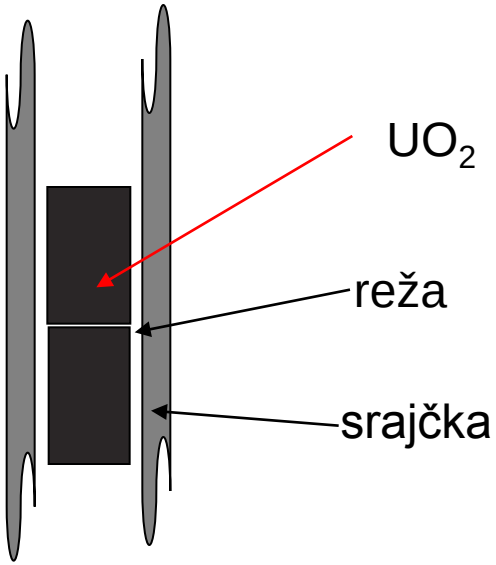
Hlajenje reaktorja - gorivna palica



Gorivna palica - prenos toplote je v radialni smeri veliko večji kot v aksialni (ne velja za tekočo kovino).

1) prevajanje toplote v tabletki UO_2 in v srajčki
Poissonova enačba:

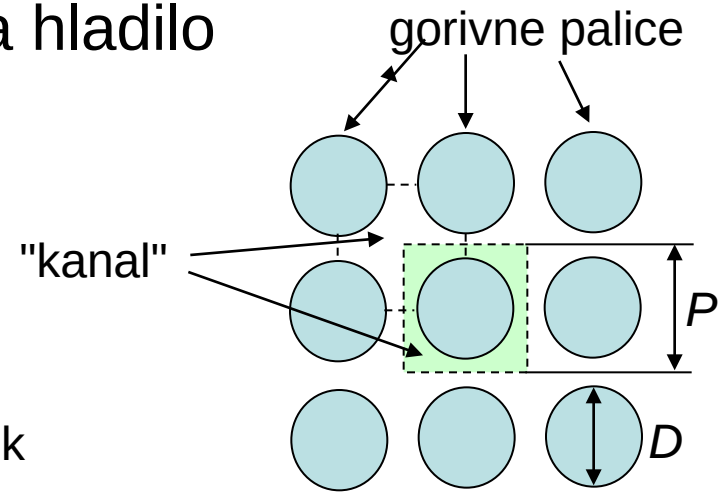
$$\lambda \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) = -q \qquad q = \begin{cases} q & v\ tabletki \\ 0 & v\ srajcki \end{cases}$$

(predpostavimo, da se vsa toplota *q* sprosti v gorivu)

2) Reža - prenos toplote s konvekcijo, prevodnostjo in sevanjem.

Primer: Izračunaj temperaturo zunanje stene srajčke v gorivni palici JE Krško s premerom gorivne palice 9.5 mm, debelino srajčke 0.572 mm, če je temperatura v osi tabletke 2000 K. Toplotna prevodnost tabletke je 2 W/m/K, toplotna prevodnost cirkonijeve srajčke je 20 W/m/K. Gostota moči v UO_2 je 580 MW/m^3. Predpostavi, da je reža med UO_2 in Zr zaprta.

Hlajenje reaktorja - prenos toplote na hladilo



Prenos toplote v hladilo - konvekcija

$$j = h(T_{srajcka} - T_{hladilo})$$

j [W/m^2] $= q*\pi D^2 dz/(\pi D dz) = qD/4$ - toplotni tok

$T_{srajcka}$ - temperatura srajčke na robu gorivne palice

$T_{hladilo}$ - T_{bulk} ~ povprečna temperatura hladila v "kanalu" ob palici

$$T_{bulk} = \frac{\int \rho c_p v T dS_{kanal}}{\int \rho c_p v dS_{kanal}}$$

h - toplotna prestopnost (heat transfer coefficient) -

empirične korelacije (eksperimenti):

