

New suspect in the investigation into the cause of flash floods

Nový podezřelý ve vyšetřování příčiny bleskových povodní aneb jak jsme sto let řešili špatnou rovnici

Michal BÍL^{a, b}, Tomáš FÜRST^b, Rostislav VODÁK^b, J. PRAŽÁK^c, Miloslav ŠÍR^d, M. TESARŘ^d

^a Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., Krapkova 3, 77900 Olomouc, m.bil@seznam.cz

^b Univerzita Palackého, PřF, tř. 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc, rostislav.vodak@upol.cz, tomas.furst@seznam.cz

^c Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i., Dolejškova 1402/5, 182 00 Praha 8, prazak@it.cas.cz

^d Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i., Pod Paťankou 30/5, 166 12 Praha 6, tesarihas@iol.cz, milo_sir@yahoo.com

Abstract

The aim of this contribution is to introduce a new possibility of the description of unsaturated porous media flow. The approach presented here is entirely different from the traditional ways (e.g. the Richards' Equation). It will be explained why the traditional models often fail to describe various observed phenomena. The new approach provides certain interesting forecasts, among others a possible mechanism for flash-flood formation. The authors explain why they think that, under specific conditions, porous medium discharge may substantially exceed the infiltration due to rainfall.

Keywords: Richards' equation, vadose zone, flash floods, cellular automata, unsaturated porous media

Klíčová slova: Richardsova rovnice, vadózní zóna, bleskové povodně, celulární automaty, nenasyčené porézní prostředí

1. Úvod

Povodně jsou dlouhodobě v centru pozornosti veřejnosti, neboť obvykle způsobují značné materiální škody, často i oběti na životech. Jsou to především vydatné frontální srážky, které povodně často zapříčiní. Kauzální vztah mezi množstvím spadlé vody a velikostí průtoku na daném profilu je zřejmý a pozitivně korelovatelný, což platí zejména na velkých povodích. U těch malých (do plochy zhruba 10 km²) se vztahy mezi srážkami a průtokem jeví být méně těsné a více chaotické. Všeobecně se však má za to, že pro každé povodí existuje jistá kritická suma spadlých srážek, která vyvolá zvýšení hladiny vodních toků a tedy hrozbu povodní (Tromp-van Meerveld, McDonnell, 2006a,b). Hodnotami srážkových sum pod kritickým prahem se netřeba znepokojovat.

Položme si však otázku, zdali nemůže dojít k povodni, aniž by napršelo kritické množství vody, a jestli nemohou být zejména některé bleskové povodně způsobeny jiným mechanismem. Než odpovíme, udělejme odbočku k procesům infiltrace a pohybu vody v půdě, resp. ve vadózní zóně.

2. Proudění vody v porézním prostředí

Modelování pohybu vody v nenasyčeném porézním prostředí (PP) se již zhruba 80 let provádí pomocí Richardsovy rovnice (Richards, 1931), která v sobě obsahuje rovnici kontinuity a Darcy-Buckinghamův vztah, který byl původně odvozen a experimentálně prověřen jen pro nasycenou PP jako známý Darcyho zákon (Darcy, 1856).

Richardsova rovnice (RE) je hydrology hojně používána, přestože existuje problém získání přesných vstupních parametrů. Jde o závislost hydraulické vodivosti k na vlhkosti T a závislost maticového potenciálu h na vlhkosti T (nazývá se retenční křivka). Měření obou závislostí je nesnadné a není výjimkou, že se hodnoty k mění o několik řádů při změně vlhkosti z minima na maximum. Řešení je na k ovšem velmi citlivě závislé (Vogel et al., 1988). Navíc je otázka, je-li k vůbec dobře definovaná funkce. Z experimentů je známo (Pražák et al., 1992), že PP se může stát najednou (skokově) vodivým při malé změně vlhkosti. Hydraulická vodivost má tedy spíše charakter fázového přechodu než funkce.

Stejný problém s měřením nastává u retenční křivky, kde navíc číhá další zlomyslnost – hysterezní chování – kdy hodnota h pro dané T je pokaždé jiná podle toho, jestli dochází k zvlhčování nebo vysoušení. Místo jedné materiálové křivky bychom tedy museli znát nekonečně mnoho hysterezních větví této křivky.

