Přenos hybnosti

Rovnice kontinuity

$$\frac{\mathrm{D}\varrho}{\mathrm{D}t} + \varrho\nabla \bullet \vec{u} = 0$$

$$\left\{\frac{\partial\varrho}{\partial t} + (\vec{u} \bullet \nabla)\,\varrho\right\} + \varrho\nabla \bullet \vec{u} = 0$$

Kapaliny

$$\nabla \bullet \vec{u} = 0$$

Kartézské souřadnice

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

Cylindrické souřadnice

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r u_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

Cauchyho rovnice dynamické rovnováhy

$$\varrho\,\frac{\mathrm{D}\vec{u}}{\mathrm{D}t} = -\nabla p + \nabla \bullet \vec{\vec{\tau}} + \varrho\,\vec{f}$$

$$\varrho\,\left\{\frac{\partial\vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \bullet \nabla)\,\vec{u}\right\} = -\nabla p + \nabla \bullet \vec{\vec{\tau}} + \varrho\,\vec{f}$$

Kartézské souřadnice

$$\varrho\,\left\{\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x\,\frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y\,\frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z\,\frac{\partial u_x}{\partial z}\right\} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \varrho\,f_x$$

$$\varrho\,\left\{\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x\,\frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y\,\frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z\,\frac{\partial u_y}{\partial z}\right\} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \varrho\,f_y$$

$$\varrho\,\left\{\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x\,\frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y\,\frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z\,\frac{\partial u_z}{\partial z}\right\} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \varrho\,f_z$$

Cylindrické souřadnice

$$\varrho\left\{\frac{\partial u_r}{\partial t}+u_r\,\frac{\partial u_r}{\partial r}+\frac{u_\varphi}{r}\,\frac{\partial u_r}{\partial \varphi}-\frac{u_\varphi^2}{r}+u_z\,\frac{\partial u_r}{\partial z}\right\}=-\frac{\partial p}{\partial r}+$$
$$+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\tau_{rr}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\varphi r}}{\partial \varphi}-\frac{\tau_{\varphi\varphi}}{r}+\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z}+\varrho\,f_r$$

$$\varrho\left\{\frac{\partial u_\varphi}{\partial t}+u_r\,\frac{\partial u_\varphi}{\partial r}+\frac{u_\varphi}{r}\,\frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi}+\frac{u_r u_\varphi}{r}+u_z\,\frac{\partial u_\varphi}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \varphi}+$$
$$+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\tau_{r\varphi}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi}+\frac{\partial \tau_{z\varphi}}{\partial z}+\varrho\,f_\varphi$$

$$\varrho\left\{\frac{\partial u_z}{\partial t}+u_r\,\frac{\partial u_z}{\partial r}+\frac{u_\varphi}{r}\,\frac{\partial u_z}{\partial \varphi}+u_z\,\frac{\partial u_z}{\partial z}\right\}=-\frac{\partial p}{\partial z}+$$
$$+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\tau_{rz}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial \varphi}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}+\varrho\,f_z$$

Newtonské tekutiny

$$\vec{\vec{\tau}}=-\frac{2}{3}\mu\,\vec{\vec{\delta}}\,\mathrm{tr}\vec{\vec{\Delta}}+2\mu\vec{\vec{\Delta}}=2\mu\left[-\frac{1}{3}\vec{\vec{\delta}}\,(\nabla\bullet\vec{u})+\vec{\vec{\Delta}}\right]$$

Newtonské kapaliny

$$\vec{\vec{\tau}}=2\mu\vec{\vec{\Delta}}$$

Tenzor rychlosti deformace

$$\vec{\vec{\Delta}}=\frac{1}{2}\left[\nabla\vec{u}+(\nabla\vec{u})^{\mathrm{T}}\right]$$

Kartézské souřadnice

$$\Delta_{xx}=\frac{\partial u_x}{\partial x}$$
$$\Delta_{yy}=\frac{\partial u_y}{\partial y}$$
$$\Delta_{zz}=\frac{\partial u_z}{\partial z}$$
$$\Delta_{xy}=\Delta_{yx}=\frac{1}{2}\left[\frac{\partial u_x}{\partial y}+\frac{\partial u_y}{\partial x}\right]$$
$$\Delta_{xz}=\Delta_{zx}=\frac{1}{2}\left[\frac{\partial u_x}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial x}\right]$$
$$\Delta_{yz}=\Delta_{zy}=\frac{1}{2}\left[\frac{\partial u_y}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial y}\right]$$

Cylindrické souřadnice

$$\Delta_{rr}=\frac{\partial u_r}{\partial r}$$
$$\Delta_{\varphi\varphi}=\frac{1}{r}\frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi}+\frac{u_r}{r}$$
$$\Delta_{zz}=\frac{\partial u_z}{\partial z}$$
$$\Delta_{r\varphi}=\Delta_{\varphi r}=\frac{1}{2}\left[r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u_\varphi}{r}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \varphi}\right]$$
$$\Delta_{rz}=\Delta_{zr}=\frac{1}{2}\left[\frac{\partial u_r}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial r}\right]$$
$$\Delta_{\varphi z}=\Delta_{z\varphi}=\frac{1}{2}\left[\frac{\partial u_\varphi}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_z}{\partial \varphi}\right]$$

Navier–Stokesova rovnice

$$\varrho\,\frac{\mathrm{D}\vec{u}}{\mathrm{D}t} = -\nabla p + \frac{1}{3}\mu\nabla\left(\nabla\bullet\vec{u}\right) + \mu\,\nabla^2\vec{u} + \varrho\,\vec{f}$$

Kapaliny

$$\varrho\,\frac{\mathrm{D}\vec{u}}{\mathrm{D}t} = -\nabla p + \mu\,\nabla^2\vec{u} + \varrho\,\vec{f}$$

$$\varrho\,\left\{\frac{\partial\vec{u}}{\partial t} + \left(\vec{u}\bullet\nabla\right)\vec{u}\right\} = -\nabla p + \mu\,\nabla^2\vec{u} + \varrho\,\vec{f}$$

Kartézské souřadnice

$$\varrho\,\left\{\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x\,\frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y\,\frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z\,\frac{\partial u_x}{\partial z}\right\} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2}\right) + \varrho\,f_x$$

$$\varrho\,\left\{\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x\,\frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y\,\frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z\,\frac{\partial u_y}{\partial z}\right\} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2}\right) + \varrho\,f_y$$

$$\varrho\,\left\{\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x\,\frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y\,\frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z\,\frac{\partial u_z}{\partial z}\right\} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right) + \varrho\,f_z$$

Cylindrické souřadnice

$$\varrho\left\{\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r\,\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\varphi}{r}\,\frac{\partial u_r}{\partial\varphi} - \frac{u_\varphi^2}{r} + u_z\,\frac{\partial u_r}{\partial z}\right\} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \\ + \mu\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(ru_r\right)\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u_r}{\partial\varphi^2} - \frac{2}{r^2}\frac{\partial u_\varphi}{\partial\varphi} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2}\right\} + \varrho\,f_r$$

$$\varrho\left\{\frac{\partial u_\varphi}{\partial t} + u_r\,\frac{\partial u_\varphi}{\partial r} + \frac{u_\varphi}{r}\,\frac{\partial u_\varphi}{\partial\varphi} + \frac{u_r u_\varphi}{r} + u_z\,\frac{\partial u_\varphi}{\partial z}\right\} = -\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial\varphi} + \\ + \mu\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(ru_\varphi\right)\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial\varphi^2} + \frac{2}{r^2}\frac{\partial u_r}{\partial\varphi} + \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial z^2}\right\} + \varrho\,f_\varphi$$

$$\varrho\left\{\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r\,\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\varphi}{r}\,\frac{\partial u_z}{\partial\varphi} + u_z\,\frac{\partial u_z}{\partial z}\right\} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \\ + \mu\left\{\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{\partial u_z}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u_z}{\partial\varphi^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right\} + \varrho\,f_z$$

Invarianty tenzoru rychlosti deformace

První invariant tenzoru rychlosti deformace

$$\mathrm{I}_\Delta = \mathrm{tr}\,\vec{\vec{\Delta}} = \Delta_{ii}$$

Druhý invariant tenzoru rychlosti deformace

$$\mathrm{II}_\Delta = \vec{\vec{\Delta}} : \vec{\vec{\Delta}} = \Delta_{ij}\,\Delta_{ji}$$

Alternativní definice

$$\mathrm{II}'_\Delta = \frac{1}{2}\left[\left(\mathrm{tr}\,\vec{\vec{\Delta}}\right)^2 - \vec{\vec{\Delta}} : \vec{\vec{\Delta}}\right]$$

Třetí invariant tenzoru rychlosti deformace

$$\mathrm{III}_\Delta = \det\vec{\vec{\Delta}} = \varepsilon_{ijk}\Delta_{1i}\,\Delta_{2j}\,\Delta_{3k}$$

Levi-Civita tenzor třetího řádu
`https://www.wolframalpha.com/input/?i=LeviCivitaTensor[3]`

$$\varepsilon_{ijk} = \frac{1}{2}\,(i-j)\,(j-k)\,(k-i)$$

Nenewtonské kapaliny

Zobecněná vazká kapalina

$$\vec{\vec{\tau}} = 2\eta\vec{\vec{\Delta}}$$

Mocninová kapalina

$$\eta = K\left(\sqrt{2\,\mathrm{II}_\Delta}\right)^{n-1}$$

Binghamská kapalina

$$\eta = \mu_p + \frac{\tau_0}{\sqrt{2\,\mathrm{II}_\Delta}}\,;\quad \frac{1}{2}\vec{\vec{\tau}} : \vec{\vec{\tau}} > \tau_0^2$$

Přenos tepla

$$\varrho c_\mathrm{p} \frac{\mathrm{D}T}{\mathrm{D}t} = -\nabla \bullet \vec{q} + \vec{\vec{\tau}} \boldsymbol{:} \vec{\vec{\Delta}} + \dot{Q}^{(\mathrm{g})}$$

Fourier-Kirchhoffova rovnice $\lambda = \mathrm{const.}$

$$\varrho c_\mathrm{p} \frac{\mathrm{D}T}{\mathrm{D}t} = \lambda \nabla^2 T + \vec{\vec{\tau}} \boldsymbol{:} \vec{\vec{\Delta}} + \dot{Q}^{(\mathrm{g})}$$

$$\varrho c_\mathrm{p} \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \bullet \nabla)\, T \right\} = \lambda \nabla^2 T + \vec{\vec{\tau}} \boldsymbol{:} \vec{\vec{\Delta}} + \dot{Q}^{(\mathrm{g})}$$

Kartézské souřadnice

$$\varrho c_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right\} = \lambda \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} + \tau_{ij} \Delta_{ji} + \dot{Q}^{(\mathrm{g})}$$

Cylindrické souřadnice

$$\varrho c_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\varphi}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right\} = \lambda \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} + \tau_{ij} \Delta_{ji} + \dot{Q}^{(\mathrm{g})}$$

