

Nestability stěnového kapalinného filmu

Úvod do problému

Ing. Stanislav Knotek

Školitel: prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.

VUT v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Energetický ústav
Odbor termomechaniky a techniky prostředí

5. říjen 2010

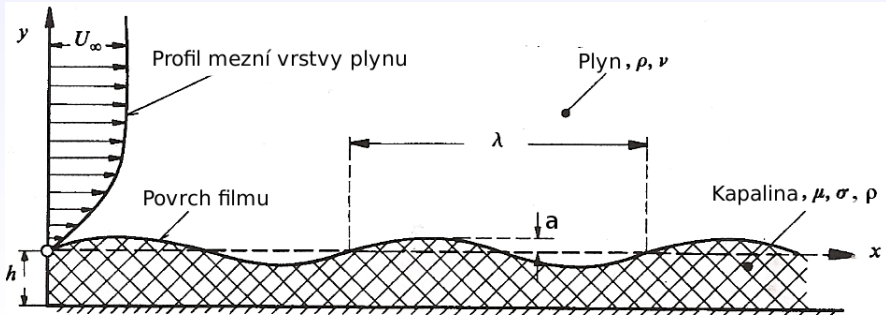
Obsah

- 1 Úvod
- 2 Experimentální poznatky
- 3 Základy analýzy nestabilit
- 4 Přístupy k řešení
- 5 Modely
- 6 Závěr

Schéma problému

Richard Feynman:

"[water waves] that are easily seen by everyone and which are usually used as an example of waves in elementary courses ... are the worst possible example ...; they have all the complications that waves can have."

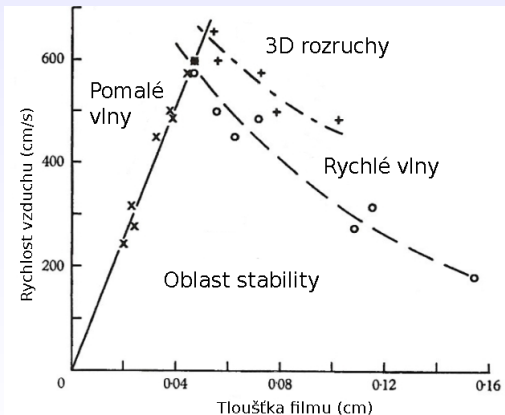


Cíle

- rozbor fenoménu stěnového kapalinového filmu a jeho nestabilit
- vyhodnocení působících vlivů
- sestavení a přehled
 - typů nestabilit
 - kritérií nestabilit
 - počítačových modelů a jejich řešení
- predikce
 - počátečních nestabilit
 - rozvojové fáze
 - odtržení fragmentů filmu