Inženirski zapis:

$$h = \frac{\lambda}{D_e} \mathrm{Nu}$$

λ topl. prevodnost tekočine

D_e efektivni premer kanala

Nu Nusseltovo število - brezdim. topl. prestopnost

$$D_e = 4 \cdot (presek\ kanala)/(omoceni\ obod\ kanala)$$

Če je hladilo voda (ni vrenja) ali plin, je za primer na sliki:

$$Nu = (0.042 \frac{P}{D} - 0.024)\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{(1/3)}$$

JE Krško: P=1.232 cm, D=0.95 cm

Voda ali plin V cevi:

$$Nu = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.4}$$

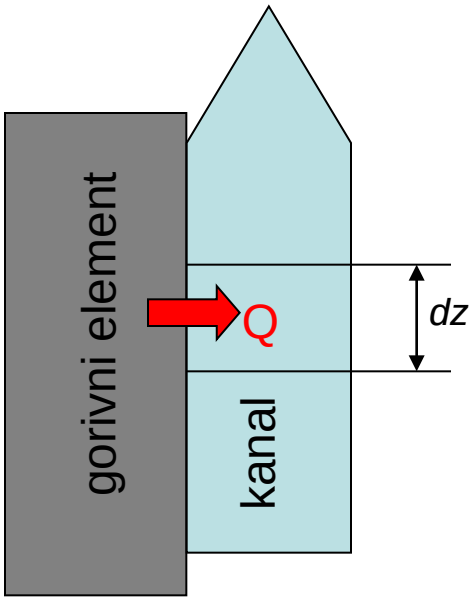
$$\mathrm{Re} = \frac{D_e v \rho}{\mu}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda}$$ Prandtlovo število

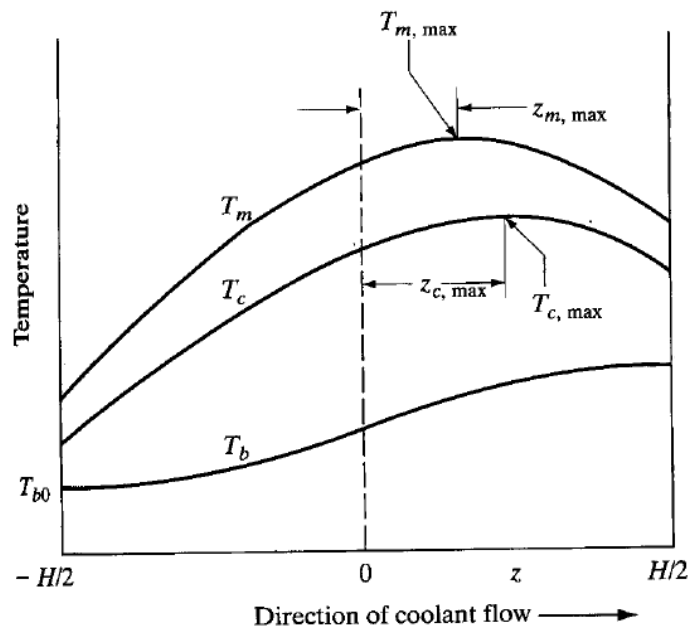
Hlajenje reaktorja - temperatura vzdolž kanala

Moč vzdolž kanala sredice ni konstantna: $q = q(z)$

Uporaben približek: hladilo se premika po kanalu ob gorivnem elementu s povprečno hitrostjo *v* (1D Eulerjeve enačbe - glej nalogo 9 – vaje: $\dot{m}\Delta h = P_Q$)



$$\left.\begin{aligned} P_Q &= qS_{gorivo}dz \\ \dot{m}\Delta h &= \rho_{hladilo}S_{kanal}vc_p dT \end{aligned}\right\} \frac{dT}{dz} = \frac{q(z)}{\rho v c_p}\frac{S_{gorivo}}{S_{kanal}}$$