Přes tyto problémy se RE stala standardním nástrojem pro řešení spektra hydrologických úloh. Běžně jsou k dispozici programy pro jednorozměrné až trojrozměrné řešení RE.

Souběžně se již několik desetiletí hromadí důkazy o (z pohledu RE) abnormálním chování vody při pohybu v nenasyceném PP, které je Richardsovou rovnicí nepředpověditelné. Jedná se především o vlhčení a sušení homogenních matic bez vlivu gravitace (Pražák et al., 1990), preferenční proudění v homogenních maticích za vlivu gravitace (Pražák et al., 1988), oscilační výtok při konstantní míře infiltrace (Pražák et al., 1992; Šír et al., 2000), gravitačně destabilizované



proudění (Nicholl et al., 1994), proudění v prstech (Steenhuis et al., 1996) a proudění v hydrofobních maticích (Dekker, Ritsema, 1996).

Největším problémem při modelování srážko-odtokového vztahu pomocí RE je skutečnost, že výpočtem podle RE se nezíská strmý nástup vzestupné větve hydrogramu odtoku, typický pro bleskové povodně. RE je totiž rovnicí tlumiče srážkových pulsů (srážkové pulsy přivedené na povrch půdy tlumí na pozvolný výtok z půdy do podloží) a nikoliv jejich zesilovače (Tesař et al., 2004). Tato vlastnost RE se v mnoha modelech obchází tak, že se model proudění v půdě doplní o model proudění ve větších pórech (Šimunek et al., 2003). Tím ovšem ještě vzroste počet obtížně měřitelných hydrofyzikálních vlastností.

Z laboratorních experimentů a z polního měření lze vyvodit, že mechanismem, který způsobuje rychlý výtok vody z půdy, je oscilační proudění v prstech (Pražák et al., 1992). Proudění v prstech se vyznačuje prostorovou nehomogenitou (vytváří se „prsty“) a časovou nemonotonií, kdy špička prstu bývá téměř nasycená a nechává za sebou podsyčenou stopu. V místě, kterým projede špička prstu, je vlhkostní pole (jako funkce času) nemonotónní – napřed vlhkost roste, potom klesá. Formou analytického matematického důkazu se podařilo dokázat (Fürst et al., 2009), že tato nemonotonie je v přímém rozporu s difusním charakterem RE. Tedy za žádných (fyzikálně relevantních) podmínek nemůže být řešením RE proudění v prstech, které je v přírodě často pozorováno. Tento náš výsledek nezávisí ani na hydraulické vodivosti, ani na konkrétním tvaru retenční křivky a dokonce ani na přítomnosti či typu hystereze retenční křivky.

3. Celulární automat

Lze tedy říct, že schopnost RE popisovat proudění v nenasyceném PP byla značně zpochybněna. Jako nový nástroj k popisu proudění v PP navrhujeme metodu celulárních automatů (CA). Modely založené na CA mají mnoho využití (model šíření požárů (Green et al., 1990), Isingovy modely magnetizace (Vichniac, 1984), modely sypkých materiálů (Baxter, Behringer, 1991; Rajechanbach et al., 1995), modely pohybu mravenců (Stewart, 1994), dopravní modely (Wolf et al., 1996)). Nejvýznamnějším úspěchem CA je však asi popis dynamiky proudění tekutin (Rothman, Zaleski, 1997), jenž představuje alternativu k Navier-Stokesovým rovnicím. Ačkoliv původní nadšení z CA modelů proudění poněkud opadlo, tento přístup si připsal mnohé úspěchy, například popis pohybu nemísitelných tekutin (Rothman, Keller, 1988), který v rámci mechaniky kontinua není rozumně dostupný. Je proto pozoruhodné, že neexistuje mnoho pokusů využít aparát CA pro popis proudění v PP. Jeden takový model, založený na úvahách

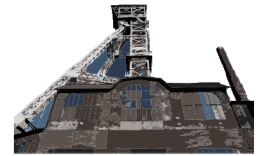
uvedených v člancích (Šír et al. 1996a, 1996b) představíme.