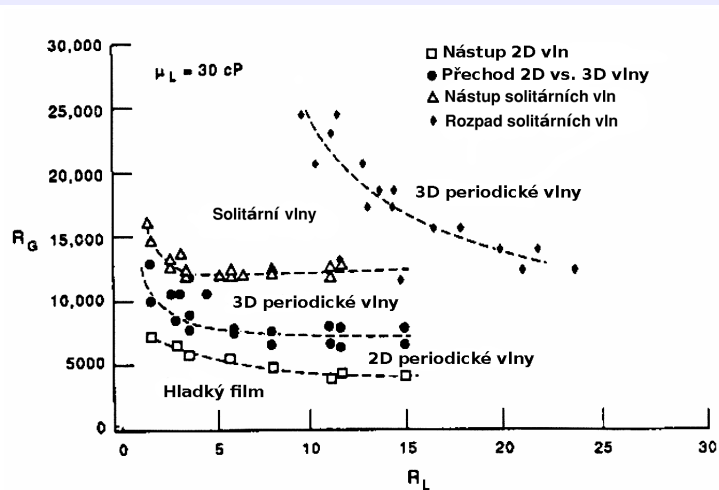
Vlny na tenkých kapalných filmech

Mapa režimu vln



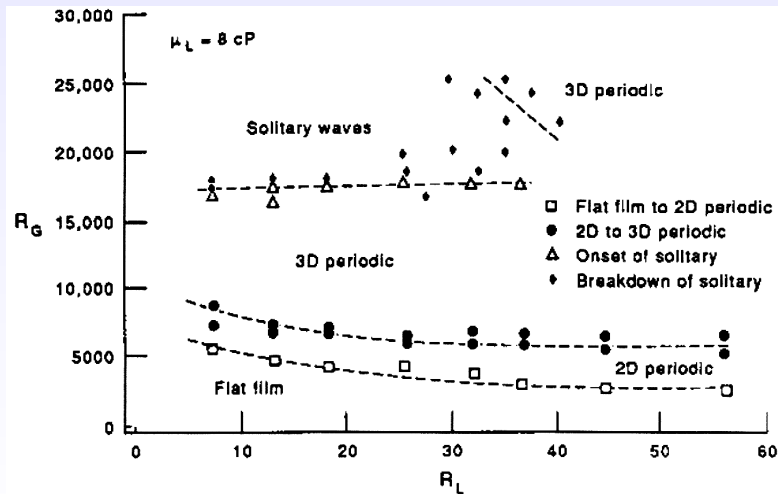
Craik, 1966

Vlny na tenkých kapalných filmech



Jurman & McCready, 1989

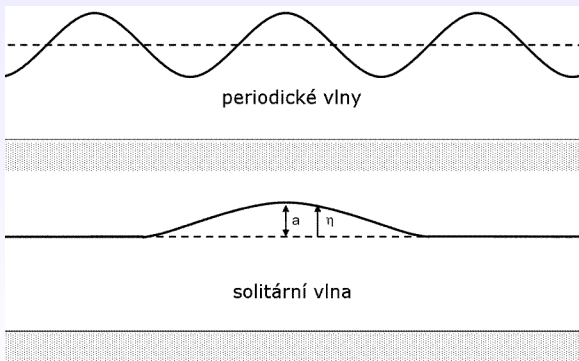
Vlny na tenkých kapalných filmech



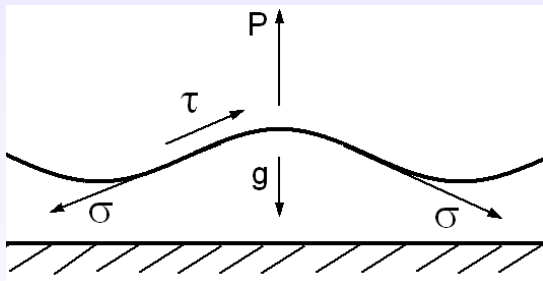
Jurman & McCready, 1989

Typy nestabilit

- "pomalé vlny"
- 2D vlny
 - periodické
- 3D vlny, ripples
- solitární vlny
- atomizace



Silová nerovnováha



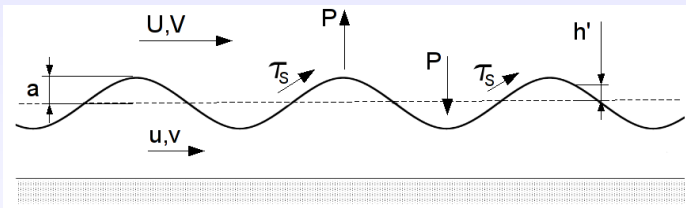
Stabilizační síly

- g - síla tíhová
- σ - povrchové napětí

Destabilizační síly

- P - tlakové síly
- τ - smykové napětí

Matematické základy lineární analýzy nestabilit



- Reynoldsův rozklad

$$\begin{aligned}
 h &= \bar{h} + h', \\
 u &= \bar{u} + u', \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

- předpoklad linearity

$$\frac{u'}{\hat{u}(y)} = \frac{v'}{\hat{v}(y)} = \frac{U'}{\hat{U}(y)} = \frac{V'}{\hat{V}(y)} = \frac{P'_S}{\hat{P}_S} = \frac{\tau'_S}{\hat{\tau}_S} = ae^{i\alpha(x-ct)} = h'$$

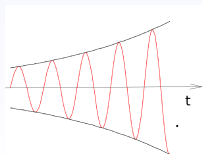
Matematické základy lineární analýzy nestabilit

- funkce výchylek $h' = ae^{i\alpha(x-ct)}$, kde $c = c_R + ic_I$
- vlnové číslo $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}$
- výchylka vln

$$\text{Re}[h'] = a \exp(\alpha c_I t) \cos[\alpha(x - c_R t)]$$

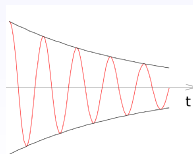
- c_R ... fázová rychlost
- c_I ... rychlost růstu amplitudy

$$c_I > 0$$



kdy $c_I = 0$?

$$c_I < 0$$



Princip analýzy nestabilit

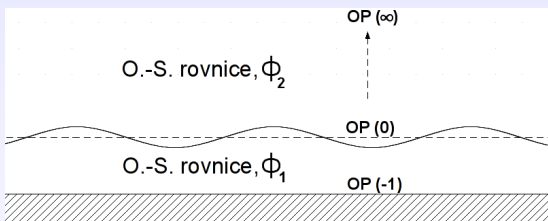
- dosazení veličin do N.S. rovnic
- aplikace zjednodušujících předpokladů
- sestavení pohybových rovnic
- linearizace
- vyhodnocení průběhu $c_I = c_I(\alpha, U, \dots)$