Fourierův zákon

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T$$

Kartézské souřadnice

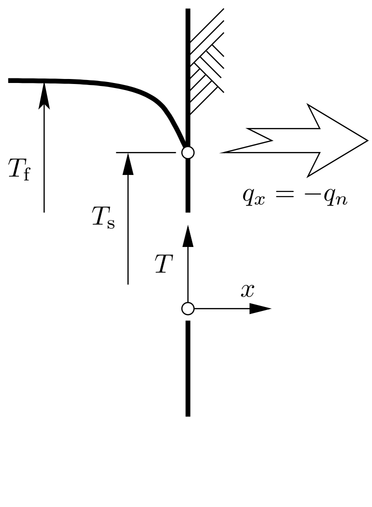
$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$
$$q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}$$
$$q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

Cylindrické souřadnice

$$q_r = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}$$
$$q_\varphi = -\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi}$$
$$q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

Newtonova hypotéza

$$q_n = \vec{q} \bullet \vec{n} = \alpha \left(T_\mathrm{s} - T_\mathrm{f} \right)$$

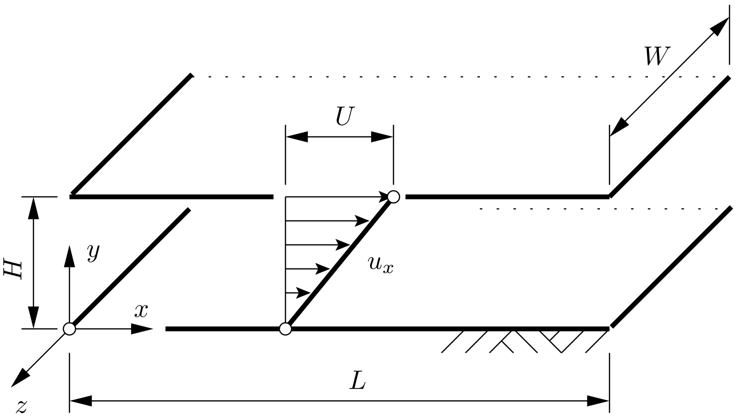


Stefan-Boltzmannův zákon

$$E_{E,0} = \sigma^{(\mathrm{S})}\, T^4$$

$$\sigma^{(S)} = 5{,}6705 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}}$$

Unášivé proudění mezi dvěma deskami; $u_x|_{y=0} = 0$, $u_x|_{y=H} = U$



$$u_x = U\frac{y}{H}$$

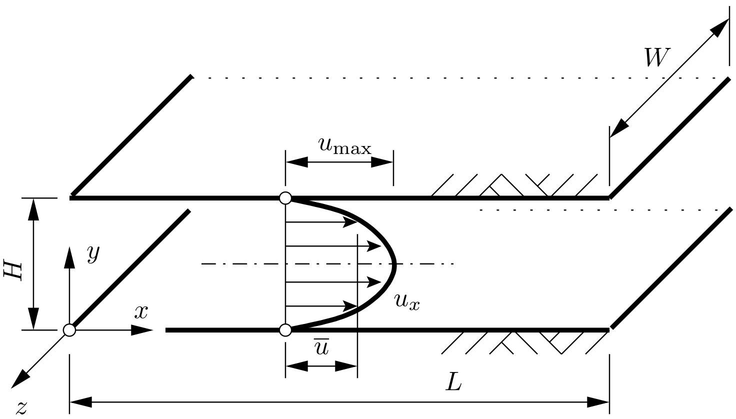
$$\tau_{yx} = \mu\frac{U}{H}$$

$$\dot{V} = \frac{1}{2}UWH$$

$$0 = \frac{\mathrm{d}\tau_{yx}}{\mathrm{d}y}$$

$$\tau_{yx} = \mu\frac{\mathrm{d}u_x}{\mathrm{d}y}$$

Tlakové proudění mezi dvěma deskami; $u_x|_{y=0} = 0$, $u_x|_{y=H} = 0$



$$u_x = \frac{\Delta p H^2}{2\mu L}\left[\left(\frac{y}{H}\right)^2 - \frac{y}{H}\right]$$

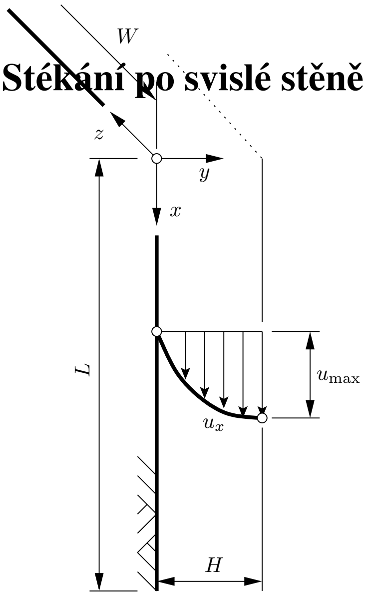
$$\tau_{yx} = \frac{\Delta p H}{2L}\left[2\frac{y}{H} - 1\right]$$

$$\dot{V} = -\frac{\Delta p W H^3}{12\mu L}$$

$$0 = -\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} + \frac{\mathrm{d}\tau_{yx}}{\mathrm{d}y}$$

$$\tau_{yx} = \mu\frac{\mathrm{d}u_x}{\mathrm{d}y}$$

Stékání po svislé stěně; $u_x|_{y=0} = 0$, $\mathrm{d}u_x/\mathrm{d}y|_{y=H} = 0$



$$u_x = \frac{\varrho g H^2}{\mu}\left[\frac{y}{H} - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{H}\right)^2\right]$$

$$\tau_{yx} = \varrho g H\left[1 - \frac{y}{H}\right]$$

$$\dot{V} = \frac{\varrho g W H^3}{3\mu}$$

$$0 = \frac{\mathrm{d}\tau_{yx}}{\mathrm{d}y} + \varrho g$$

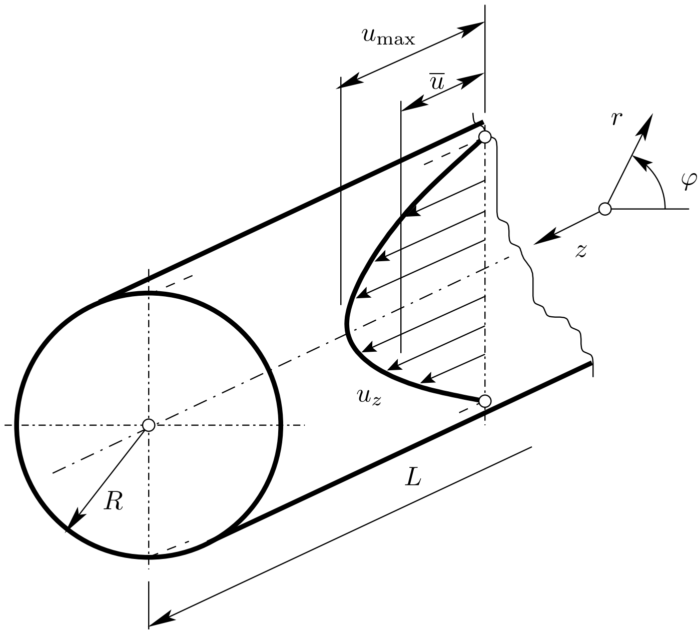
$$\tau_{yx} = \mu\frac{\mathrm{d}u_x}{\mathrm{d}y}$$

Režim toku

$$\mathrm{Re} = \frac{4(\dot{V}/W)\varrho}{\mu} = \frac{4\bar{u}H\varrho}{\mu}$$

$\mathrm{Re} < 25$	laminární oblast proudění
$25 < \mathrm{Re} < 1000$	pseudolaminární oblast proudění (v jádru laminární, na povrchu zvlnění a víry)
$1000 < \mathrm{Re} < 1500$	přechodová oblast proudění
$1500 < \mathrm{Re}$	turbulentní oblast proudění

Tlakové axiální proudění v trubce; $u_z|_{r=R} = 0$, $\mathrm{d}u_z/\mathrm{d}r|_{r=0} = 0$



$$u_z = -\frac{\Delta p R^2}{4\mu L}\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] = 2\overline{u}\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]$$

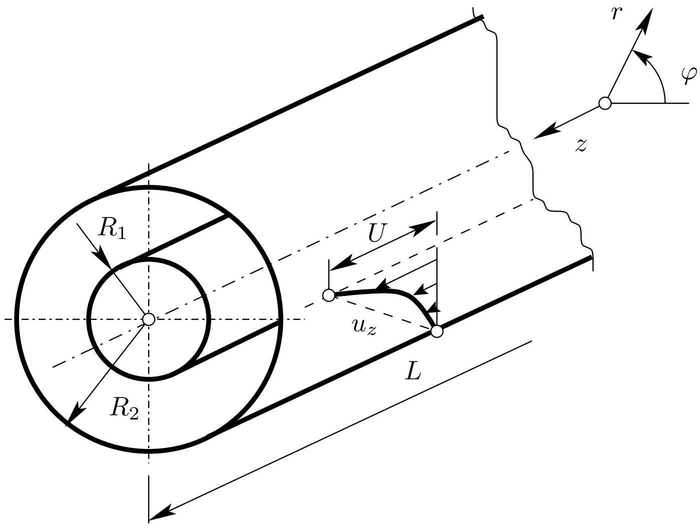
$$\tau_{rz} = \frac{\Delta p r}{2L}$$

$$\dot{V} = -\frac{\pi \Delta p R^4}{8\mu L}$$

$$0 = -\frac{\Delta p}{L} + \frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}\left(r\tau_{rz}\right)}{\mathrm{d}r}$$

$$\tau_{rz} = \mu\frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r}$$

Unášivé axiální proudění v mezikruží; $u_z|_{r=R_1} = U$, $u_z|_{r=R_2} = 0$



$$u_z = \frac{U}{\ln\kappa}\ln\frac{r}{R_2}; \quad \kappa = \frac{R_1}{R_2}$$

$$\tau_{rz} = \frac{\mu U}{\ln\kappa}\,\frac{1}{r}$$

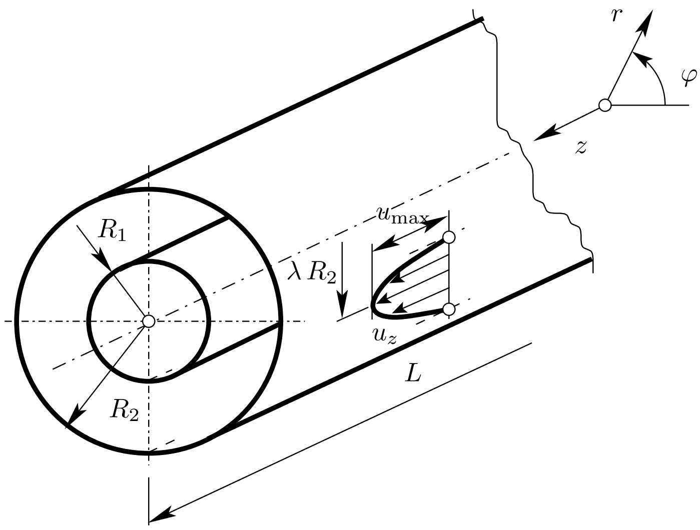
$$\dot V = -\frac{\pi R_2^2 U}{2\ln\kappa}\left[1-\kappa^2+2\kappa^2\ln\kappa\right]$$

$$\dot V = \frac{\pi R_2^2 U}{2}\left[\frac{1-\kappa^2}{\ln(1/\kappa)} - 2\kappa^2\right]$$

$$0 = \frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\tau_{rz}\right)$$

$$\tau_{rz} = \mu\frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r}$$

Tlakové axiální proudění v mezikruží; $u_z|_{r=R_1} = 0$, $u_z|_{r=R_2} = 0$



$$u_z = -\frac{\Delta p R_2^2}{4\mu L}\left[1-\left(\frac{r}{R_2}\right)^2 + \frac{1-\kappa^2}{\ln(1/\kappa)}\ln\frac{r}{R_2}\right]$$