Předně je potřeba vymezit pojem celulárního automatu. CA rozumíme diskretní systém, typicky konečný počet buněk v prostoru či v rovině, z nichž každá nabývá v daném čase jeden z konečně mnoha stavů. Čas je také diskretizován, vývoj systému tedy probíhá v konečně mnoha časových krocích. V každém časovém kroku se stav každé buňky mění podle nějakého lokálního pravidla (závislého na stavu buněk v okolí). Toto pravidlo je typicky nezávislé na prostoru a čase a může obsahovat stochastickou část. Může též obsahovat rozhodovací mechanismus, což CA dává obrovskou vnitřní bohatost.

Je známo (Wolfram, 1984), že i velmi jednoduchá lokální pravidla mohou vést k neuvěřitelně bohatému chování celého systému, při němž se vynořuje (emergence) vysoce organizované chování (samoorganizace), které zdánlivě v původních jednoduchých lokálních pravidlech nebylo obsaženo. Tím se CA stávají atraktivní pro modelování fyzikálních, chemických či biologických systémů. CA tedy jsou alternativou ke klasickému popisu pomocí diferenciálních rovnic, u nichž komplikované nelineární efekty (např. turbulence, ...) představují spíše obtížně zvládnutelné matematické komplikace, než kýžený typ chování. Pokusili jsme se proto sestavit co nejjednodušší CA model proudění v nenasyceném PP, který by přesto vykazoval „reálné“ chování. Model je prozatím dvourozměrný z důvodů jeho jednoduchosti a snadné vizualizace výstupů.

Matrice sestává z dvourozměrné pravoúhlé sítě kapilár, každé kapiláře je přiřazeno kapilární číslo od jedné do deseti, které odpovídá průměru póru. Rozložení kapilárních čísel tedy modeluje typ matrice. Daný pór je buď prázdný nebo plný. Kapilární síly působí jen pórech, které jsou zaplněné vodou a sousedí s prázdným pórem (kapilární póry). Zaplněné póry, které sousedí jen se zaplněnými póry nazýváme nekapilárními. Ostatní póry jsou prázdné. Každý pór má čtyři sousedy. Skupina vzájemně propojených plných pórů se nazývá klastr.

Pokud je klastr vyšší než nějaká kritická hodnota (hydrostatický tlak v některém z jeho kapilárních pórů přesáhne limit), stává se (gravitačně) destabilizovaným a dává se do pohybu podle těchto pravidel: Prázdný pór v sousedství plného kapilárního póru se snaží vodu „nasát“ silou přímo úměrnou převrácené hodnotě svého kapilárního čísla (tedy nejtenčí póry sají nejvíc). Plný kapilární pór vodu drží silou přímo úměrnou převrácené hodnotě svého kapilárního čísla a přímo úměrnou hydrostatickému tlaku (tedy tlusté póry pouští vodu ochotněji). V jednom kroku vnitřního času CA se jeden pór nestabilního klastru vylíje (ten, který držel vodu nejmenší silou) a jeden napustí (ten, který nasával vodu největší silou). Algoritmus prochází nestabilní klastry od