Přístupy k řešení problému nestabilit

- experimentální data
- empirická a poloempirická kritéria viz K-H nestabilita
- simultánní řešení obou fází
- kvazi-statický přístup

Princip simultánního řešení

Orrova-Sommerfeldova rovnice

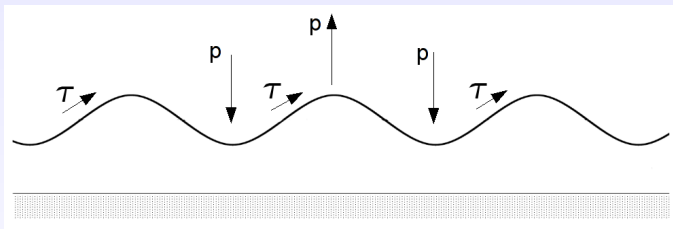


- O.-S. rovnice - nestabilita paralelního proudění
- OP(-1) - podmínka ulpívání, útlum fluktuací
- OP(0) - rovnost rychlostních a smykových výchylek
- OP(∞) - útlum fluktuací

Výstup:

- $\phi_j(y) \longrightarrow u'_j, v'_j, \tau', P'$
- $c = c(\alpha, Re, \rho, \mu, \sigma)$
- $\alpha_{\text{krit}} = \max_{\alpha} c_l$

Princip kvazistatického přístupu



Separované řešení:

① τ, P ($\hat{\tau}_{SR}, \hat{\tau}_{SI}, \hat{P}_{SR}, \hat{P}_{SI}$)

- modelovány prouděním vzduchu nad pevným povrchem
- krátké **X** dlouhé vlny
- vliv turbulence **X** horní stěny

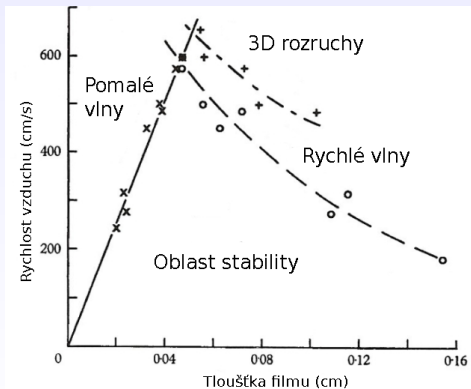
② vlastní problém nestabilit

- integrální přístup řešení pohybových rovnic
- dosažení τ a P

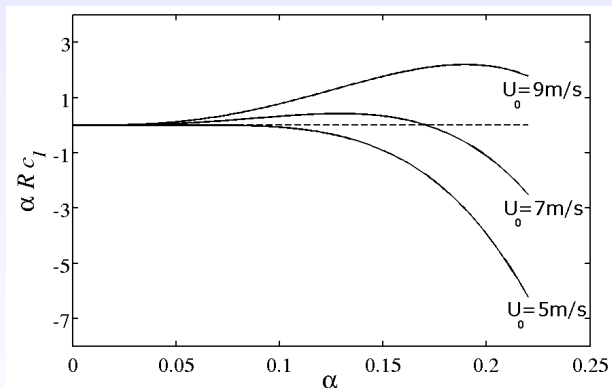
Pomalé vlny - Craik, 1966

Předpoklady

- velmi tenký film
 $h < 0.5$ mm
- nízké rychlosti
 $U < 10$ m/s
- kvazistatický přístup
- O.-S. rovnice
- $\alpha^2 \ll 1$ a $\alpha R \ll 6$
pro $\alpha = 2\pi h/\lambda$

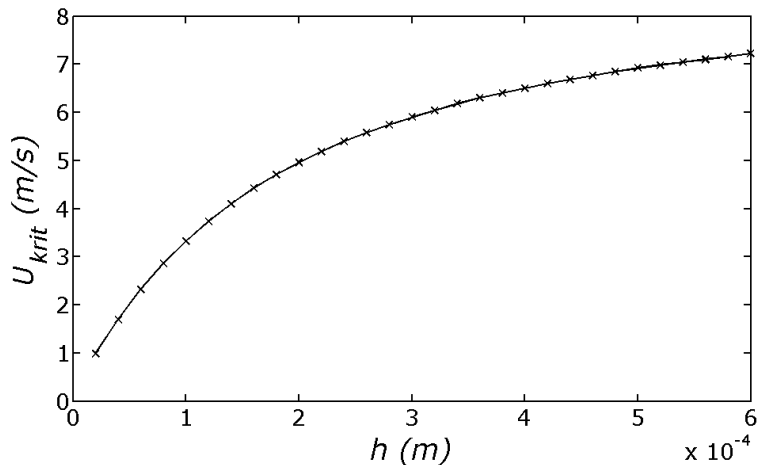


Pomalé vlny - Craik, 1966



$$C_l = \frac{\alpha}{3R} \left[\frac{l}{c_f} (\alpha R + \frac{3}{2} \beta (\alpha R)^{\frac{2}{3}}) - \alpha^2 R^2 T - R^2 G \right]$$

