

Řešení vývoje nestabilit kapalného filmu s následným odtržením kapek

1. Aktuálnost tématu. Vznik a vývoj nestabilit kapalných filmů je dlouhodobě předmětem intenzivního výzkumu. Porozumět této problematice umožňuje rozpoznat procesy, které v kapalných filmech na reálných konstrukcích probíhají. Pokud jde o procesy nežádoucí, pak lze uvažovat o konstrukčních a technologických řešeních, pomocí nichž lze negativní důsledky těchto procesů omezit. *Téma disertační práce je tedy nepochybně aktuální.*

2. Splnění stanoveného cíle. Disertační práce je převážně rešeršního charakteru, což ovšem nikterak nesnižuje její smysluplnost. Existuje totiž značné množství teoretických i experimentálních výsledků. Sloučit, setřít a propojit tyto výsledky do jednoho celku a opatřit je jednotícím komentářem a řadou obrázků je značně netriviální úkol. Disertační práce však obsahuje rovněž původní výsledky, zejména návrh modelu predikce fluktuací smykového napětí a tlaku pomocí CFD simulací. Lze konstatovat, že *disertační práce splnila stanovený cíl.*

3. Postup řešení a konkrétní přínos doktoranda. Disertační práce je založena na teorii lineární stability. První dvě kapitoly se zabývají stabilitou tekutin obecně, zbývajících pět kapitol se pak věnuje stabilitě tenkého filmu tekutiny ovlivňované na svém povrchu proudícím plynem. Třetí kapitola popisuje nestability na tenkých kapalných filmech a čtvrtá je věnována používaným metodám řešení. Jedním ze závěrů uvedených v kapitole třetí je konstatování, že nestabilita tenkého filmu je rozhodujícím způsobem ovlivňována smykovým napětím na zvlněném rozhraní mezi tekutinou a plynem a tlakem na tomto rozhraní.

Těžiště disertační práce spočívá v následujících kapitolách pět a šest. V páté kapitole Ing. Knotek sestavil vzorce pro složky fluktuací komplexní amplitudy smykového napětí a tlaku na povrchu filmu (tj. veličin τ_{SR} a τ_{SI} pro reálnou a imaginární složku komplexní amplitudy smykového napětí a veličin P_{SR} a P_{SI} pro reálnou a imaginární složku amplitudy tlakových fluktuací), a to v závislosti na výšce plynné vrstvy H , na poměru λ/a vlnové délky λ a amplitudy a zvlněného povrchu filmu a na průměrné rychlosti proudícího plynu U_b . Východiskem pro sestavení těchto vzorců byla celá řada CFD simulací proudění v plynné vrstvě, odtud se získala smyková napětí a tlaky na zvlněné hranici, navrhl se tvar vzorců s neurčitými koeficienty pro složky amplitud smykového napětí a tlaku (tj. pro τ_{SR} , τ_{SI} , P_{SR} a P_{SI}) a koeficienty těchto návrhů se pak určily metodou nejmenších čtverců (díky speciální struktuře navržených vzorců šlo fakticky o lineární regresi).

Kapitola šestá se věnuje vzniku nestabilit. Složky fázové rychlosti se získávají řešením dvou nelineárních rovnic, které mezi svými koeficienty obsahují mimo jiné složky smykového napětí a tlaku (tj. τ_{SR} , τ_{SI} , P_{SR} a P_{SI}) na povrchu filmu, k jejichž určení se využijí vzorce založené na CFD simulacích. Fázová rychlost je pak použita pro výpočet oblasti stability, kritické rychlosti proudícího plynu, kritického Reynoldsova čísla a dalších

souvisejících charakteristik.

Sedmá kapitola shrnuje některé poznatky týkající se podmínek pro odtržení kapiček tekutiny z povrchu filmu.

Vlastní přínos disertace spatřuji především v návrhu algebraických vztahů pro složky komplexních amplitud smykového napětí a tlaku na povrchu filmu. Pro vymezený rozsah návrhových parametrů (H , λ/a , U_b) byla dosažena velmi dobrá shoda s experimentálními měřeními získanými z literárních zdrojů.