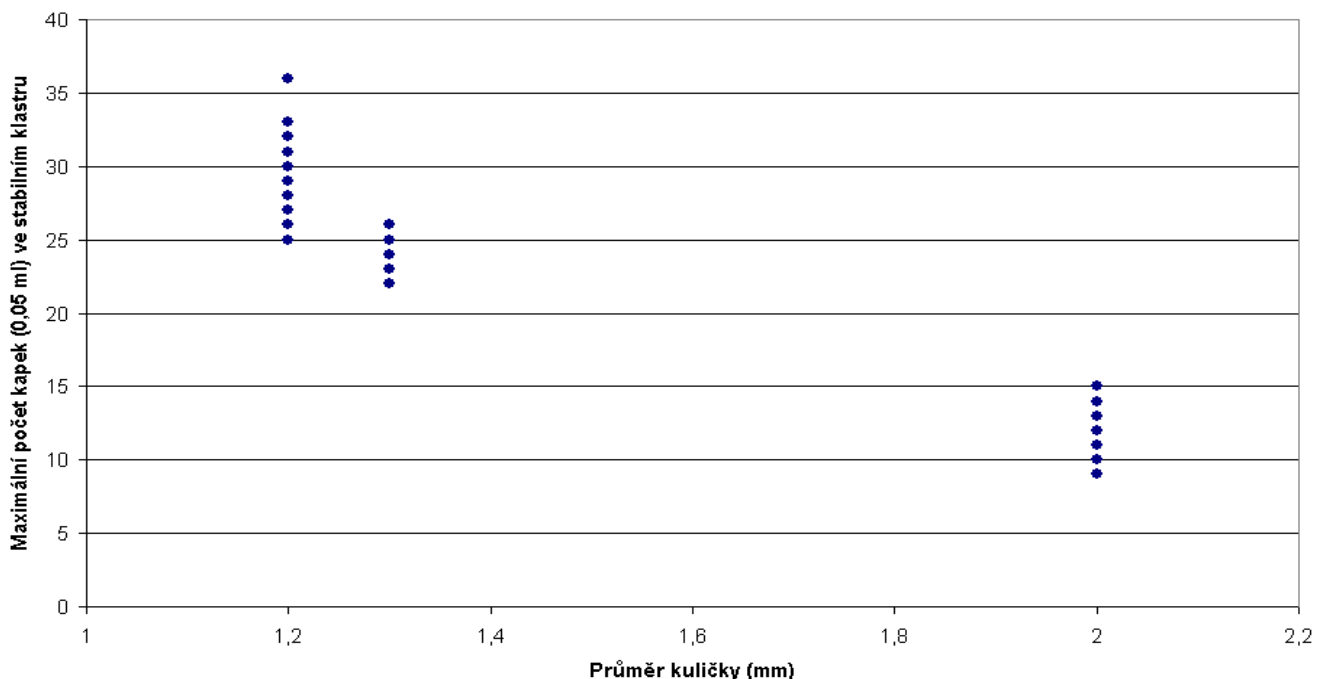


nejméně stabilního, ty se při pohybu různě trhají a slévají. Po ustálení vnitřní časová smyčka končí a následuje další krok vnějšího času (simulace deště). Systém má tedy dva časy: vnitřní (v něm se obsluhují nestabilní klastry) a vnější (dešť). Konstantní déšť je simulován tak, že v každém kroku vnějšího času je k jistému procentu horních pórů připsána jednotka vody.

4. Příklady nestability proudění v porézním prostředí

V prostředí CA modelu PP lze navodit podmínky, kdy se celý systém klastrů nachází blízko kritického stavu

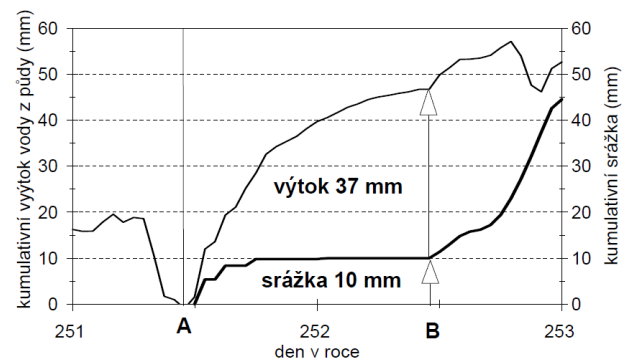
nerovnováhy. Klastry jsou vyvinuty až do maximální velikosti, která ještě může vzdorovat gravitaci. V této situaci si můžeme představit, že spadne relativně nepatrná srážka, která způsobí, z pohledu klasických srážko-odtokových modelů, nad očekávání velký výtok vody z půdní matrice. V laboratorních podmínkách v PP tvořeném stejně velkými skleněnými kuličkami se nám tento stav podařilo rovněž navodit (Obr. 1). Do kuliček jsme kapali byretou s dávkováním (0,05 ml) obarvenou vodu a sledovali počet kapek, kdy dojde destabilizaci klastru.



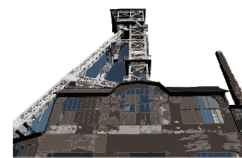
Obr. 1. Závislost objemu klastru před destabilizací na velikosti kuliček v testovací matrici. Body v grafu ukazují jednotlivé pokusy.

Proces možného vzniku bleskové povodně jsme také navodili na kuličkách o průměru 2 mm, které byly sevřeny mezi stěny z plexiskla. V přední stěně byly vyvrtány otvory kterými se do kuliček vstříkovala obarvená voda v množství, aby se vytvořily stabilní klastry. Do takto připravené matrice jsme shora opět kapali vodu. Po uvolnění nejvyššího klastru došlo k pohybu vody, která s sebou strhla klastry ležící níže.