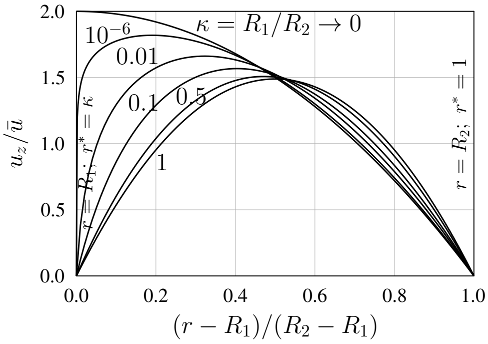
$$\kappa = \frac{R_1}{R_2}$$

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta p R_2}{2L}\left[\frac{r}{R_2} - \lambda^2\frac{R_2}{r}\right]; \ \lambda^2 = \frac{1}{2}\frac{1-\kappa^2}{\ln(1/\kappa)}$$

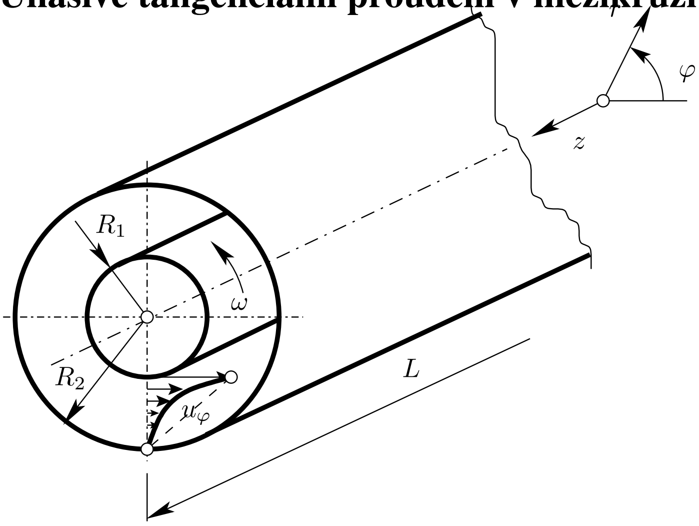
$$\dot V = -\frac{\pi\Delta p R_2^4}{8\mu L}\left[1-\kappa^4 - \frac{\left(1-\kappa^2\right)^2}{\ln(1/\kappa)}\right]$$

$$0 = -\frac{\Delta p}{L} + \frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}\left(r\tau_{rz}\right)}{\mathrm{d}r}$$

$$\tau_{rz} = \mu\frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r}$$



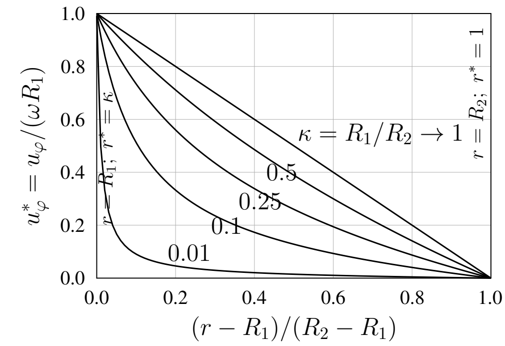
Unášivé tangenciální proudění v mezikruží; $u_\varphi|_{r=R_1} = \omega\, R_1$, $u_\varphi|_{r=R_2} = 0$



$$u_\varphi = \omega R_1 \frac{\kappa}{1-\kappa^2}\left[\frac{R_2}{r} - \frac{r}{R_2}\right];\ \kappa = \frac{R_1}{R_2}$$

$$\tau_{r\varphi} = -2\mu\omega\frac{\kappa^2}{1-\kappa^2}\left(\frac{R_2}{r}\right)^2$$

$$M_k = \frac{4\pi\mu\omega R_1^2 L}{1-\kappa^2}$$

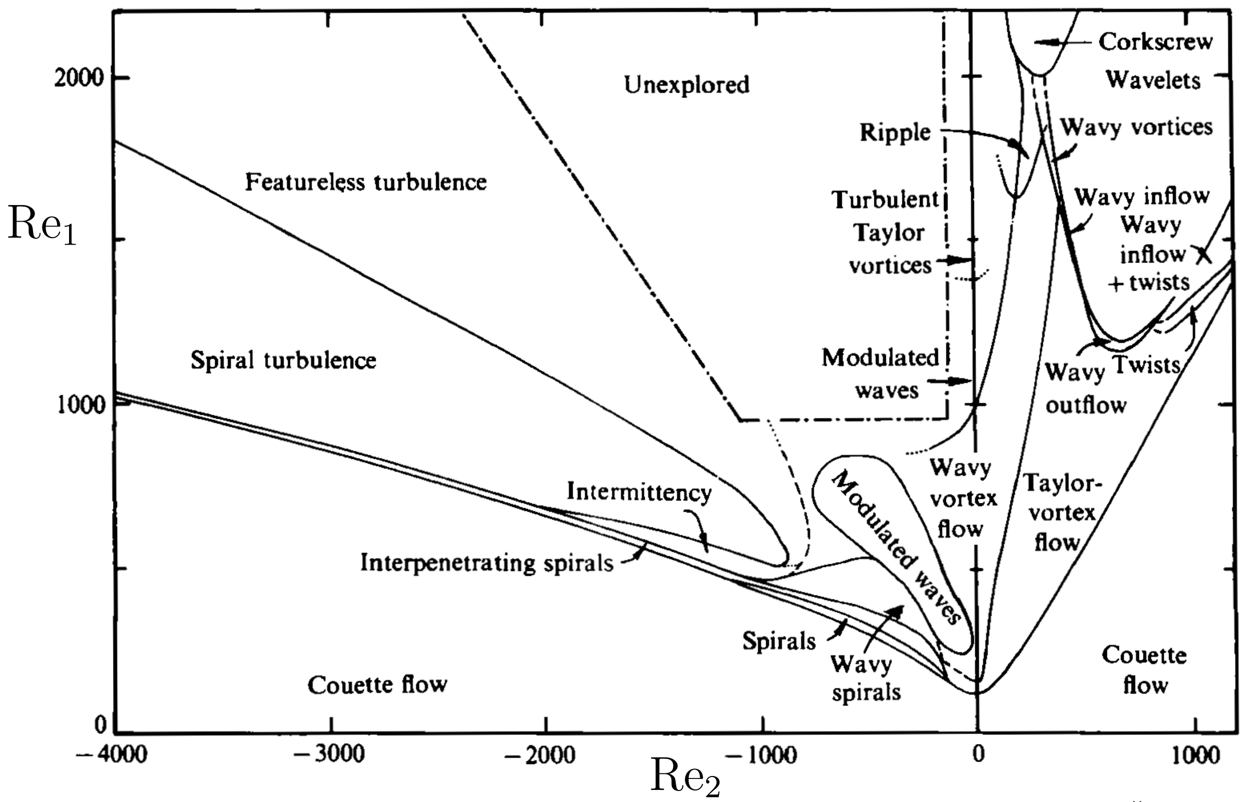


$$0 = \frac{1}{r^2}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r^2\tau_{r\varphi}\right)$$

$$\tau_{r\varphi} = \mu\, r\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(\frac{u_\varphi}{r}\right)$$

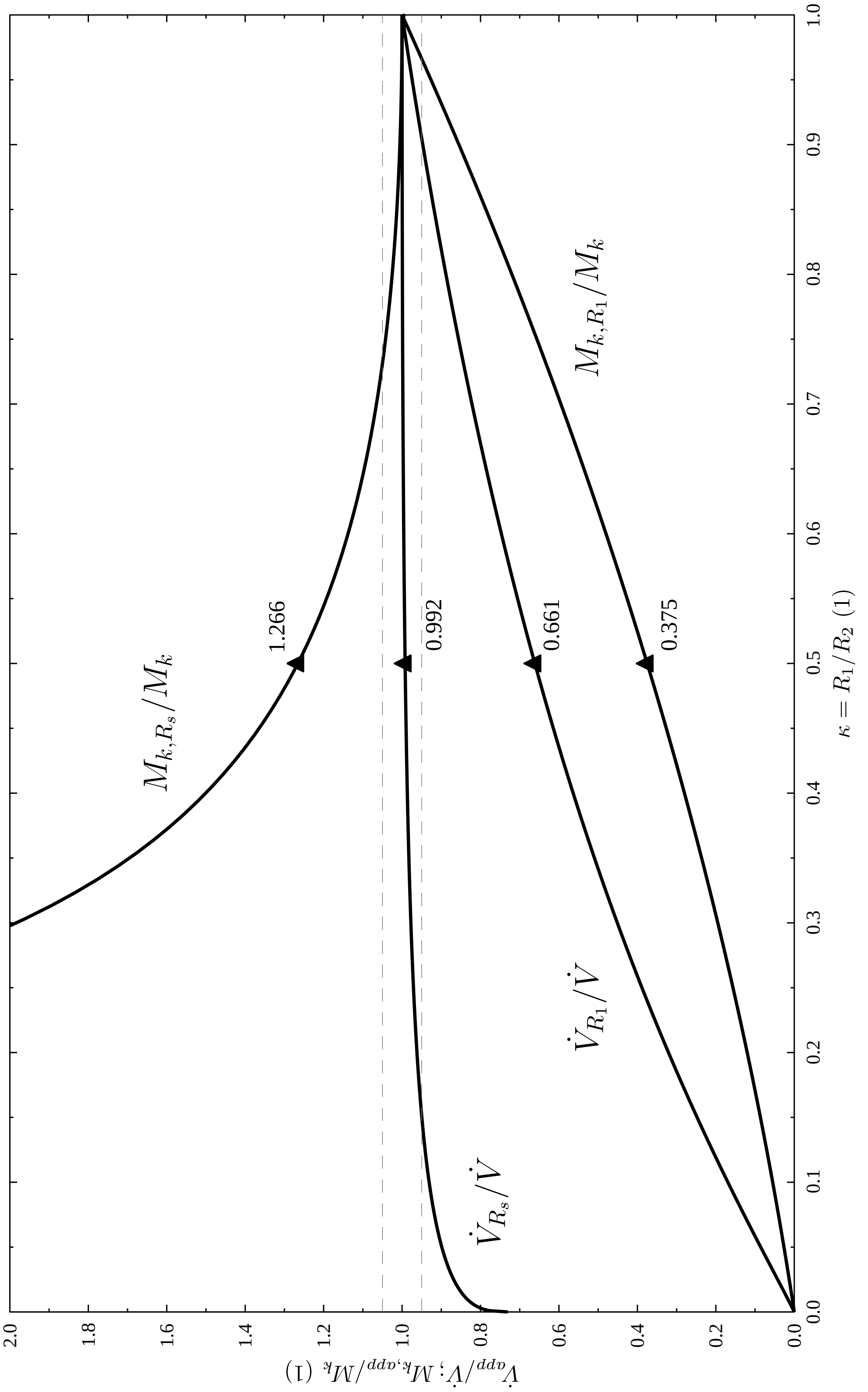
Režim toku

$$\mathrm{Re}_1 = \frac{\omega_1 R_1 \left(R_2 - R_1\right)\varrho}{\mu}, \qquad \mathrm{Re}_2 = \frac{\omega_2 R_2 \left(R_2 - R_1\right)\varrho}{\mu}$$



Grafické znázornění tokových režimů pozorovaných ve štěrbině mezi dvěma nezávisle rotujícími válci. Čárkované čáry vyznačují hranice přechodu, které lze obtížně získat z vizuálního pozorování. Tečkované čáry vyznačují očekávané hranice přechodu. (Andredeck, C. D., Liu, S. S., Swinney, H. L., Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders, J. Fluid. Mech., 164 (1986), pp. 155–183.)