Pomalé vlny - Craik, 1966



Kapilární vlny - Asali, 1993

Předpoklady

- velmi tenké filmy & velké rychlosti plynu
- kvazistatický přístup & integrální metoda

$$u_a = \int_0^h u \, dy, \quad \Gamma = \frac{1}{hu_a^2} \int_0^h u^2 \, dy.$$

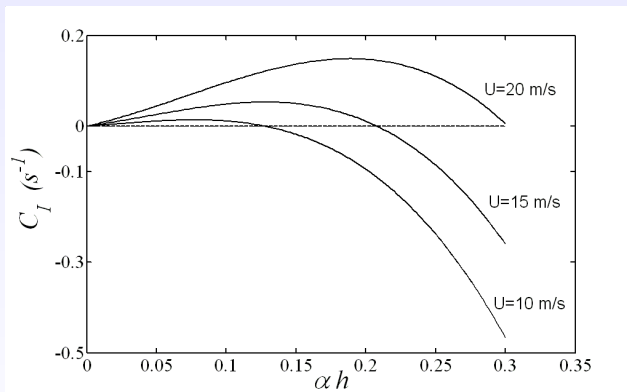
- amplitudy tlakových a smykových fluktuací

$$\frac{\hat{\tau}_{SR}}{\alpha \bar{\tau}_S} \cong \frac{\hat{\tau}_{SI}}{\alpha \bar{\tau}_S} \cong 7, \quad \frac{\hat{P}_{SR}}{\alpha \bar{\tau}_S} \cong -78, \quad \frac{\hat{P}_{SI}}{\alpha \bar{\tau}_S} \cong 45.$$

Základní rovnice

$$C^2 + \bar{u}_a^2 \bar{\Gamma} - 2\bar{u}_a \bar{\Gamma} C - \bar{h} \bar{u}_a^2 \hat{\Gamma} = i \frac{\hat{\tau}_S - \hat{\tau}_W}{\rho_L \alpha} - i \frac{\bar{\tau}_S - \bar{\tau}_W}{\alpha \bar{h} \rho_L} + \bar{h} \frac{\hat{P}_S}{\rho_L} + g \bar{h} \sin \beta + \frac{\alpha^2 \sigma \bar{h}}{\rho_L}.$$

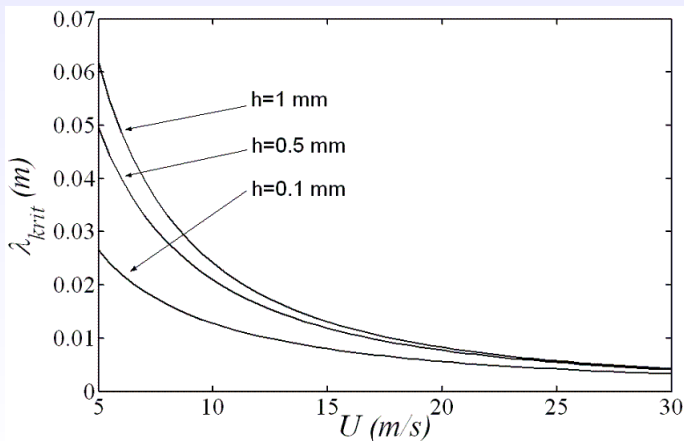
Kapilární vlny - Asali, 1993



$$C_I = \frac{2}{3} \alpha \bar{h} \bar{u}_a \left[\frac{3}{2} \frac{\hat{\tau}_{SI}}{\alpha \bar{\tau}_S} - \alpha \bar{h} \frac{\hat{P}_{SR}}{\alpha \bar{\tau}_S} - \frac{\rho_L g \bar{h}}{\bar{\tau}_S} \sin \beta - \frac{(\alpha \bar{h})^2 \sigma}{\bar{\tau}_S \bar{h}} \right]$$

