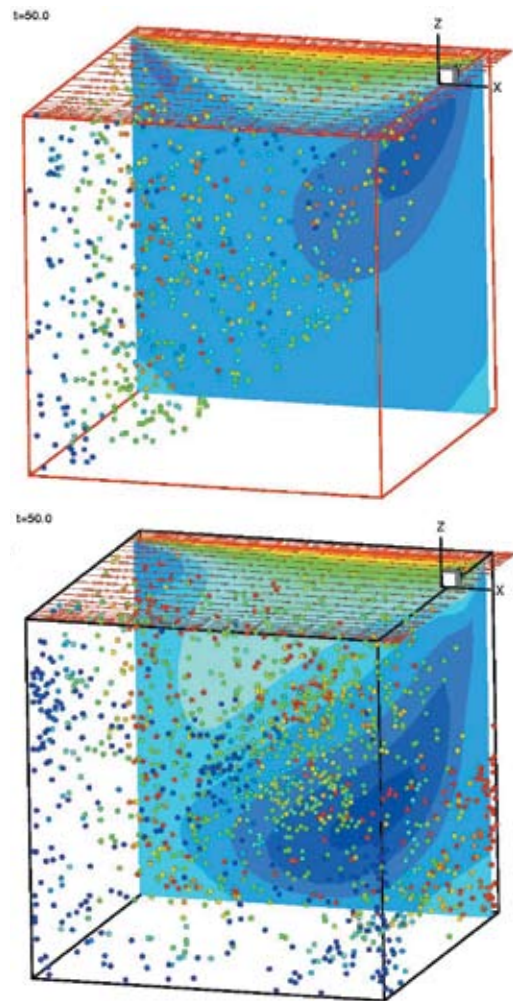


Slika 1: Sliki prikazujeta obnašanje delcev v vrtinčnem toku. Z modro barvo so označeni vrtinči, ki se vrtijo v smeri urinega kazalca, z rdečo pa v nasprotno smer vrteči vrtinči. Razlika v gostoti delcev na levi in desni je zelo majhna. Delci na desni so le malo redkejši od tekočine, delci na levi pa malo gostejši. Vidimo, da je obnašanje zelo različno. Delci na desni se izogonejo vrtincem in se posedejo na dno. V primeru na levi pa vrtinči ujamejo delce, kjer ostanejo suspendirani, vse dokler se tokovno polje v tekočini ne spremeni. Prikazani so rezultati lastnega orodja za simulacijo.

primer v recirkulacijskih območjih za ovirami ali v mejni plasti ob trdnih stenah) in se zato lokalno gostota delcev zviša in verjetnost za trke poveča. Navadno v takšnih primerih obravnavamo zgolj binarne interakcije med dvema delcema, trke več delcev hkrati pa zanemarimo. Prav tako je potrebno pravilno opisati interakcijo delcev s stenami. Sile med delci in med delci in stenami zaradi vlažnosti delcev, elektrostatskih nabojev in van der Waalsovih sil lahko igrajo pomembno vlogo in vplivajo na tok. Van der Waalsove sile nastanejo zaradi molekularne interakcije med trdnimi površinami in pri modeliranju interakcij jih je potrebno upoštevati. Za ilustracijo zapletenosti obnašanja delcev v toku si pogledimo obnašanje delcev malo različnih gostot v vrtinčnem toku. Na sliki 1 prikazujemo štiri vrtince v toku. Z modro so označeni deli tekočine, ki se vrtijo v smeri urinega kazalca, z rdečo v nasprotni smeri. Ko skozi takšen tok potujejo delci, ki so le malo gostejši od tekočine, se vrtincem izognejo in se posedejo proti dnu (levo tokovno polje na sliki), če pa so delci le malo gostejši od tekočine, jih vrtinci večinoma posrkajo vase, kjer ostanejo suspendirani. Takšen režim najdemo v naravi, ko plankton ostane suspendiran pod gladino morja in se ne posede in ne plava po površini.