Aproximativní řešení/Přesnost



$$\frac{M_{k,R_1}}{M_k} = \frac{\mu \frac{\omega R_1}{R_2 - R_1} 2\pi R_1^2 L}{\frac{4\pi\mu\omega R_1^2 L}{1-\kappa^2}} = \frac{\frac{R_1}{R_2-R_1}}{\frac{2}{1-\kappa^2}} = \frac{1}{2}\kappa\,(1+\kappa)$$

$$\frac{M_{k,R_s}}{M_k} = \frac{\mu \frac{\omega R_s}{R_2 - R_1} 2\pi R_s^2 L}{\frac{4\pi\mu\omega R_1^2 L}{1-\kappa^2}} = \frac{\frac{R_s^3}{R_2-R_1}}{\frac{2R_1^2}{1-\kappa^2}} = \frac{(1+\kappa)^4}{16\,\kappa^2}$$

Grafické znázornění podílů integrálních veličin přibližného (aproximativního) a přesného řešení pro případ tlakového axiálního proudění v mezikruží ($\dot V$) a tangenciálního proudění v mezikruží s rotujícím vnitřním válcem (M_k) v závislosti na poměru poloměrů mezikruží. Aproximativní řešení (rozvinutí do roviny) je provedeno vždy pro dva případy a to pro případ rozvinutí dle vnitřního poloměru R_1 a dle středního poloměru $R_s = (R_1 + R_2)/2$ (viz indexy).

Tlakové axiální proudění mocninové kapaliny v trubce

$$0 = -\frac{\Delta p}{L} + \frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}\left(r\tau_{rz}\right)}{\mathrm{d}r}$$

$$\tau_{rz} = K\left|\frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r}\right|^{n-1}\frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r}$$

$$u_z|_{r=R} = 0;\ \mathrm{d}u_z/\mathrm{d}r|_{r=0} = 0\ \left(\tau_{rz}|_{r=0} = 0\right)$$

Integrací pohybové rovnice a aplikací druhé okrajové podmínky dostaneme

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta p\, r}{2L}\,.$$

Doplníme konstitutivní rovnicí.

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta p\, r}{2L} = K\left|\frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r}\right|^{n-1}\frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r}$$

Budeme-li uvažovat kladnou hodnotu Δp, pak bude i kladná hodnota derivace $\mathrm{d}u_z/\mathrm{d}r$. Po odstranění absolutní hodnoty pak můžeme integrovat (s použitím druhé okrajové podmínky).

$$\frac{\Delta p\, r}{2L} = K\left(\frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r}\right)^n;\ \Delta p > 0;\ 0 \le r \le R$$

$$\left(\frac{\Delta p r}{2KL}\right)^{1/n} = \frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r}$$

$$\int\limits_R^r \left(\frac{\Delta p r}{2KL}\right)^{1/n}\mathrm{d}r = \int\limits_0^{u_z}\mathrm{d}u_z$$

$$u_z = \frac{n}{n+1}\left(\frac{\Delta p}{2KL}\right)^{1/n} R^{\frac{n+1}{n}}\left[\left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{n+1}{n}} - 1\right]$$

Objemový průtok spočteme integrací.

$$\dot{V} = 2\pi\int\limits_0^R r u_z \mathrm{d}r = \left|\begin{array}{c} r^* = r/R \\ \mathrm{d}r^* = \mathrm{d}r/R\end{array}\right| = 2\pi R^2\int\limits_0^1 r^* u_z \mathrm{d}r^* =$$

$$= 2\pi R^2\frac{n}{n+1}\left(\frac{\Delta p}{2KL}\right)^{1/n} R^{\frac{n+1}{n}}\int\limits_0^1 r^*\left[r^{*\frac{n+1}{n}} - 1\right]\mathrm{d}r^* =$$

$$= -\pi R^2\frac{n}{3n+1}\left(\frac{\Delta p}{2KL}\right)^{1/n} R^{\frac{n+1}{n}}$$

Střední objemová rychlost.

$$\bar{u} = \frac{\dot{V}}{\pi R^2} = -\frac{n}{3n+1}\left(\frac{\Delta p}{2KL}\right)^{1/n} R^{\frac{n+1}{n}}$$

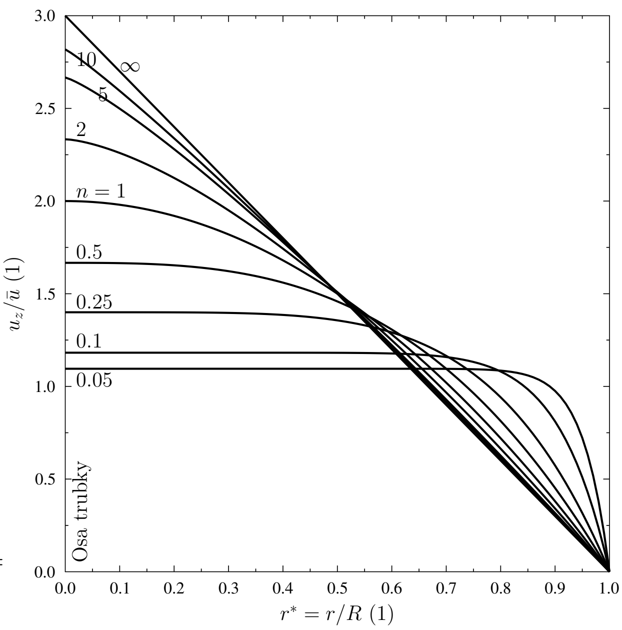
Bezrozměrná rychlost vztažená na střední objemovou rychlost, tj. pro konstantní objemový průtok.

$$u_z^* = \frac{u_z}{\bar{u}} = \frac{3n+1}{n+1}\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{n+1}{n}}\right]$$

Ze vztahu vyjadřujícího radiální profil axiální rychlosti proudění kapaliny v kanále vidíme, že pro kladnou hodnotu tlakové diference $\Delta p > 0$ nabývá rychlostní profil záporných hodnot a tudíž kapalina teče proti směru osy z. To je samozřejmě důsledkem toho, že na konci kanálu je větší tlak než na začátku kanálu. V případě, že by kapalina měla téci ve směru osy z, musela by tlaková diference nabývat záporných hodnot, tj. $\Delta p < 0$. V tomto případě by měl rychlostní profil kladné znaménko. Problémem výpočtu rychlosti z odvozeného vztahu je však fakt, že obecná mocnina záporného čísla není definována. V tomto případě však můžeme vztah jednoduše upravit do tvaru, který umožňuje výpočet i pro záporné hodnoty tlakové diference.

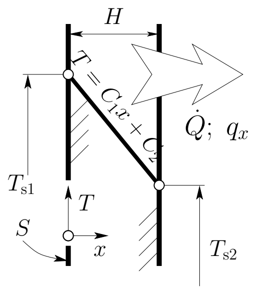
$$u_z = \frac{n}{n+1}\left|\frac{\Delta p}{2KL}\right|^{1/n} R^{\frac{n+1}{n}}\left[\left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{n+1}{n}} - 1\right]\mathrm{sig}\left(\Delta p\right)$$

Operace $\mathrm{sig}\left(\Delta p\right)$ vyjadřuje pouze znaménko tlakové diference. Tento trik je možné použít samozřejmě i v ostatních případech a to zejména v okamžiku, kdy nechceme definovat zobecněnou obecnou mocninu reálného čísla jako novou matematickou operaci.



Přenos tepla/Exaktní řešení

Vedení tepla v rovinné stěně



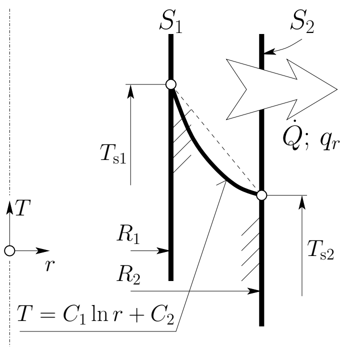
$$T = -\left(T_{s1} - T_{s2}\right)\frac{x}{H} + T_{s1}$$

$$q_x = \frac{\lambda}{H}\left(T_{s1} - T_{s2}\right)$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{H} S\left(T_{s1} - T_{s2}\right)$$

$$0 = \frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}x^2}$$

Vedení tepla ve válcové stěně



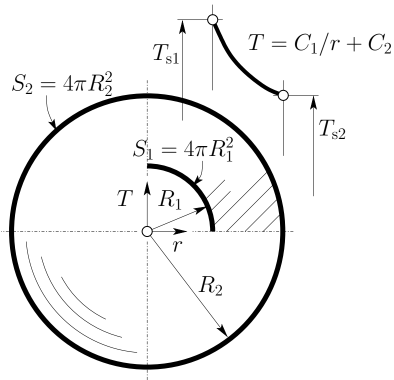
$$\frac{T - T_{s2}}{T_{s1} - T_{s2}} = \frac{\ln r/R_2}{\ln R_1/R_2}$$

$$q_r = \frac{\lambda}{\ln R_2/R_1}\left(T_{s1} - T_{s2}\right)\frac{1}{r}$$

$$\dot{Q} = \frac{2\pi L\lambda}{\ln R_2/R_1}\left(T_{s1} - T_{s2}\right)$$

$$0 = \frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r}\right)$$

Vedení tepla v kulové stěně



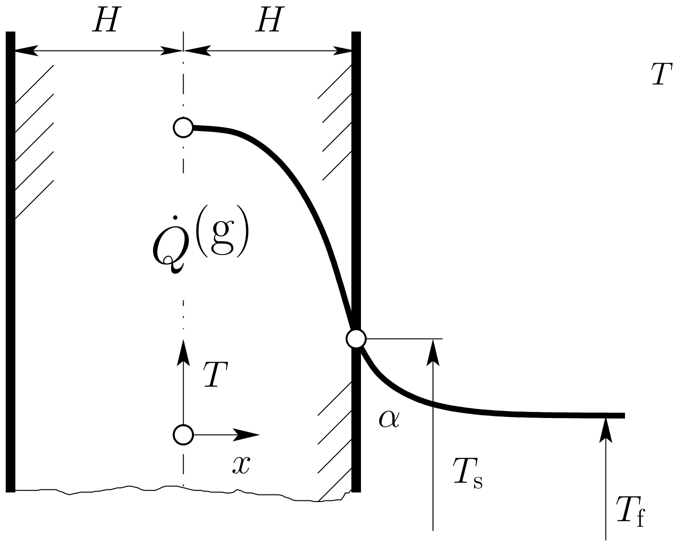
$$\frac{T - T_{s2}}{T_{s1} - T_{s2}} = \frac{1/R_2}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}\left(1 - \frac{R_2}{r}\right)$$

$$q_r = \frac{\lambda}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}\left(T_{s1} - T_{s2}\right)\frac{1}{r^2}$$

$$\dot{Q} = \frac{4\pi\lambda}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}\left(T_{s1} - T_{s2}\right)$$

$$0 = \frac{1}{r^2}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r^2\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r}\right)$$