$T_{gorivo\text{-}center}$

$T_{srajčka}$

$T_{hladilo}$

slika desno
(Lamarsh, Baratta):

$$q(z) = q_{\max}\cos(\pi z / H)$$

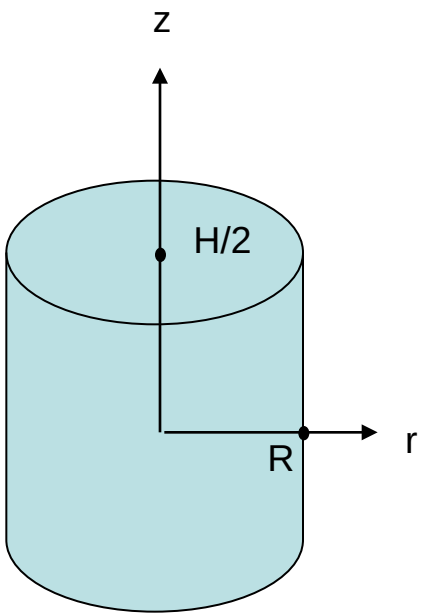
Hlajenje reaktorja

Moč reaktorja je sorazmerna fluksu termičnih nevtronov (številu fisij na enoto volumna)

Večina sproščene energije (~97%) ostane v gorivu, le γ sevanje del energije sprosti v moderatorju in ostalih materialih sredice.

Predpostavimo, da imajo vsi nevtroni enako energijo in da reaktor deluje stacionarno:

$$(\nu\Sigma_{\mathrm{f}} - \Sigma_{\mathrm{a}})\Phi = -\mathrm{D}\nabla^2\Phi$$



Difuzijsko enačbo lahko rešimo, če predpostavimo, da so $\nu, \Sigma_{\mathrm{f}}, \Sigma_{\mathrm{a}}$, D konstante.

V homogenem reaktorju cilindrične oblike brez reflektorja sta nevtronski fluks in porazdelitev moči sorazmerna:

$$\Phi(r,z) \propto q(r,z) \propto J_o(2{,}405r/R)\cos(\pi z/H)$$

Razmerje med maks. močjo pri r=0 in z=0 in povprečno močjo tega reaktorja:

"konični faktor moči" = 2.4

Dejanski reaktor: razmerje naj bo čim manjše in porazdelitev moči čim bolj enakomerna! Reflektor, razporeditev goriva - večja obogatitev na obod , manjša v sredino.

