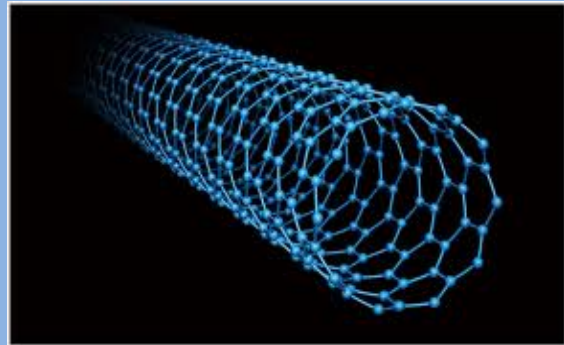


Hydrodynamika ve světě uhlíkových nanotrubic

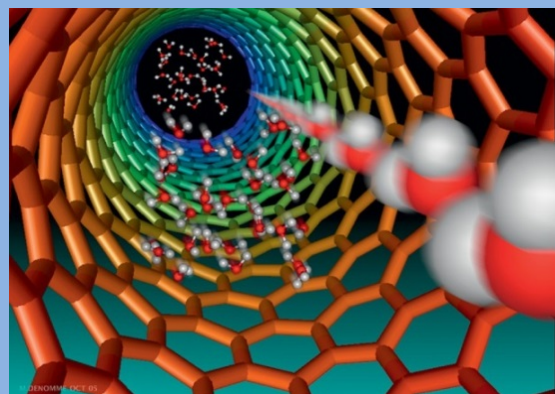
Hydrodynamika (etymologický původ slova vychází ze starořeckých slov *hydor*-voda a *dunamis*-síla, schopnost) studuje pohyb vody a obecně tekutin působením vnitřních a vnějších sil. K určení vazby pohybu a působících sil v určitém prostoru „obvyklých“ rozměrů slouží pohybové Navier-Stokesovy rovnice známé od počátku 19. století. Tyto rovnice se uplatňují i dnes při řešení širokého spektra vědeckých a inženýrských úkolů spojených např. s předpovědí počasí, toku oceánských proudů či návrhu tvaru letadel a automobilů. Nicméně konfrontace hydrodynamiky a Navier-Stokesových rovnic s prostředím uhlíkových nanotrubic s charakteristickými rozměry nanometrů nevyznívá pro klasickou hydrodynamiku příznivě. A není divu. Na počátku 19. století byly fundované myšlenky o atomové struktuře hmoty teprve ve stadiu formulace a zvláštnosti pohybu tekutin v prostředí, kdy je nutné vzít v úvahu pohyby jednotlivých molekul a interakci molekul s hranicemi toku, nebyly naléhavé. V dnešní době víme, že tekutiny se skládají z molekul, a tak jejich pohyb v prostředí se srovnatelnými rozměry jako je prostředí uhlíkových nanotrubic je nutné posuzovat na základě jiných a tedy molekulárních a atomových přístupů.

Uhlíkové nanotrubice jsou umělou strukturální formou uhlíku, kterou objevil roku 1991 Japonec Sumio Iijima a které sám uvedl jako materiál okem neviditelný, ale tvrdší než diamant a mnohokrát pevnější než ocel. Stěna uhlíkové nanotrubice je tvořena atomy uhlíku uskupenými do hexagonálních tvarů, kde každý atom (na obrázku 1 jako kulička) je kovalentně vázán k dalším třem atomům. Průměr trubice je v řádech nanometrů a délka podle výroby může být řádově až milimetry tj. milionkrát a více větší, než je průměr.



Obr.1 Ilustrace stěny uhlíkové nanotrubice tvořená atomy uhlíku uskupenými do hexagonálních tvarů meziatomovými kovalentními vazbami.
<http://www.tascnt.or.jp/en/project/characteristic.html>

Velikost molekuly vody je asi 0.3 nanometrů, což je jen o málo menší, než je průměr nanotrubic. Není tak divu, že charakter průtoku vody nanotrubicemi se liší od klasického průtoku v tom, že nanotrubicí prochází jednotlivé molekuly vody podobným způsobem, jak ho ukazuje ilustrativní představa na obrázku 2. O prošlém množství nerozhoduje viskozita vody, a tedy interakce molekul vody mezi sebou jako v klasické hydrodynamice, ale molekulová hmotnost a střední volná dráha molekul. Díky pohybu molekul téměř