Vedení tepla v rovinné stěně s objemovým zdrojem tepla



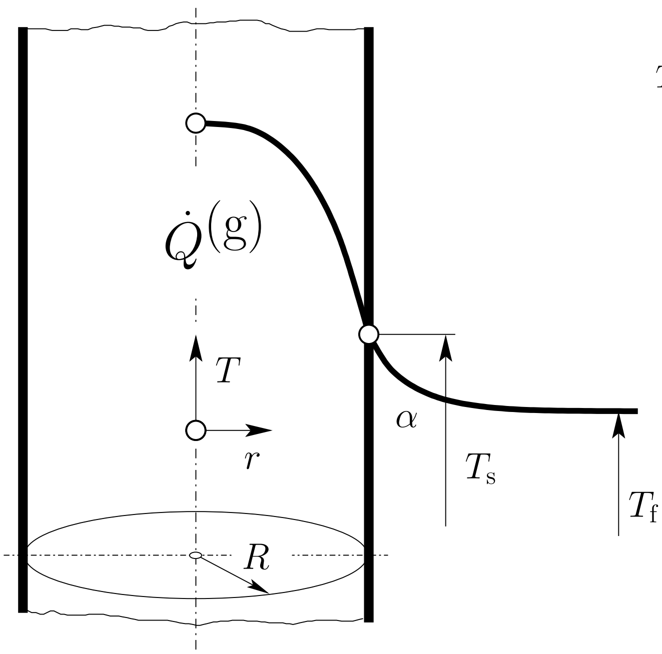
$$T - T_\mathrm{f} = \frac{\dot{Q}^{(\mathrm{g})}}{2\lambda} H^2 \left[1 + \frac{4}{\mathrm{Bi}} - \left(\frac{x}{H}\right)^2\right]$$

$$\mathrm{Bi} = \frac{2\alpha H}{\lambda}$$

$$\left[\dot{Q}^{(\mathrm{g})}\right] = \mathrm{W\,m^{-3}}$$

$$0 = \lambda \frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}x^2} + \dot{Q}^{(\mathrm{g})}$$

Vedení tepla ve válcové stěně s objemovým zdrojem tepla



$$T - T_\mathrm{f} = \frac{\dot{Q}^{(\mathrm{g})}}{4\lambda} R^2 \left[1 + \frac{4}{\mathrm{Bi}} - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]$$

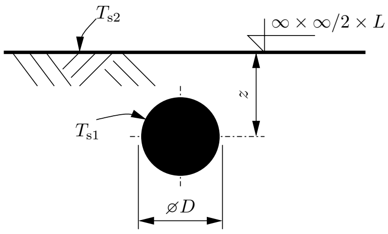
$$\mathrm{Bi} = \frac{2\alpha R}{\lambda}$$

$$\left[\dot{Q}^{(\mathrm{g})}\right] = \mathrm{W\,m^{-3}}$$

$$0 = \lambda \frac{1}{r} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r}\right) + \dot{Q}^{(\mathrm{g})}$$

Dvourozměrné vedení tepla a tvarový součinitel

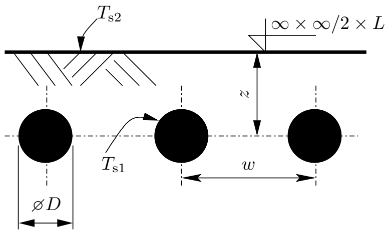
$$\dot{Q} = \lambda \, S_\mathrm{T} \; (T_\mathrm{s1} - T_\mathrm{s2})$$



$$S_\mathrm{T} = \frac{2\,\pi\,L}{\cosh^{-1}\dfrac{2\,z}{D}}$$

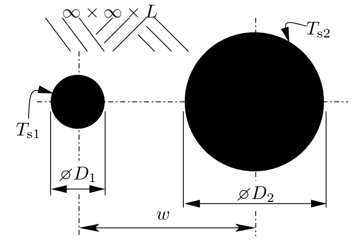
$$L \gg D$$

Vše z [Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc. (2007)] s výjimkou …



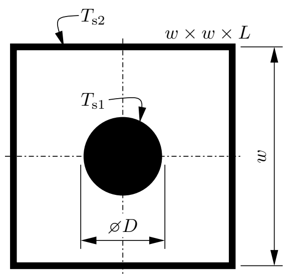
$$S_\mathrm{T} = \frac{2\,\pi\,L}{\ln\left[\dfrac{2\,w}{\pi\,D}\sinh\left(2\pi\dfrac{z}{w}\right)\right]}$$

[Šesták, J., Rieger, F.: Přenos hybnosti, tepla a hmoty, Vydavatelství ČVUT, Praha (1998)]



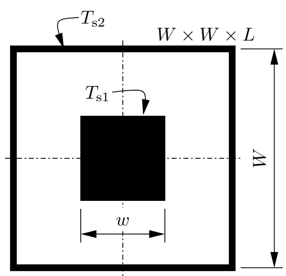
$$S_\mathrm{T} = \frac{2\,\pi\,L}{\cosh^{-1}\left(\dfrac{4\,w^2 - D_1^2 - D_2^2}{2\,D_1 D_2}\right)}$$

$$L \gg D_1,\ D_2$$
$$L \gg w$$



$$S_\mathrm{T} = \frac{2\,\pi\,L}{\ln\dfrac{1{,}08\,w}{D}}$$

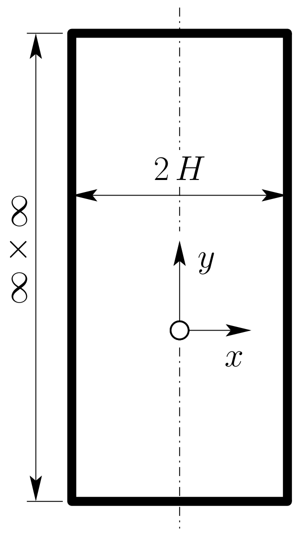
$$L \gg w$$
$$w > D$$



$$S_\mathrm{T} = \frac{2\,\pi\,L}{0{,}785\ln\dfrac{W}{w}}; \quad W/w < 1{,}4; \quad L \gg w$$

$$S_\mathrm{T} = \frac{2\,\pi\,L}{0{,}930\ln\dfrac{W}{w} - 0{,}05}; \quad W/w > 1{,}4; \quad L \gg w$$

Nestacionární vedení tepla v neomezené desce



$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

$$T^* = \frac{T - T_\mathrm{f}}{T_0 - T_\mathrm{f}}$$

$$x^* = \frac{x}{H}$$

$$t^* = \frac{at}{H^2}$$

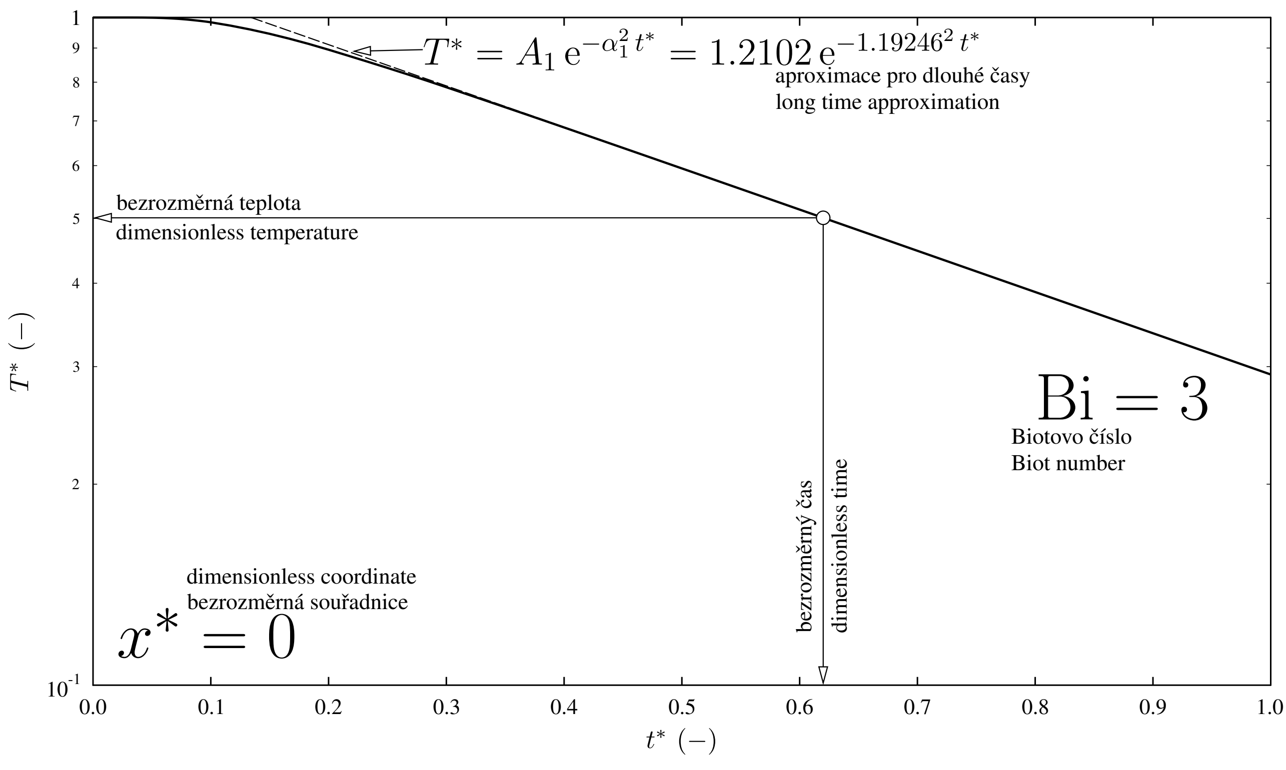
$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha H}{\lambda}$$