Další důkazy existence tohoto jevu jsou z terénního pozorování vodního režimu půd na lokalitě Labská louka v Krkonoších (Obr. 2.), kde existuje záznam, o kterém můžeme prohlásit, že ukazuje vyprázdnění zásob vody v půdě, přestože stále prší. Napršelo zde 10 mm, ale vytekl objem odpovídající 47 mm, z toho bylo 10 mm srážky a 37 mm vody obsažené v půdě před srážkou (Tesař et al. 2007). Výsledkem tedy bylo, že vsak srážky způsobil zmenšení obsahu vody v půdě, tedy její vysušení.



Obr. 2.: Náhlý výtok 37 mm vody z půdy způsobený srážkou o úhrnu 10 mm ve dnech 8.9.–9.9. 2001 na lokalitě Labská louka v Krkonoších. Bod A je počátek epizody a bod B konec.



5. Diskuze

Nyní se vracíme k naší otázce položené v úvodu. Může dojít k povodni, aniž by napršelo kritické množství vody? Z modelu založeném na CA, experimentů a terénních měření je zřejmé, že tato možnost existuje.

Vzhledem k tomu, že se na mnoha malých povodích sleduje vztah mezi srážkami a odtokem, je pravděpodobné, že tento jev byl již někdy zaznamenán. Ve shodě s převládajícím přístupem, který vylučuje, aby déšť dané intenzity vyvolal odtok vyššího celkového objemu, však tento záznam mohl být označen jako chyba měření.

Pro další výzkum bude důležité, podaří-li se najít v časových řadách stanic „podezřelé údaje“, které zdánlivě nedávají smysl – tedy údaje, kdy srážky s malou intenzitou vyvolaly vyšší výtok vody.

6. Závěr

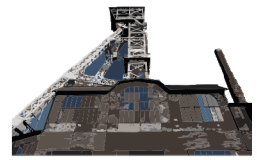
V příspěvku jsme ukázali, že hojně využívaný nástroj pro popis proudění vody v porézním prostředí – Richardsova rovnice – je v mnohdy nepoužitelný, neboť jeho možnosti jsou často v rozporu s pozorovanou realitou. Navrhujeme nový postup modelování pomocí celulárních automatů. Jednou z aplikací CA modelu může být také vysvětlení příčin některých bleskových povodní. Mechanismus vzniku extrémního výtoku vody z půdní matrice jsme ukázali na počítačových a laboratorních modelech.

Použité zdroje:

- BAXTER, G. W., BEHRINGER, R. P. 1991. Cellular automata models for the flow of granular materials. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 51, 1-3, 465-471.
- DARCY, H. 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Dalmont.
- DEKKER, L. W., Ritsema, C. J., 1996. Uneven moisture patterns in water repellent soils. *Geoderma*, 70, 87-99.
- FÜRST, T., VODÁK, R., ŠÍR, M., Bíl, M. 2009. On the incompatibility of Richards' equation and finger-like infiltration in unsaturated homogeneous porous media. *Water Resour. Res.*, 45, 3, W03408,
- GREEN, D., G., TRIDGELL, A., MALCOLM, A. G. 1990. Interactive simulation of bushfires in heterogeneous fuels. *Mathematical and Computer Modelling*, 13, 12, 57-66.
- NICHOLL, M. J., GLASS, R. J., WHEATCRAFT, S. W. 1994. Gravity-driven infiltration instability in

initially dry nonhorizontal fractures. *Water Resour. Res.*, 30, 2533-2546.

