

Úloha V.P ... vycákaná

5 bodů; průměr 1,88; řešilo 25 studentů

Bylo by možné plavat v bazénu, kdyby se voda v něm chovala jako dokonale nestlačitelná kapalina, jejíž viskozita se limitně blíží nule? Jak by se pohyb plavce odlišoval od plavání v běžné vodě? Co by se dělo s energií soustavy plavec a bazén v případě, že voda z bazénu může vytékat přes okraj? Na počátku je hladina vody zarovnaná s okrajem.

Fyzikální chemik plave.

Na úvod je nutno podotknout, že situace popsaná v zadání je nefyzikální. Neznáme totiž žádný postup, jak snížit viskozitu kapaliny bez změny jejích ostatních vlastností. Konkrétně v případě vody neznáme žádný její stav, který by vykazoval limitně nulovou viskozitu. Navíc látky, které takového vlastnosti vykazují (supratekutiny), je získávají díky jejich zvláštnímu charakteru na kvantové úrovni, s kterýmiž mají další atributy neslučitelné s použitím v plaveckém bazénu (Onnesův efekt, nízká teplota a vysoká tepelná vodivost). Navíc bez popisu mechanismu získání nízké viskozity nejme schopni předpovědět změny dalších vlastností vody, jako je povrchové napětí, hustota, hranice fázových přechodů či tepelná vodivost. Pokusíme se tedy popsat systém s vodou, která všemi svými vlastnostmi odpovídá standardní vodě, pouze její viskozita se bude limitně blížit nule. Narazíme-li na nekonzistenci popisu, tak víme, že je způsobena nefyzikálností našeho modelu.

Nejprve analyzujeme přeměny energie při plavání v bazénu s běžnou vodou. Lidské tělo můžeme považovat za stroj, který přeměňuje chemickou energii na mechanickou (a tepelnou). Technika plaveckých stylů je taková, aby lidské tělo získávalo hybnost v určitém směru, a to pomocí mechanické interakce s vodou. Získává-li tedy tělo hybnost v jednom směru, musí během tohoto procesu udělovat vodě hybnost opačnou (opačného směru). „Bloky“ vody, kterým byla plavcem udělena hybnost a s tím i kinetická energie, jsou zpomalovány svým okolím, a dochází k disipaci energie. Postupně dochází k přeměně kinetické energie translační na méně uspořádané formy, konkrétně chaotické vlnění a teplo.¹ Jak a kde energie opouští systém plavec-voda? V první řadě dochází k tepelné výměně. Pochody v lidském těle a tření ve vodě a na stěnách vyprodukuje teplo, které se ultimátně předá okolí. Další ztráty budou způsobeny interakcí se vzduchem. Jak pohybující plavec, tak vzniknuvší vlny jsou tlumeny odporem vzduchu, což je další způsob předávání energie ze systému. Dále se vybuzené vlny dostávají na okraj bazénu a část objemu nad okrajem se vylije. Nachází-li se plavec blíže kraji tak, že proudy vyprodukované jeho pohybem dorazí k okraji bazénu s nezanedbatelnou hybností, může se stát, že „odrazem“ od stěny bazénu bude určité množství vody vyneseno nad okraj, což způsobí další výlev.

Nyní se zamysleme, v čem bude neviskózní voda jiná. Není pravda, že po anulaci viskozity na pohybující se tělesa v kapalině nepůsobí žádné odporové síly (viz D'Alembertovo paradoxon). Nulové budou pouze síly, které lze označit jako vazké, totiž síly způsobené „třením“ a „soudržností“ mezi vrstvami kapaliny – viskozitou. Na tělesa budou i nadále působit síly označitelné jako „setrvačné“, síly způsobené předáváním hybnosti částicím tekutiny. Po bližším pohledu zjistíme, že principiálně se liší (v ohledech zmíněných v předchozím odstavci) pouze absencí disipace energie. Zatímco v běžné vodě proudy a víry postupně slábnou a mechanická energie vody se blíží počáteční hladině, v našem případě bude pouze docházet k tvorbě a přetváření vírů, které budou sice mizet, ale pouze velmi pomalu.