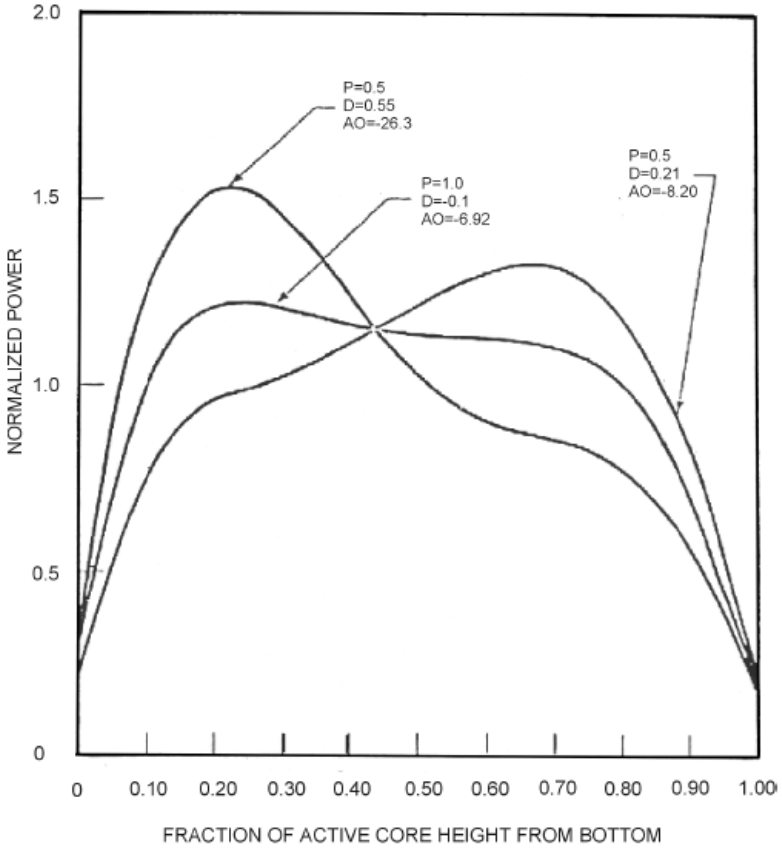
Porazdelitev moči v JE Krško

	1	2	3	4	5	6	7
1	1.003	1.271	1.043	0.969	1.281	1.157	0.530
2	1.271	1.058	1.066	1.272	1.075	1.098	0.492
3	1.043	1.067	1.064	1.139	1.236	0.934	
4	0.969	1.273	1.140	1.259	1.073	0.514	
5	1.281	1.075	1.236	1.075	0.561		
6	1.157	1.099	0.934	0.515			
7	0.530	0.494					