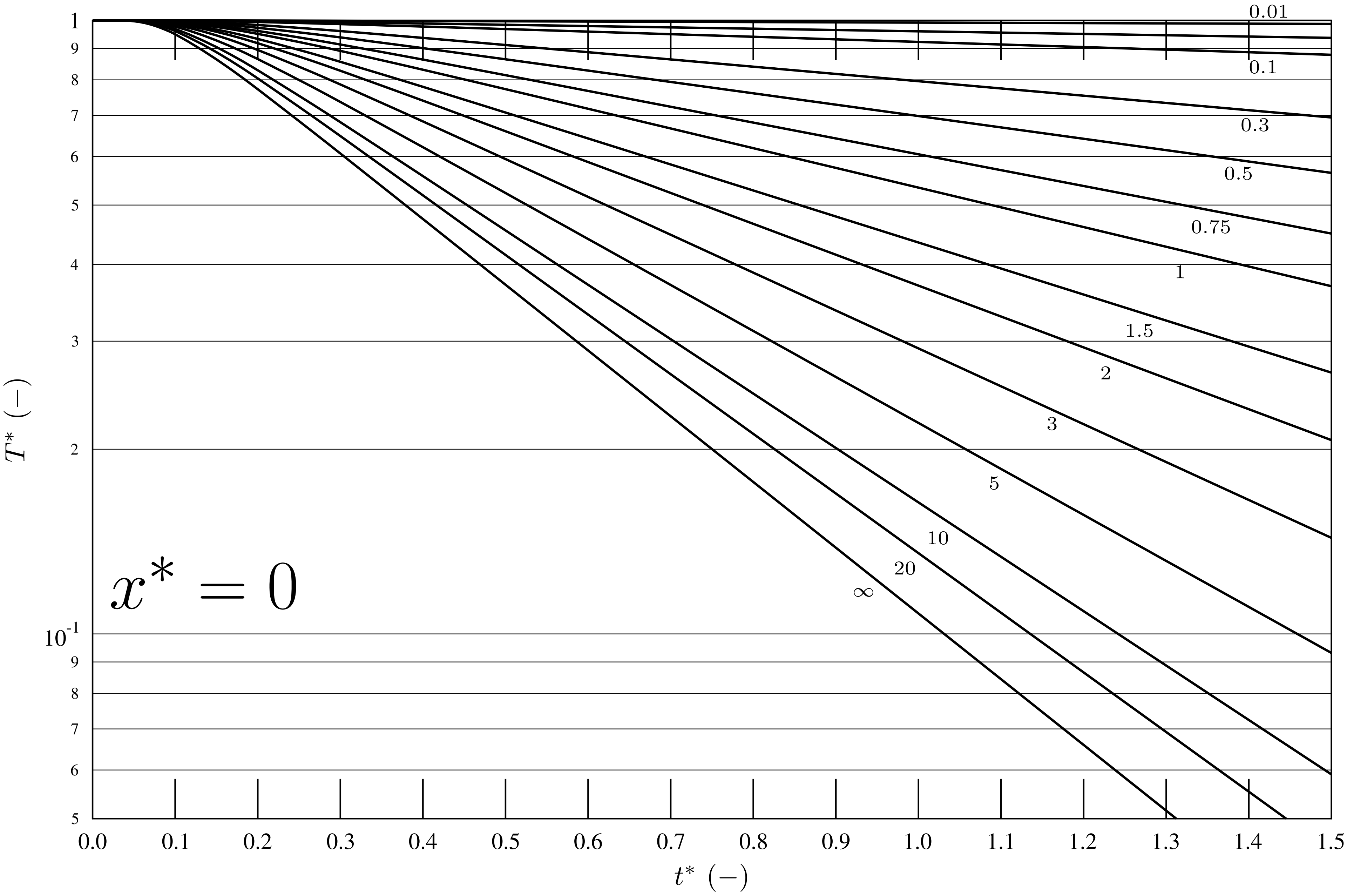
$$T^* = \sum_{j=1}^{\infty} \underbrace{\frac{2 \sin \alpha_j}{\alpha_j + \sin \alpha_j \cos \alpha_j}}_{A_n} \cos\left(\alpha_j x^*\right) \exp\left(-\alpha_j^2 t^*\right)$$

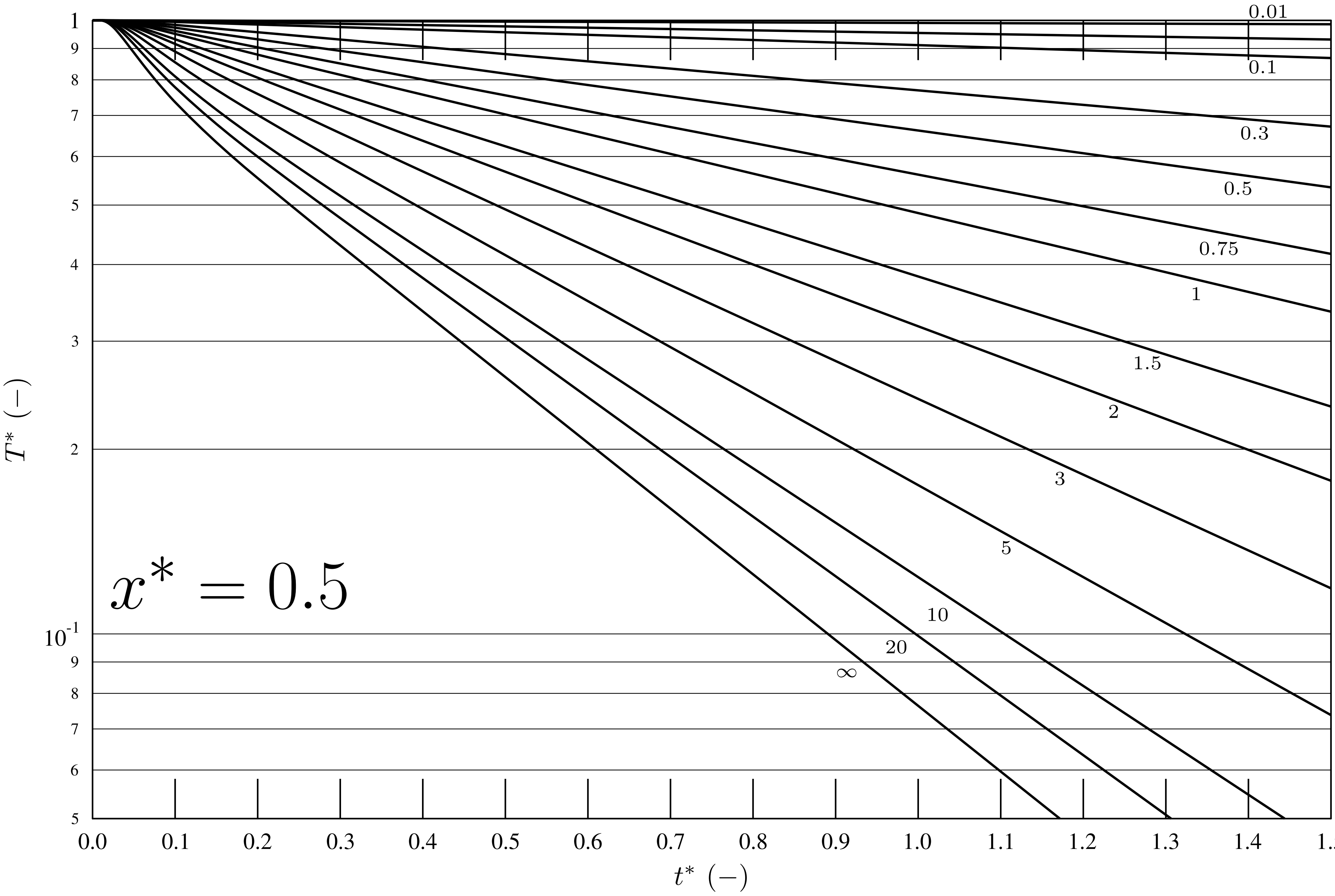
Vlastní číslo (eigenvalue) α_j je řešením rovnice

$$0 = \alpha_j - \mathrm{Bi} \operatorname{cotan} \alpha_j$$

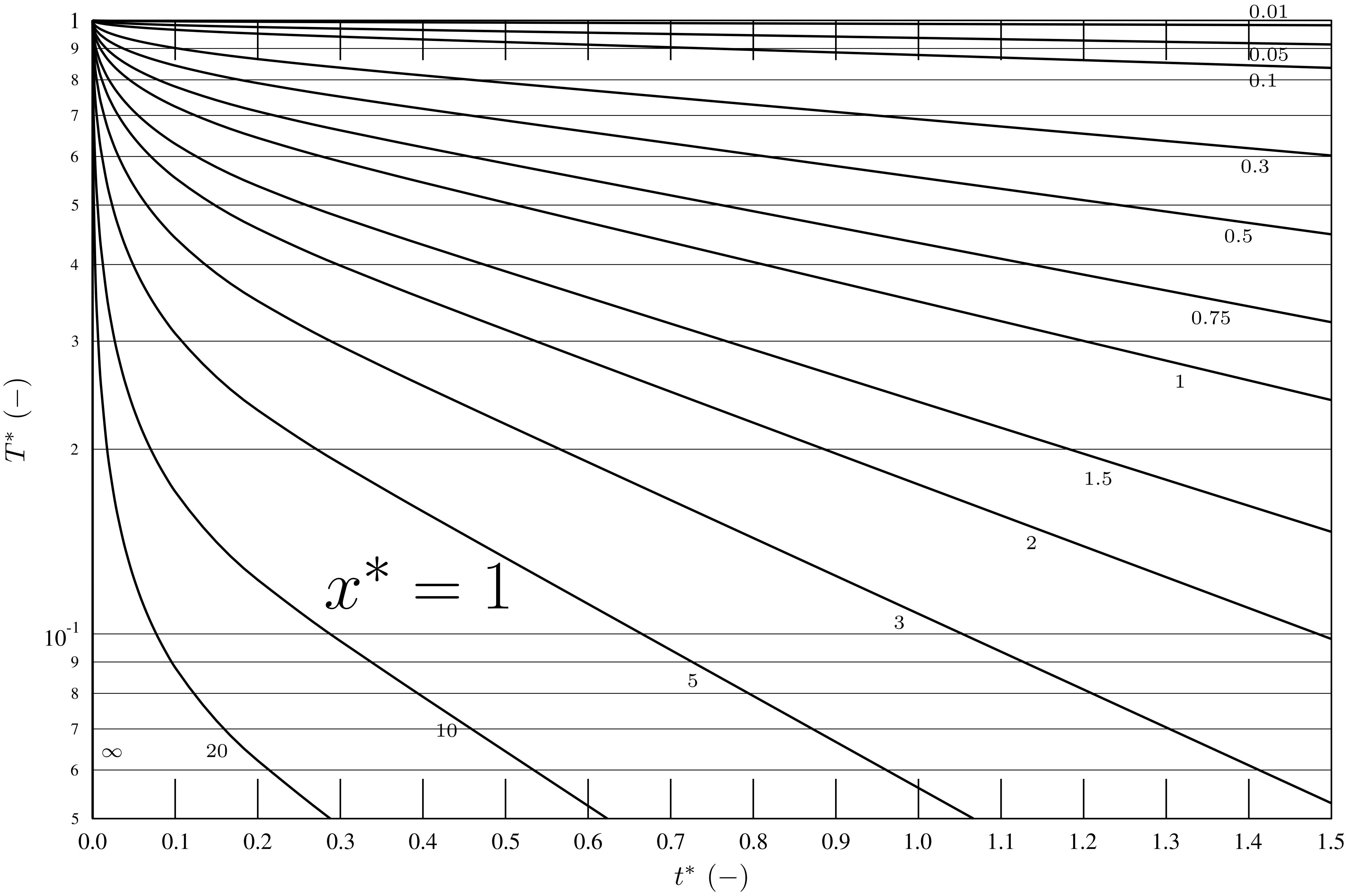
Princip odečítání z grafické závislosti bezrozměrné teploty na bezrozměrném čase pro neomezenou desku, neomezený válec a kouli a řešení pro dlouhé časy




$x^* = 0$
T^* (−)
t^* (−)
1
9
8
7
6
5
4
3
2
10^{-1}
9
8
7
6
5
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
0.01
0.1
0.3
0.5
0.75
1
1.5
2
3
5
10
20
∞