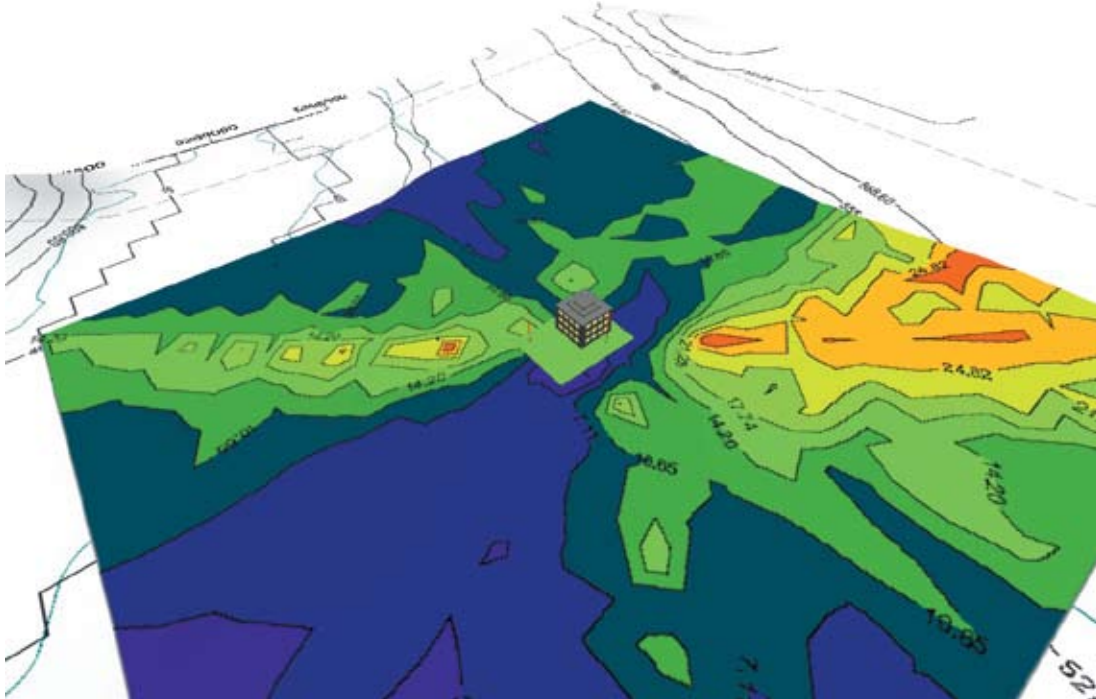
Kljub uporabi tehnologij za odstranjevanje onesnaževal pred izpustom v atmosfero do takšnih izpustov še prihaja. Zato je eno izmed pomembnih orodij ocenjevanja vplivov na okolje tudi matematično modeliranje razširjanja onesnaževal. V grobem poznamo dva načina simuliranja toka z vnešenimi delci. Na majhni prostorski in časovni skali, na primer v procesni napravi ali v izpuhu avtomobila, razrešimo tokovno polje do potankosti in iz njega ocenimo sile na vsak delec posebej ter z njihovo pomočjo sledimo delcem po toku. Takšen način je računsko zelo zahteven, saj v prvi fazi zahteva simulacijo turbulentnega toka tekočine, nato izračun sil na zelo veliko število delcev, njihov povratni vpliv na tekočino ter njihove premike po tekočini. Rezultati, ki jih dobimo, so zelo natančni in dajejo dober vpogled v dogajanje. Tak pristop uporabljamo predvsem za načrtovanje in optimiranje naprav. Kot primer smo si ogledali obnašanje delcev sadre v vrtincu v kotanji, preko katere piha veter. Veter v kotanji ustvari vrtinec in od hitrosti vetra preko kotanje je odvisno obnašanje delcev v njej. Na sliki 2 sta dva primera. V vrtinec smo vnesli desetmikronske delce sadre in opazovali hitrost posedanja. V šibkejšem vrtincu na levi sliki se delci mnogo hitreje izločijo iz vrtinca kot v močnejšem vrtincu na desni.

Za probleme na večji prostorski in časovni skali, kot je na primer posedanje delcev v okolici dimnika v obdobju nekaj let sta natančna simulacija toka in trajektorij delcev preveč zahtevna. Namesto tega uporabljamo meteorološke podatke o stanju vremena v okolici onesnaževalca, kot so pritisk, temperatura, smer in hitrost vetra v povezavi s t. i. disperzijskimi modeli za razširjanje onesnaževal.



Slika 2: Sliki prikazujeta položaje delcev sadre (gostota  $2280 \text{ kg/m}^3$ , premer deset mikronov) v vrtincu v kotanji. Vrtinec ustvarja veter, ki piha preko kotanje. Na desni sliki je hitrost vetra desetkrat hitrejša kot na levi. Ob začetku simulacije so bili delci enakomerno porazdeljeni po kotanji. Sčasoma vrtinec delce izvrže in ti se posedejo ob stenah. Barva delcev prikazuje položaj delca v smeri y. Modri so blizu sprednje stene, rdeči pa blizu zadnje stene. Rezultati kažejo, da se v šibkejšem vrtincu večina delcev posede, v močnejšem pa jih vrtinec večino izsesa iz kotanje. Prikazani so rezultati lastnega orodja za simulacijo.