- PRAŽÁK, J., ŠÍR, M., KUBÍK, F., TYWONIAK, J., ZARCONE, C., 1992. Oscillation phenomena in gravity driven drainage. *Wat. Resources Res.*, 28, 1849-1855.
- PRAŽÁK, J., ŠÍR, M., KURÁŽ, V., ZARCONE, C., 1988. Microscopic aspects of the infiltration of rainwater into light-textured soil (In Czech). *Meliorace*, 24, 127-138.
- PRAŽÁK, J., TYWONIAK, J., PETERKA, F., ŠLONC, T. 1990. Description of transport of liquid in porous media – a study based on neutron radiography data. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 33(6), 1105-1120.
- RAJECHANBACH, J. CLEMENT, E., DURAN, J., MAZOZI, T. Experiments on bidimensional model of sand. In J. Vannimenius A. McKane, M. Droz, D. Wolf, (Eds.), *Scale Invariance and Non-equilibrium Dynamics*, 313-327. NATO ASI Series, Plenum Press, 1995.
- RICHARDS, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, 1, 318-333.
- ROTHMAN, D. H., ZALESKI, S. 1997. *Lattice Gas Automata. Simple Models of Complex Hydrodynamics*. Cambridge University Press.
- ROTHMAN, D. H., KELLER, J.: Immiscible cellular-automaton fluids. *J. Stat. Phys.* 52: 1119-1127, 1988.
- SIMUNEK, J., JARVIS, N. J., VAN GENUCHTEN, M. T., Gardenas, A. 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *J. of Hydrol.*, 272 (1/4), 14-35.
- STEENHUIS, T. S., RITSEMA, C. J., DEKKER, L. W., 1996. Introduction to special issue: Fingering flow in unsaturated soil: from nature to model. *Geoderma*, 70, 83-85.
- STEWART, I. 1994. The ultimate in anty-particle. *Scientific American*, 88-91.
- ŠÍR, M., TESAŘ, M., LICHNER, L., SYROVÁTKA, O., 2000. In-situ measurement of oscillation phenomena in gravity-driven drainage. *IHP-V, Technical Documents in Hydrology*, 37, 250-255.
- ŠÍR, M., KUBÍK, F., TESAŘ, M., PRAŽÁK, J., 1996a,b. Liquid transport in porous media – discontinuous phenomena. Part I: Theory. *J. Hydrol. Hydromech.*, 44(2-3), 81-90. Part II: Examples. *J. Hydrol. Hydromech.*, 44(4), 235-251.



- TESAŘ, M., ŠÍR, M., PRAŽÁK, J., LICHNER, L. 2004. Instability driven flow and runoff formation in a small catchment. *Geologica Acta*, 2(1), 147–156.
- TESAŘ, M., ŠÍR, M., VONDRKA, A. 2007. Detection of instability-driven flow in soils in the Krkonoše Mts. In: Čelková, A., Matejka, F. (eds) Proc. of Conf. 15th International Poster Day “Transport of Water, Chemicals and Energy in the System Soil – Crop Canopy – Atmosphere”. Bratislava. p. 684 – 689.
- TROMP-VAN MEERVELD, H. J., MCDONNELL, J. J. 2006a. Threshold relations in subsurface stormflow 1. A 147 storm analysis of the Panola hillslope. *Water Resour. Res.*, 42, W02410.
- TROMP-VAN MEERVELD, H. J., MCDONNELL, J. J. 2006b. Threshold relations in subsurface stormflow 2. The fill and spill hypothesis. *Water Resour. Res.*, Vol. 42, W02411.
- VICHNIAC, G. 1984. Simulating physics with cellular automata, *Physica D*, 10:96–115.
- VOGEL, T., ŠÍR, M., CÍSLEROVÁ, M. 1988. Citlivost numerického řešení Richardsovy rovnice na změny hydraulických charakteristik půdy. *Sborník – ÚVTIZ – Meliorace*, 24, č. 1.
- WOLF, D. E., SCHRECKENBERG, M., BACHEM, A. (Eds.): *Traffic and Granular Flow*, World Scientific, 1996.
- WOLFRAM, S. 1984. Universality and complexity in cellular automata. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 10, 1-2, 1984, 1-35.

Příspěvek vznikl za podpory projektu Grantové agentury České republiky č. 526/08/1016.

Adresy autorů:

Michal Bíl
Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
Krapkova 3
77900 Olomouc
m.bil@seznam.cz

Rostislav Vodák, Tomáš Füst
PřF, Univerzita Palackého
tř. 17. listopadu 12
771 46 Olomouc
rostislav.vodak@upol.cz, tomas.furst@seznam.cz

J. Pražák
Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.
Dolejškova 1402/5
182 00 Praha 8
prazak@it.cas.cz

M. Tesař, Miloslav Šír
Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i.
Pod Patankou 30/5
166 12 Praha 6
tesarihas@iol.cz, milo_sir@yahoo.com