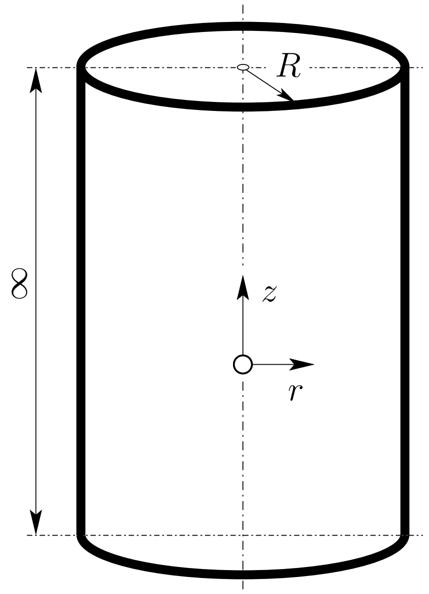


$x^* = 0.5$
T^* (−)
t^* (−)
1
9
8
7
6
5
4
3
2
10^{-1}
9
8
7
6
5
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
0.01
0.1
0.3
0.5
0.75
1
1.5
2
3
5
10
20
∞



x* = 1
T* (−)
t* (−)
0.01
0.05
0.1
0.3
0.5
0.75
1
1.5
2
3
5
10
20
∞
1
9
8
7
6
5
4
3
2
10-1
9
8
7
6
5
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5

Nestacionární vedení tepla v neomezeném válci



$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r}\right)$$

$$T^* = \frac{T - T_\mathrm{f}}{T_0 - T_\mathrm{f}}$$

$$r^* = \frac{r}{R}$$

$$t^* = \frac{at}{R^2}$$

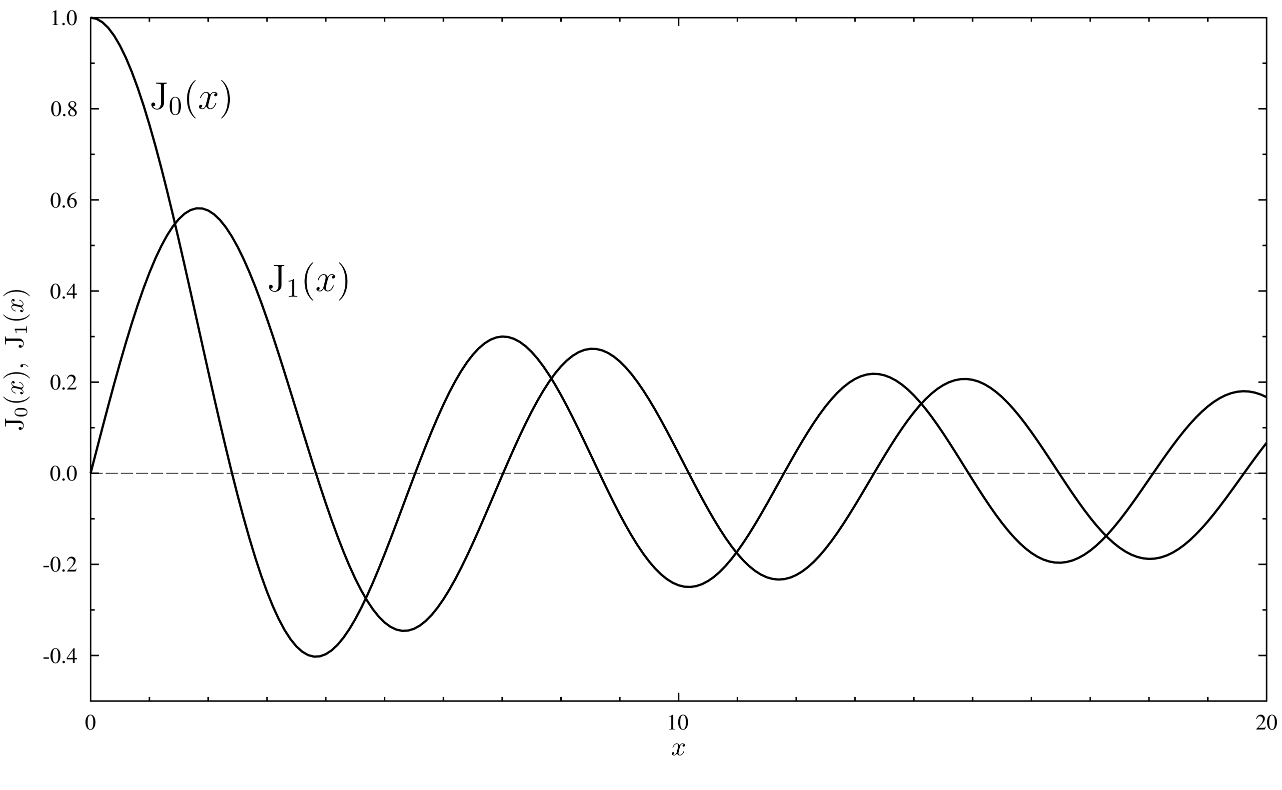
$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha R}{\lambda}$$

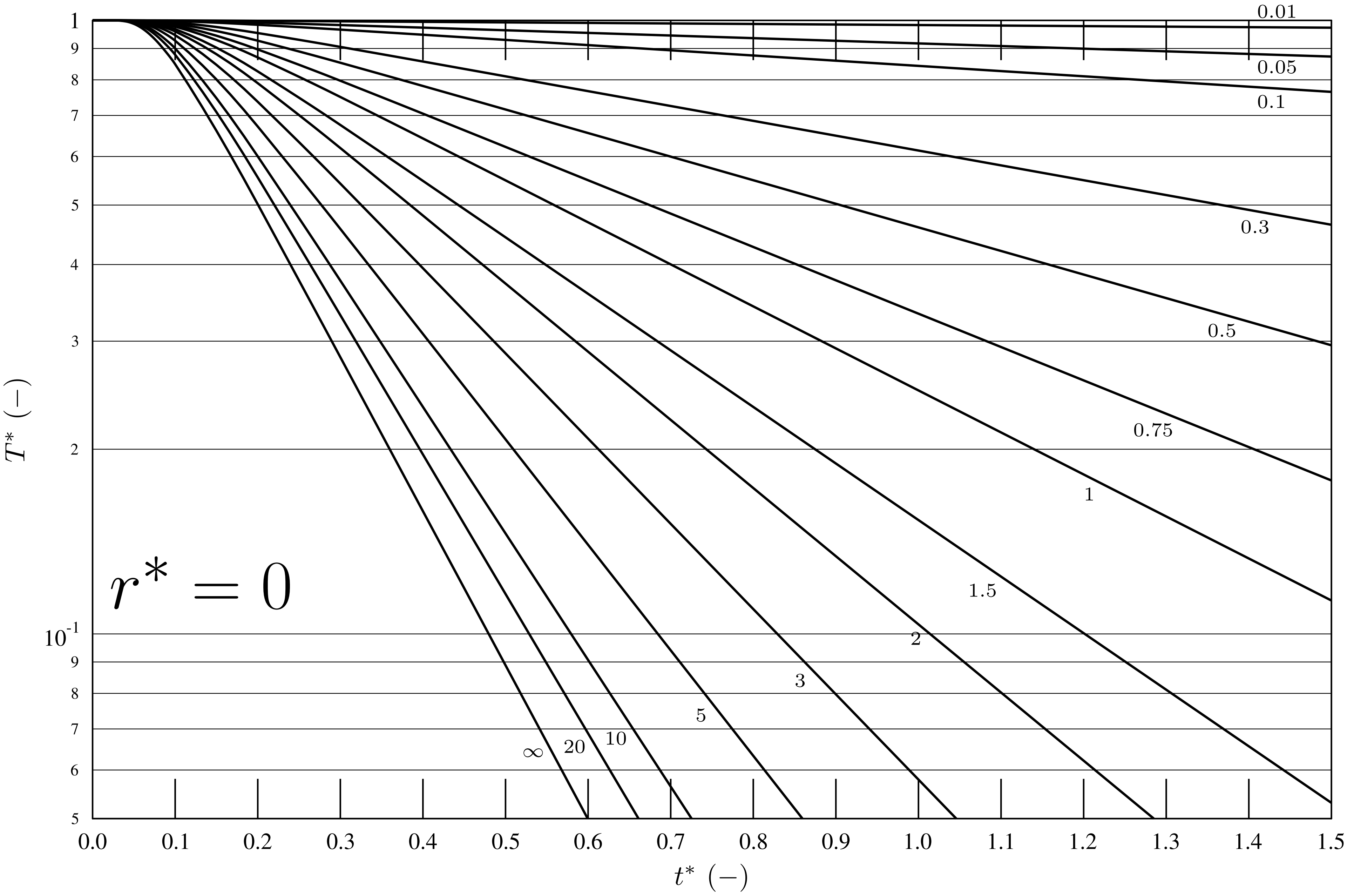
$$T^* = \sum_{j=1}^{\infty} \underbrace{\frac{2}{\alpha_j \mathrm{J}_1(\alpha_j)\left[(\alpha_j/\mathrm{Bi})^2 + 1\right]}}_{A_n} \mathrm{J}_0(\alpha_j r^*) \exp\left(-\alpha_j^2 t^*\right)$$

Vlastní číslo (eigenvalue) α_j je řešením rovnice

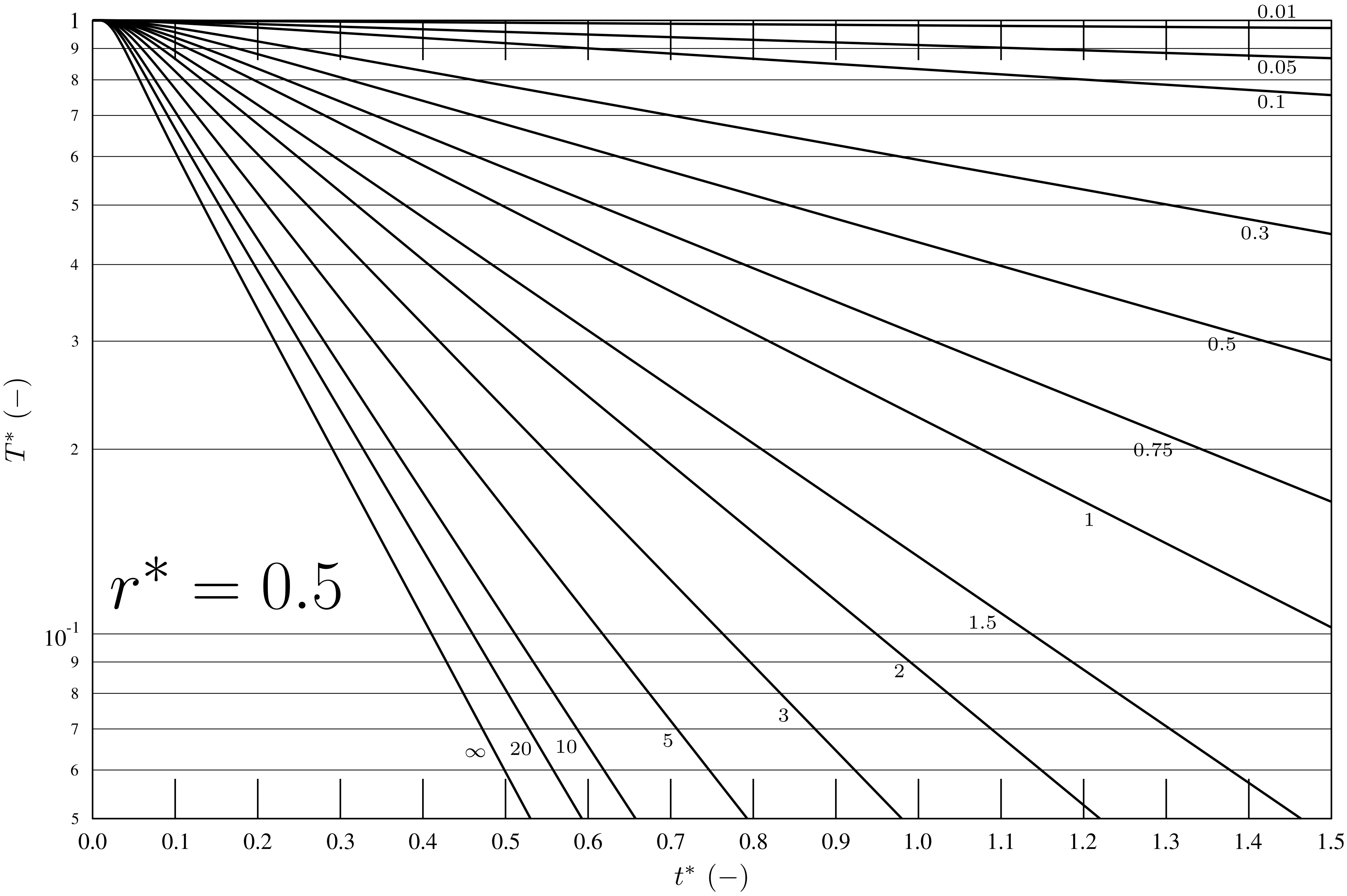
$$0 = \alpha\, \mathrm{J}_1(\alpha_j) - \mathrm{Bi}\, \mathrm{J}_0(\alpha_j)$$