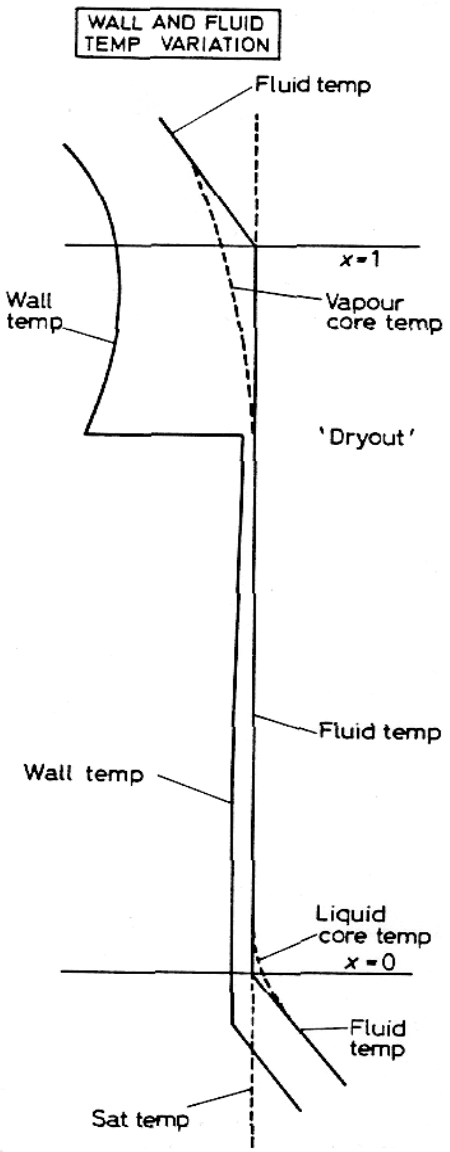
Calculated $F_{\Delta H}$ = 1.373

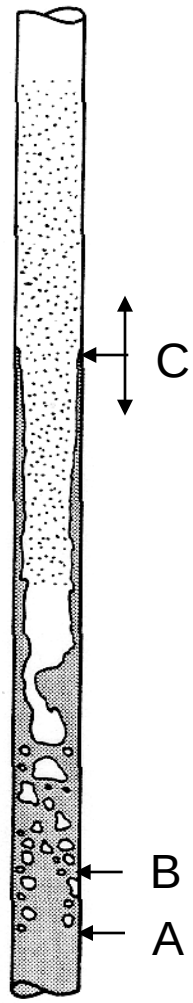
Relativna moč
sredice JE Krško

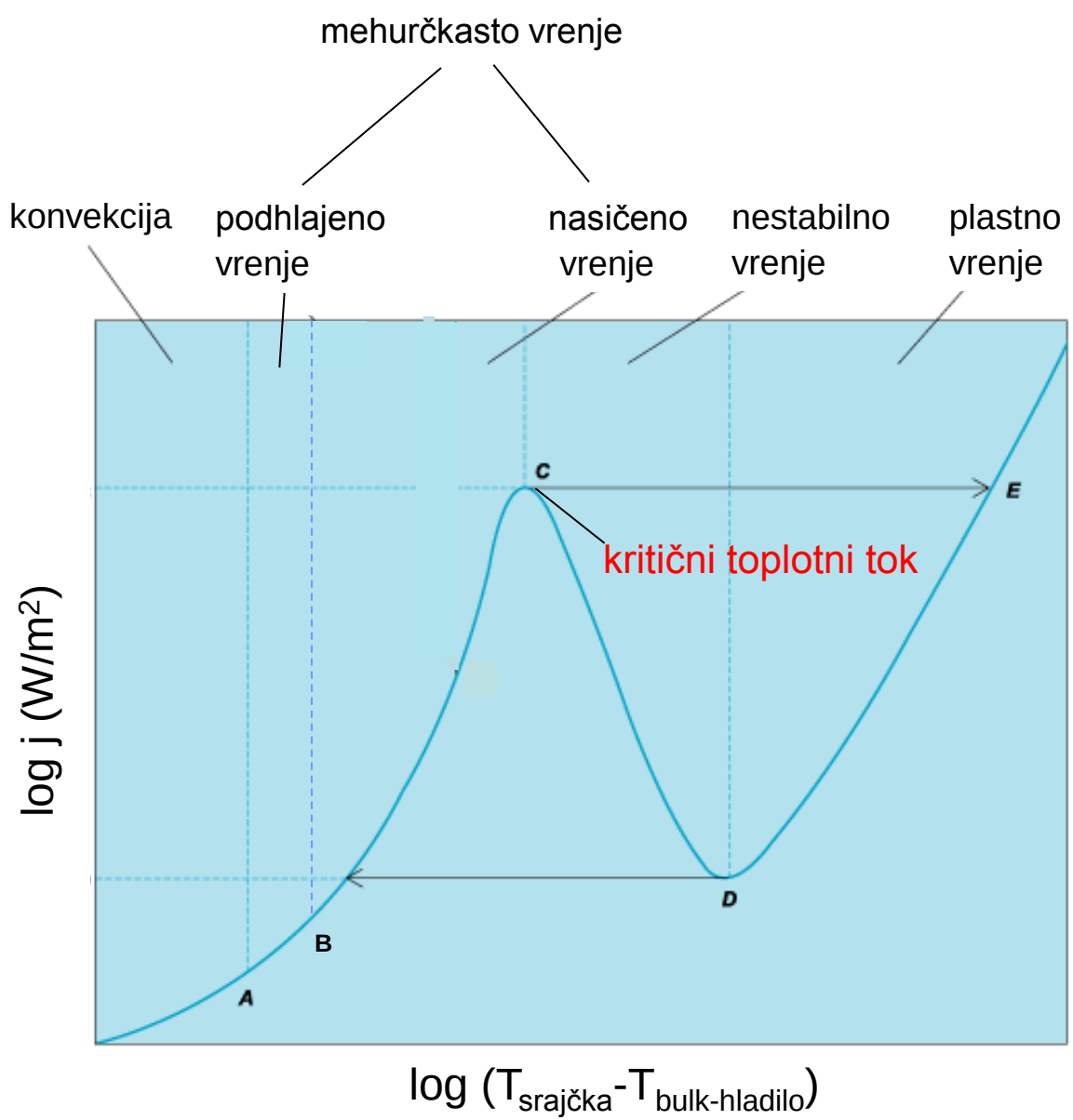
vir:
NE Krško USAR,
Rev. 7, Fig. 4.3-11B,
4.3-15A