4. Význam pro praxi. Odvozené vzorce pro výpočet amplitud fluktuací smykového napětí a tlaku na povrchu filmu lze bezprostředně prakticky využít pro posouzení stability kapalného filmu. Souhrnné zpracování rozsáhlého souboru publikací věnovaných nestabilitám v kapalných filmech spolu s řadou názorných obrázků je nepochybným přínosem pro každého, kdo potřebuje do zmíněné problematiky hlouběji proniknout.

5. Formální úprava, jazyková úroveň. Disertační práce má 106 stran včetně příloh, obsahuje celou řadu obrázků, z nichž jen některé jsou převzaté, většinu však vytvořil Ing. Knotek sám. Formální úprava i jazyková úroveň je na velmi dobré úrovni.

6. Teze. Předložené teze splňují požadavky na ně kladené.

7. Připomínky, poznámky, dotazy.

1. Disertační práce shrnuje poznatky publikované v celé řadě článků a knih. Pojmy v nich používané jsou jejich autory často označovány rozdílně. To se bohužel občas projevilo i v textu disertace, kde jsou tytéž pojmy označeny různě. Namátkou uvádím: na straně 9 symboly h_G a H_G označují totéž.
2. Některé formulace nejsou dostatečně přesné a zbytečně ztěžují porozumění textu. Uvedu příklad. První věta odstavce 6.2.1 začíná takto: „*Za předpokladu lineárního profilu kapalného filmu ... smykové napětí na rozhraní lze aproximovat vztahem ... (6.6)*“. Z takto formulovaného textu není zřejmé, zda tento předpoklad přijímáme nebo zda to je jen jedna z dalších možností, které připadají v úvahu. Teprve o 5 stran později, v odstavci 6.4, se čtenář dozví, že „... rovnice modelu iniciace nestabilit vycházejí z integrálního tvaru pohybových rovnic *za předpokladu lineárního profilu kapalného filmu*“. Čtenáři by ušetřilo mnoho zbytečného přemýšlení, kdyby hned na začátku odstavce 6.2.1 bylo uvedeno: „V dalším *budeme předpokládat, že profil filmu je lineární*, tedy že platí (6.6)“. Tato zdánlivá maličkost neumožňuje při „lineárním čtení textu“ náležitě pochopit následující výklad uvedený v odstavcích 6.2 a 6.3.
3. Řada vztahů není explicitně odvozena a k jejich porozumění musí čtenář vyvinout nemalé úsilí. Tak třeba v popisu k obrázku 6.1 je zakreslena veličina U_{Gmax} v závislosti na u_s/h pro různé hodnoty bezrozměrné veličiny y^+ . Přitom závislost y^+ na u_s/h není bezprostředně zřejmá. A už vůbec není zřejmé, že vzorce pro U uvedené v obrázku 6.1 se mají dosadit do vzorce (6.8) a odtud pak závislost U_{Gmax} na u_s/h vyjádřit. U obrázku, který by měl čtenáři pojmy názorně přiblížit, je to obzvláště nepříjemné.
4. V disertaci se opakovaně používá pojem „vedoucí rovnice“, který je nevhodným překladem z angličtiny. Slovo „vedoucí“ bych doporučoval buďto úplně vynechat nebo

v krajním případě nahradit slovem „řídící“.