Kapilární vlny - Asali, 1993

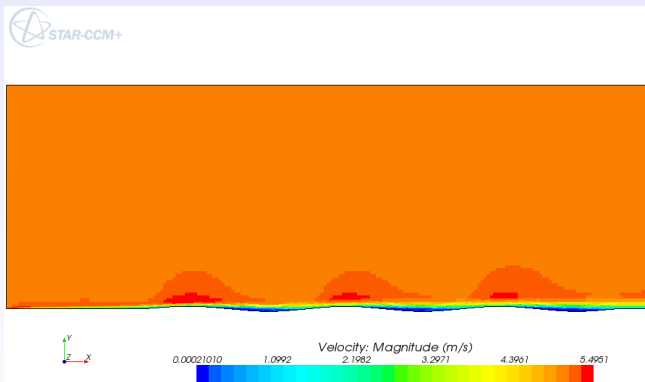
Závislost kritické vlnové délky na rychlosti vzduchu



Shrnutí problému

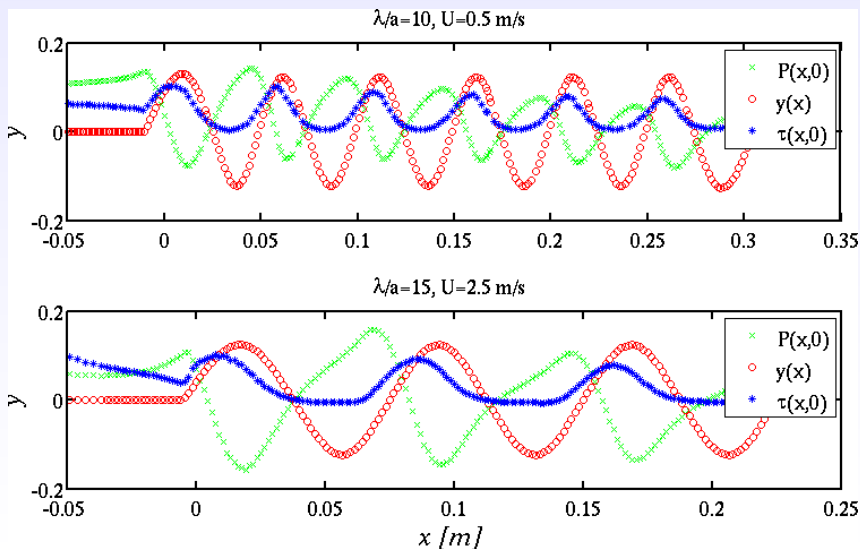
- 1 klasifikace nestabilit a jejich vymezení v prostoru (Re_L, Re_G)
 - 2 identifikace podmínek růstu nestabilit
- kritické vlnové délky, kritické rychlosti
 - 3 predikce odtržení fragmentů kapaliny z filmu, atomizace
- více typů nestabilit a geometrických konfigurací
 - neexistuje univerzální řešení
 - matematicky náročné řešení modelů
 - stěžejní úkol - kvantifikace tlakových a smykových sil

Návrh dalšího postupu - Simulace - Star CCM+

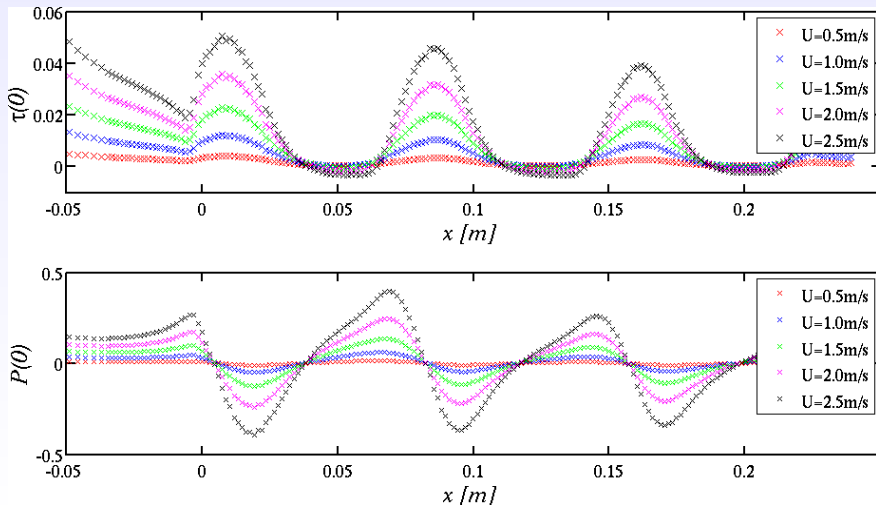


- přehledový charakter práce
- výběr vhodného modelu
- implementace smykových a tlakových sil ze CFD simulací

Simulace smykových a tlakových sil



Simulace smykových a tlakových sil



Děkuji za pozornost.