Prenos toplote z vrenjem



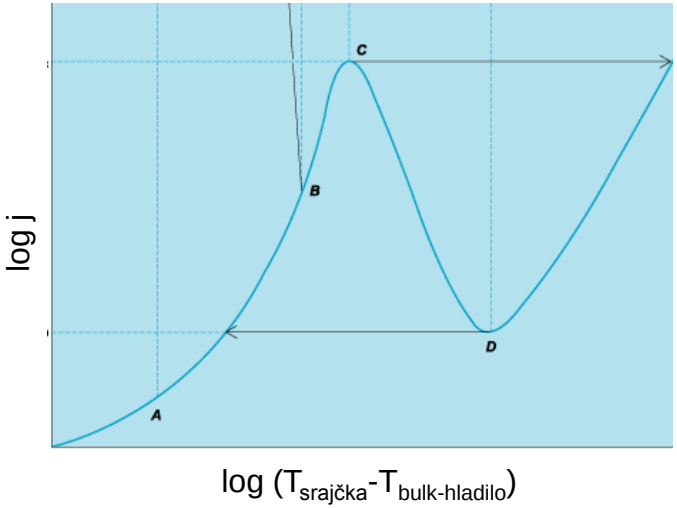




Hlajenje reaktorja - omejitve

Hlajenje reaktorja:

- velika gostota moči
- gorivo se ne sme staliti !
- sevanje spreminja lastnosti materialov
- zaostala toplota fisijskih produktov



Preprečiti poškodbe goriva - preprečiti kritični toplotni tok oz. "krizo vrenja" (DNB - Departure from Nucleate Boiling)

Razmerje krize vrenja - (DNB ratio - DNBR):

$$DNBR = \frac{j_{kriticni}}{j_{dejanski}}$$

Projektiranje reaktorja: DNBR mora biti vedno, v vsaki točki sredice večji od 1.

Težava: natančna vrednost $j_{kriticni}$ ni znana. Določajo ga korelacije.

Varnostni faktor pri projektiranju tlačnovodnih reaktorjev: med delovanjem ali prehodnimi pojavi mora veljati: DNBR>1.3.

DNB razmerje - najpomembnejša omejitev pri načrtovanju reaktorja

Hlajenje reaktorja - omejitve
vroči kanal, vroča točka

$$DNBR = \frac{j_{kriticni}}{j_{dejanski}}$$

Projektiranje reaktorja:

a) DNBR>1.3 => faktor vročih mest $F_{Q\text{-}max}$=2.34 (JE Krško)

$$F_Q(r,z)_{\max} = \frac{q(r,z)_{\max}}{\langle q(r,z)\rangle}$$

b) faktor vročega kanala $F_{\Delta H\text{-}max}$=1.59 (JE Krško)