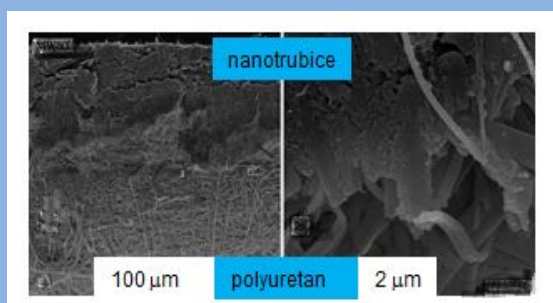
Obr. 2 Ilustrace toku molekul vody, znázorněných spojenými dvěma atomy vodíku a jednoho atomu kyslíku, uhlíkovou nanotrubicí.

http://cdn.phys.org/newman/gfx/news/2005/1-nano_f.jpg

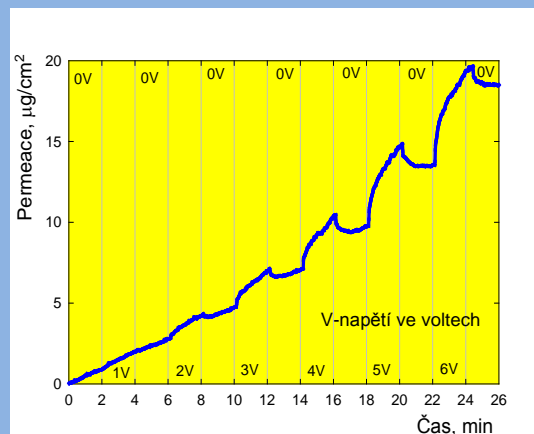
bez styku a tření s povrchem trubice je rychlost průtoku vody o tři až čtyři řády vyšší, než by určily klasické pohybové rovnice. Takže molekulární přístup popisující tekutinu jako soustavu interagujících částic je podmínkou, bez které nelze tok prostředím uhlíkových nanotrubic analyzovat v souladu s experimentálními poznatky.

Uhlíkové nanotrubice se v současnosti uplatňují jako zpevňující částice kompozitních materiálů, ale také jako součást teplotních, deformačních a plynových senzorů, termoelektrických článků a mnoha dalších zajímavých aplikací. Ve spojitosti s tekutinami jsou používány ve formě membrán např. k odsolování mořské vody. Nepolární povrch nanotrubic umožňuje průchod polárních molekul vody a zamezuje průchodu soli při mnohem nižším transmembránovém tlaku a tedy nižší energetické náročnosti oproti konvenčním membránám.

Uhlíkové nanotrubice jsou samozřejmě vodičem elektrického proudu. Tuto vlastnost lze vhodně využít k řízení (programování) permeace (prostupnosti) plynů a par membránami. Na obrázku 3 je ukázán řez takovou membránou sestávající z nanoporézní vrstvy uhlíkových nanotrubic a nosné netkané vrstvy polyuretanových vláken, která byla vyvinuta ve spolupráci s Centrem polymerních materiálů Univerzity T. Bati ve Zlíně.



Obr. 3 Řez elektrovodivou membránou sestávající z vrstvy uhlíkových nanotrubic (horní polovina elektronového mikroskopu) a vrstvy netkaných polyuretanových vláken.



Obr.4 Postupný vzestup permeace metanolu membránou zvyšováním předpětí membrány.

Vložení stejnosměrného napětí se mění permeace plynu nebo páry membránou v závislosti na jejich interakci s elektrizovaným povrchem uhlíkových nanotrubic, odporu membrány a teplotě. Znázorněný časový průběh permeace par metanolu membránou na obrázku 4, jejíž napětí v jednotkách voltů se postupně zvyšuje ve dvouminutových intervalech, ukazuje názorně možnosti elektricky programovatelných membrán jak zvýšit permeaci, případně selekci vůči jednotlivým složkám ve směsi pronikajících plynů či par. Při postupném zvyšování napětí se zvyšuje rychlost permeace. Při vypnutí proudu naopak permeace výrazně klesá nebo se po určitý čas zastavuje. Tento pozoruhodný jev ukazuje jednu z užitečných možností, jaké uhlíkové nanotrubice ve spojení s tokem tekutiny pro průmyslové aplikace přinášejí.

Specifikum spojení hydrodynamiky a uhlíkových nanotrubic však nenabízí jen uvedený příklad programovatelných membrán. Spojení je neméně důležité pro vývoj nanofluidik, tj. technologií, které jsou řízeny interakcí molekul s povrchem nanotrubic a jsou používány např. k analýzám buněk, oddělování molekul, vytváření tzv. laboroří na čípech a podobných tokových uspořádání.

Ing. Pavel Říha, CSc.
Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i.