Pri teh je osnova matematičnega modeliranja toka in odlaganja onesnaževal po zraku stacionarna Gaussova enačba. Uporabimo jo lahko z manjšimi spremembami za različne vire onesnaženja, tako točkovne (dimniki), površinske, prostorninske in odprte. Potrebujemo urne meteorološke podatke za določanje pogojev dvigovanja oblaka onesnaževal, transporta, difuzije in odlaganja. Model oceni koncentracijo in odlaganje za vsako točko v računski mreži za vsako uro meteoroloških podatkov in izračuna časovna povprečja. Ocenjuje mokro, suho in skupno odlaganje. Model omogoča tudi simulacijo prašenja onesnaževal iz odprtih kopov, kot so kamnolomi, odprti kopi premoga,



Slika 3: Na sliki so prikazane plastnice koncentracije  $\text{SO}_2$ . Vir onesaženja sta dva šestdeset metrov visoka dimnika, iz katerih bruhata 15 kubičnih metrov dimnih plinov na sekundo s temperaturo 450 K in s seboj nosi 1 g  $\text{SO}_2$ . S pomočjo meteoroloških podatkov za eno leto so bile izračunane koncentracije za vsako uro tega leta in iz njih triurna povprečja. Na sliki pa so prikazane najslabše (najvišje) triurne povprečne vrednosti v tem obdobju v mikrogramih na kubični meter. Prikazano so rezultati modela ISCST3.

odprti deli odlagališč sipkih materialov. Vsako vrsto onesnaževal obravnavamo posebej, prav tako simuliramo vsak velikostni razred delcev posebej. Na regionalni skali uporabljamo modele z boljšim opisom topografije, ki zahtevajo podrobnejše meteorološke informacije. Na sliki 3 je primer izračuna koncentracij  $\text{SO}_2$  v okolici poslopja in dveh dimnikov. Plastnice enakih koncentracij so podane v mikrogramih na kubični meter. Prikazujemo najvišje vrednosti triurnih povprečij v obdobju enega leta.

Poleg opisanih numeričnih postopkov za napovedovanje obnašanja tokov z onesnaževali uporabljamo tudi eksperimentalne metode. S pomočjo meritev dobimo popolno informacijo o lastnostih toka, velikosti, obliki, površini in gostoti delcev. Prav tako nas zanima koncentracija delcev v toku, masni pretok, hitrost premikanja in hitrost vrtenja delcev. Takšni podatki so dobra osnova za kasnejše numerične simulacije. Poznamo več merilnih tehnik. Merimo lahko na vzorcu, ki smo ga izločili iz toka ali kar in-situ v toku. Na vzorcih s pomočjo presejanja ali posedanja določamo velikosti delcev, s posebnimi načini vzorčevanja pa tudi koncentracijo. Metode direktnega merjenja v toku temeljijo na osnovi sipanja, loma in absorpcije laserske svetlobe. Tok z delci presvetlimo z lasersko svetlobo, odbito in sipano svetlobo pa posnamemo s hitro kamero. Z analizo več zaporednih posnetkov je mogoče izluščiti velikosti in smeri potovanja delcev v presvetljeni ravnini. Takšno merjenje je neinvazivno in ima praktično zanemarljiv vpliv na tok, rezultati pa omogočajo popoln vpogled v dogajanje.

Videli smo, da je obnašanje tokov, v katerih potujejo onesnaževala, zelo raznoliko. Simulacija takšnih pojavov je dvakrat težavna. Prvič zato, ker je ča-

sovni razvoj sistema zelo odvisen od vhodnih podatkov, torej od lastnosti tekočine in onesnaževal ter od tokovnih razmer. In drugič zato, ker je simulacija matematično gledano zelo zahtevna, tudi če bi razpolagali z dobrimi vhodnimi podatki. Kljub temu se danes zdi, da empirični obrazci izgubljajo veljavo pri načrtovanju in optimiranju naprav, v katerih teče večfazni tok. Nadomeščajo jih sodobnejše metode simuliranja procesov, ki temeljijo na poznavanju fizike pojava in na dobrem računskem algoritmu. Za simulacijo razširjanja onesnaževal po ozračju pa je uporaba disperzijskih modelov v kombinaciji z dobrimi meteorološkimi podatki že danes standardna.

#### Več informacij:

- Večfazni tok, fizika, numerične in eksperimentalne metode; C. Crowe, M. Sommerfeld, Y. Tsuji: *Multiphase flows with droplets and particles*, CRC Press, 1998.
- Disperzijski modeli; [http://www.epa.gov/scram001/dispersion\\_alt.htm](http://www.epa.gov/scram001/dispersion_alt.htm); 2008
- Uporabniški vmesniki za disperzijske modele; <http://www.lakes-environmental.com/>; 2008