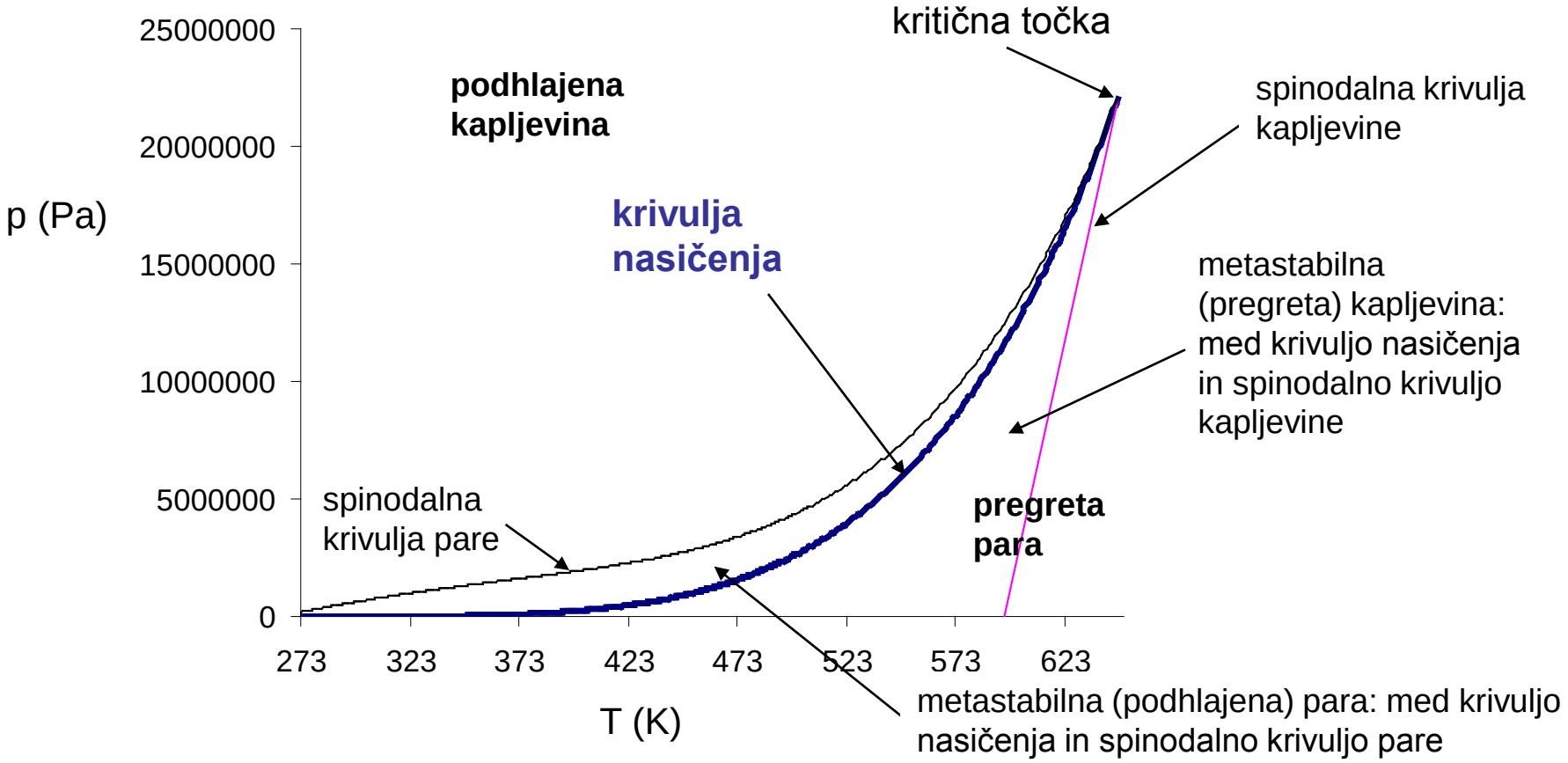
$$F_{\Delta H}(r)_{\max} = \frac{\text{prirastek entalpije v najbolj vrocem kanalu}}{\text{povprecen prirastek entalpije v sredici}}$$

Izračunaj maksimalni dovoljen toplotni tok v sredici JE Krško in maksimalno temperaturno razliko med vstopno in izstopno točko vročega kanala JE Krško.

Izračunaj temperaturni profil zunanje površine gorivne palice, notranje površine gor. palice in v središču goriva v vročem kanalu. Predpostavi porazdelitev moči v vročem kanalu P=P_max(0.3+0.7*cos(π*z/H)), H=3.66 m z[-H/2,H/2]

Parne tabele - Domača naloga - pripravi si novo verzijo tabele z lastnostmi vode v stanju nasičenja - podobno tisti iz 1962 v "Toplota", Kuščer, Žumer.

vir: http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/ (enačbe stanja za številne snovi)



1D Eulerjeve enačbe v "cevi" spremenljivega preseka

$$\frac{\partial S\rho}{\partial t} + \frac{\partial S\rho v}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial S\rho v}{\partial t} + \frac{\partial S\rho v^2}{\partial x} + S\frac{\partial p}{\partial x} = S(\rho g_x - F - F_{tr})$$

$$\frac{\partial S\rho e}{\partial t} + \frac{\partial Sv(\rho e + p)}{\partial x} = S(q + F_{tr}v - Fv)$$

$$e = u + v^2/2$$

$$u = u(p, \rho)$$ enačba stanja

Podroben komentar enačb - vaje iz TD in mehanike tekočin...