5. Přepisů v disertační práci není mnoho, ale najdou se, třeba chybně uvedené viskozita vzduchu ν_G v obrázcích 6.3 a 6.4.
6. V úvodu odstavce 5.2, kde se popisuje metoda výpočtu CFD simulací, chybí popis okrajových podmínek na dolní zvlněné stěně a horní přímé stěně výpočtové oblasti. Není také jasné, co se míní větou „Na vstupu do domény byl přitom na počátku simulace nastaven pístový rychlostní profil, z něhož se po konvergenci simulace vyvinul profil reálného tvaru“. Prosím o doplnění a vysvětlení.
7. V textu jsem také nenašel zmínku o tom, zda CFD simulace byly provedeny za předpokladu stlačitelnosti nebo nestlačitelnosti tekutiny. Prosím o upřesnění a zdůvodnění zvoleného přístupu.
8. Kapitola 5.3 obsahuje hlavní výsledky disertace spočívající v sestavení vzorců pro amplitudy fluktuací smykového napětí a tlaku (jde o τ_{SR} , τ_{SI} , P_{SR} a P_{SI}). Přitom výklad v odstavci 5.3.1, věnovaný využití výsledků CFD simulací, je odbyt větou „Algebraické modely příslušných složek P_{SR}^1 a P_{SR}^2 byly odvozeny užitím lineární regrese a empirického „fitování“ simulačních dat.“ K odvození vzorců dalších algebraických vztahů pro P_{SI}^1 , P_{SI}^2 , τ_{SR} a τ_{SI} se v disertaci uvádí jen to, že se postupuje podobně jako při odvození P_{SR}^1 a P_{SR}^2 . Prosím disertanta, aby konkrétně uvedl, jaké simulace provedl a jak z nich dospěl k příslušným vzorcům (5.15)–(5.18) a (5.21)–(5.22). Uveďte rovněž, jak jsou získány vztahy (6.9)–(6.12) pro τ_{SR} , τ_{SI} , P_{SR} a P_{SI} v kapitole šesté věnované iniciaci nestabilit. Jde o vzorce velmi podobné dříve uvedeným vzorcům (5.15)–(5.18) a (5.21)–(5.22), stejné však nejsou.
9. Z Orrovy-Sommerfeldovy rovnice

$$(U - c)(\phi'' - \alpha^2 \phi) - U''\phi = \frac{1}{i\alpha \text{Re}}(\phi'''' - 2\alpha^2 \phi'' + \alpha^4 \phi) \quad (1.36)$$

lze určit fluktuaci $v' = -i\alpha\phi(y) = \hat{v}(y)\exp(\alpha c_I t)\exp[i(\alpha x - \alpha c_R t)]$, kde fázová rychlost $c = c_R + ic_I$. Stabilní fluktuace dostáváme pro $c_I \leq 0$. Doplníme-li rovnici (1.36) čtyřmi homogenními okrajovými podmínkami pro neznámou funkci ϕ , dostáváme úlohu určit vlastní hodnoty c a odpovídající vlastní tvary ϕ . V disertaci jsou ale uvažovány také nehomogenní okrajové podmínky

$$\phi(0) = 0, \phi'(0) = -U'(0), \phi'(1) + \alpha\phi(1) = 0, \phi''(1) + \alpha\phi'(1) = 0. \quad (1.47\text{--}1.50)$$

Z Orrovy-Sommerfeldovy rovnice (1.36) doplněné okrajovými podmínkami (1.47)–(1.50) však pro $U'(0) \neq 0$ nelze fázovou rychlost c určit. Prosím o komentář.

Pokud jste při řešení úlohy (1.36) a (1.47)–(1.50) postupoval způsobem naznačeným na straně 18, jaké úloze odpovídají výsledky prezentované v obrázcích 1.12–1.17? Jak vysvětlíte, že Vámi spočtené vlastní hodnoty v tabulce 1.1 pro Poiseuilleovo proudění se shodují s výsledky uváděnými v literatuře a lze je tedy považovat za správné?

10. Jak jste řešil nelineární rovnice (6.3)–(6.5)? Nelineární rovnice mohou mít více řešení, jak tomu bylo v případě rovnic (6.3)–(6.5), nenarazil jste na nějaké komplikace?
 11. Problematika nestabilit tenkých kapalných filmů bude nepochybně i nadále předmětem intenzivního výzkumu. S nástupem stále výkonnějších CFD programů však lze očekávat, že k posuzování nestabilit se ve stále větší míře budou používat přímo CFD simulace bez zprostředkující role zjednodušených modelů. Jak byste obhájil užitečnost klasických přístupů posuzování nestabilit, mezi něž lze Vámi zvolený přístup zařadit?
8. *Závěr.* I přes uvedené výhrady považuji disertační práci za kvalitní a zdařilou. Po uspokojivém zodpovězení výše uvedených připomínek a dotazů 6–11 doporučuji, aby

Ing. Stanislavu Knotkovi byl udělen akademický titul PhD.

Brno, 14. srpna 2013

Doc. RNDr. Libor Čermák, CSc.