Než se pokusíme alespoň kvalitativně popsat chování energie systému, je třeba si ujasnit náš technický model bazénu – jestli se do něj voda průběžně dopouští či nikoliv. V prvním případě

¹Nebude-li plavec plavat na hladině (nýbrž pod hladinou), bude zvlnění hladiny výrazně menší.

bude bazén pln vírů už z počátku a hladina vody by se dlouhodobě vůbec nezměnila. Popisujme druhý případ. Dále uvažujme pouze, jak se bude měnit mechanická energie soustavy plavec-bazén (chemickou energii lidského těla a tepelnou energii budeme zanedbávat). Na počátku je plavec v bazénu v klidu, voda je v klidu a vodorovná rovinná hladina dosahuje přesně po okraj bazénu. Plavec začne plavat a z počátku energie soustavy poroste. Plavec brzy dosáhne své maximální rychlosti (viz dále), a poté energie soustavy poroste krátký čas lineárně (do té doby růst lineární nebyl, protože efektivita plavce jako stroje je závislá na rychlosti). Toto však bude porušeno zanedlouho – totiž ve chvíli, kdy vzruchy od plavce dorazí k okraji a začne docházet k výlevu. Všechna voda, která se vylije, s sebou ze systému vynese nějakou mechanickou energii. Tento jev zbrzdí růst energie systému. Vzhledem k tomu, že v porovnání se ztrátami následkem odporu vzduchu budou tyto ztráty velké (po relevantní dobu), má význam zabývat se těmito ztrátami více. Obecně lze očekávat, že energetické ztráty způsobené výlevem budou tím větší, čím větší bude kinetická energie vody, a tím menší, čím bude rovnovážná výška hladiny níže (tzn. čím více vody už se vylilo). Abychom tedy mohli lépe popsat míru disipace tímto způsobem, musíme prozkoumat, jak se bude chovat kinetická energie vody v závislosti na čase. Toto je samozřejmě ovlivněno charakterem činnosti plavce.

Pokud plavec poplave pouze jeden bazén, tak lze předpokládat, že veškerá voda, se kterou plavec přišel do styku, nebyla ovlivněna vzdálenou historií plavby plavce, po dobu plavby bude energie růst (se zpomalujícím se růstem) a poté se bude snižovat nejprve rychleji (důsledkem výlevu), ale klesání bude postupně zpomalovat, časem již výlev nebude hrát roli a vzduch bude velice rychle systém obírat o energii.

Nyní předpokládejme, že se plavec vždy po dokončení bazénu ve vodě otočí a poplave zpět. Nyní ale již rychlostní pole vody před plavcem bude ovlivněno předchozími plavbami. Bazén se totiž bude postupně plnit víry, které budou působit na plavce. Povahy vírů bude chaotická. Jak tato okolnost změní přesun energie od plavce do vody? To velice záleží na chování plavce. Pokud se bude pokoušet zachovat si původní rychlost (a má-li na to dost sil), bude vodě předávat více energie. V případě, že bude vydávat stále stejné úsilí, lze odhadnout, že přenos energie bude podobně velký jako v klidné vodě.

Pokud bude mít technika plavce laterální asymetrii (například bude lehce zatáčet doleva), postupně bude voda v bazénu získávat moment hybnosti a nakonec převládne jeden velký celobazénový vír.

Nyní se zaměříme na to, v čem bude neviskózní voda jiná pro plavce. Odhadneme-li Reynoldsovo číslo pro plavce (při vykonávání tempa), zjistíme, že se pohybujeme v řádech² 10^6 , což znamená, že při působení odporových sil prostředí „setrvačné“ síly výrazně převyšují síly vazké. Lze proto očekávat, že síly působící na plavce budou srovnatelné s běžnou vodou.³ Odporové síly budou ovšem trochu menší (při stejných rychlostech), než ty v běžné vodě. Toto bude platit jak pro celkový hydrodynamický odpor plavce, tak na hydrodynamickou odporovou sílu, kterou plavec využívá při záběrech pro svoje urychlování. Maximální rychlost by tedy měla být obdobná a tělo plavce se bude chovat setrvačněji (bude se déle zrychlovat, zpomalovat, hůře manévrovat). Pro srovnání se můžeme podívat na experimenty, při kterých se člověk pokoušel

²Robert A. Freitas Jr., Nanomedicine, Volume I: Basic Capabilities, Landes Bioscience, Georgetown, TX, 1999

³Toto obecně neplatí. Uvažte například tenký disk paralelní s vektorem rychlosti. V neviskózní kapalině na něj bude působit síla velice malá (úměrná jeho tloušťce), zatímco vazký odpor i poměrně málo (avšak nenulové) vazké tekutiny bude výrazně větší. Nicméně pro případy těles tvarů částí lidského těla pro vodu tato situace nenastává. Pro srovnání uvažte poměry parametrů pádla a jeho odpor ve vodě při záběru s plochou kolmo či rovnoběžně ke směru pohybu. Části člověka jsou navíc mnohem méně „placaté“ než list pádla.

plavat ve viskózní kapalině.⁴ Zde menší změna velikosti a charakteru odporových sil ve výsledku plavce výrazně neovlivnila, což je v soulasu s naší úvahou o srovnání vody s limitně velmi viskózní vodou.

Lubomír Grund
grund@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence, navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

⁴Gettelfinger B., Cussler E. L., Am. Inst. Chem. Eng. J., (2004)