Besselova funkce prvního druhu nultého a prvního řádu

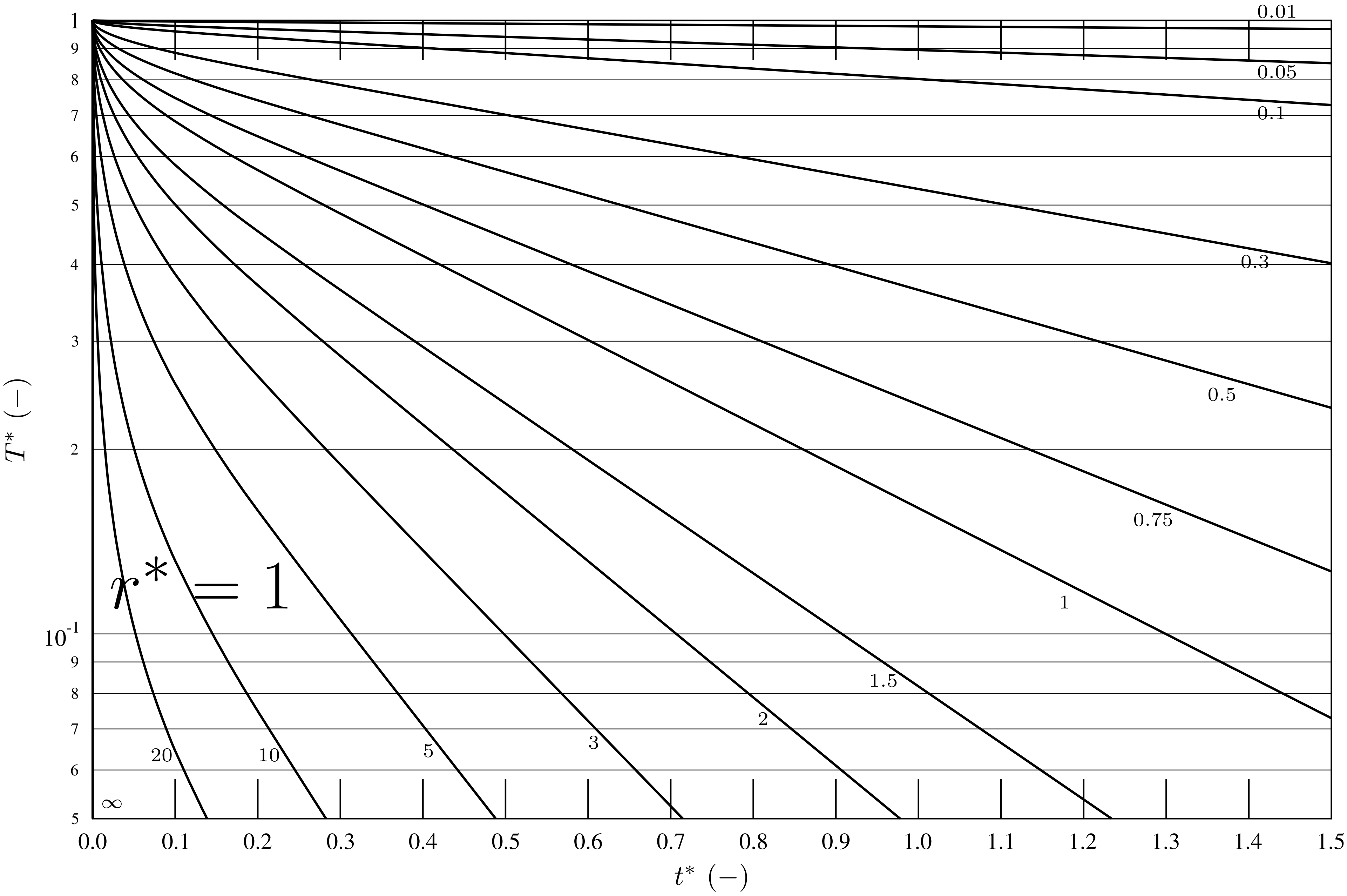




$r^* = 0$
T^* (−)
t^* (−)
1
9
8
7
6
5
4
3
2
10^{-1}
9
8
7
6
5
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
0.01
0.05
0.1
0.3
0.5
0.75
1
1.5
2
3
5
10
20
∞

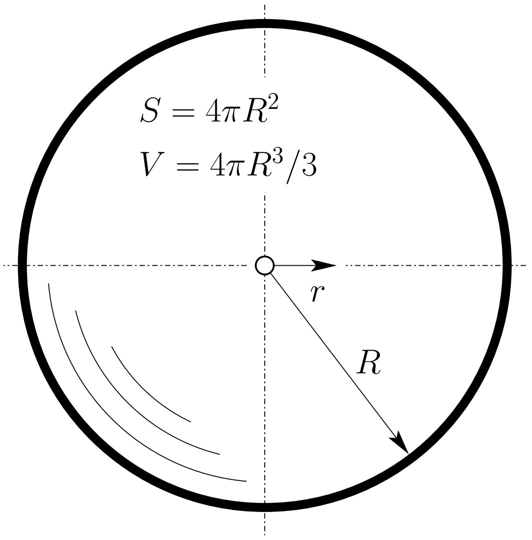


$r^* = 0.5$
0.01
0.05
0.1
0.3
0.5
0.75
1
1.5
2
3
5
10
20
∞
T^* (−)
1
9
8
7
6
5
4
3
2
10^{-1}
9
8
7
6
5
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
t^* (−)



$r^* = 1$
T^* (−)
t^* (−)
1
9
8
7
6
5
4
3
2
10^{-1}
9
8
7
6
5
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
0.01
0.05
0.1
0.3
0.5
0.75
1
1.5
2
3
5
10
20
∞

Nestacionární vedení tepla v kouli



$$T^* = \frac{T - T_\mathrm{f}}{T_0 - T_\mathrm{f}}$$

$$r^* = \frac{r}{R}$$

$$t^* = \frac{at}{R^2}$$

$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha R}{\lambda}$$

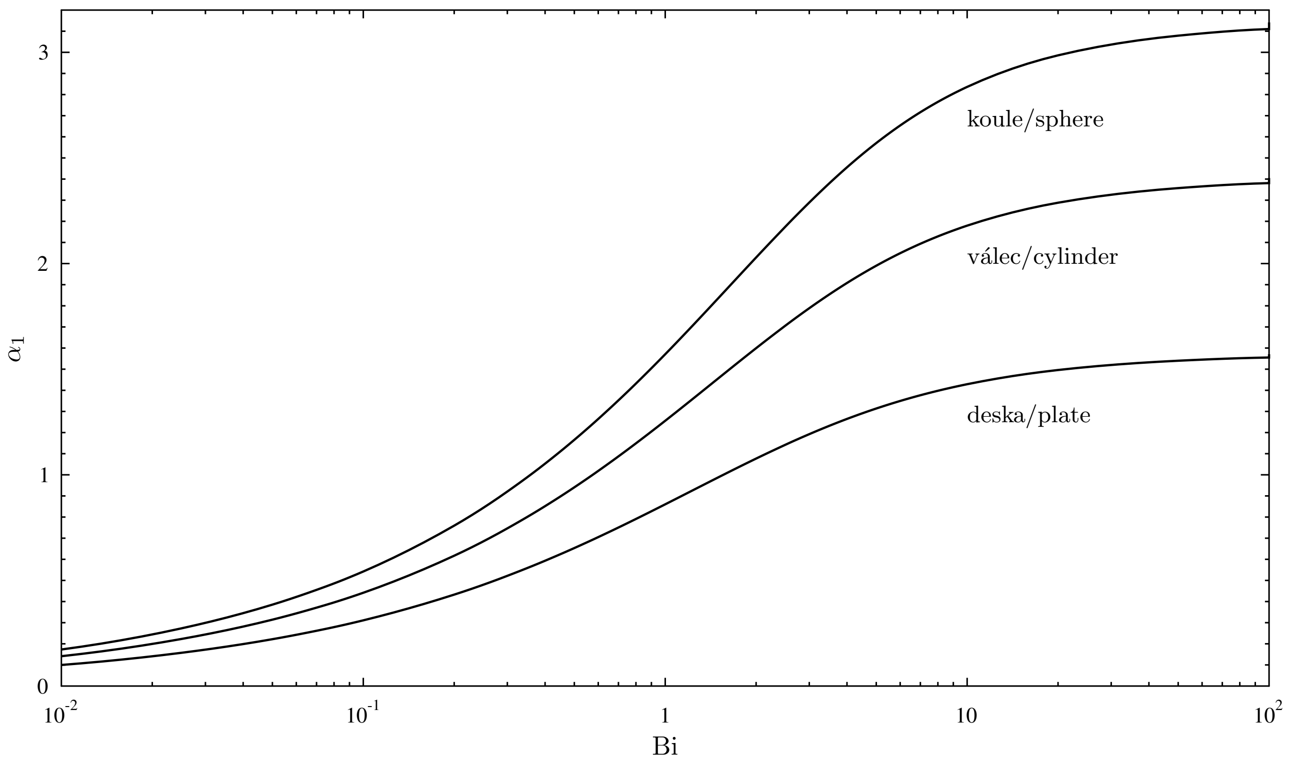
$$T^* = \sum_{j=1}^{\infty} \underbrace{\frac{2\left(\sin\alpha_j - \alpha_j\cos\alpha_j\right)}{\alpha_j - \sin\alpha_j\cos\alpha_j}}_{A_n} \frac{\sin\left(\alpha_j r^*\right)}{\alpha_j r^*} \exp\left(-\alpha_j^2 t^*\right)$$

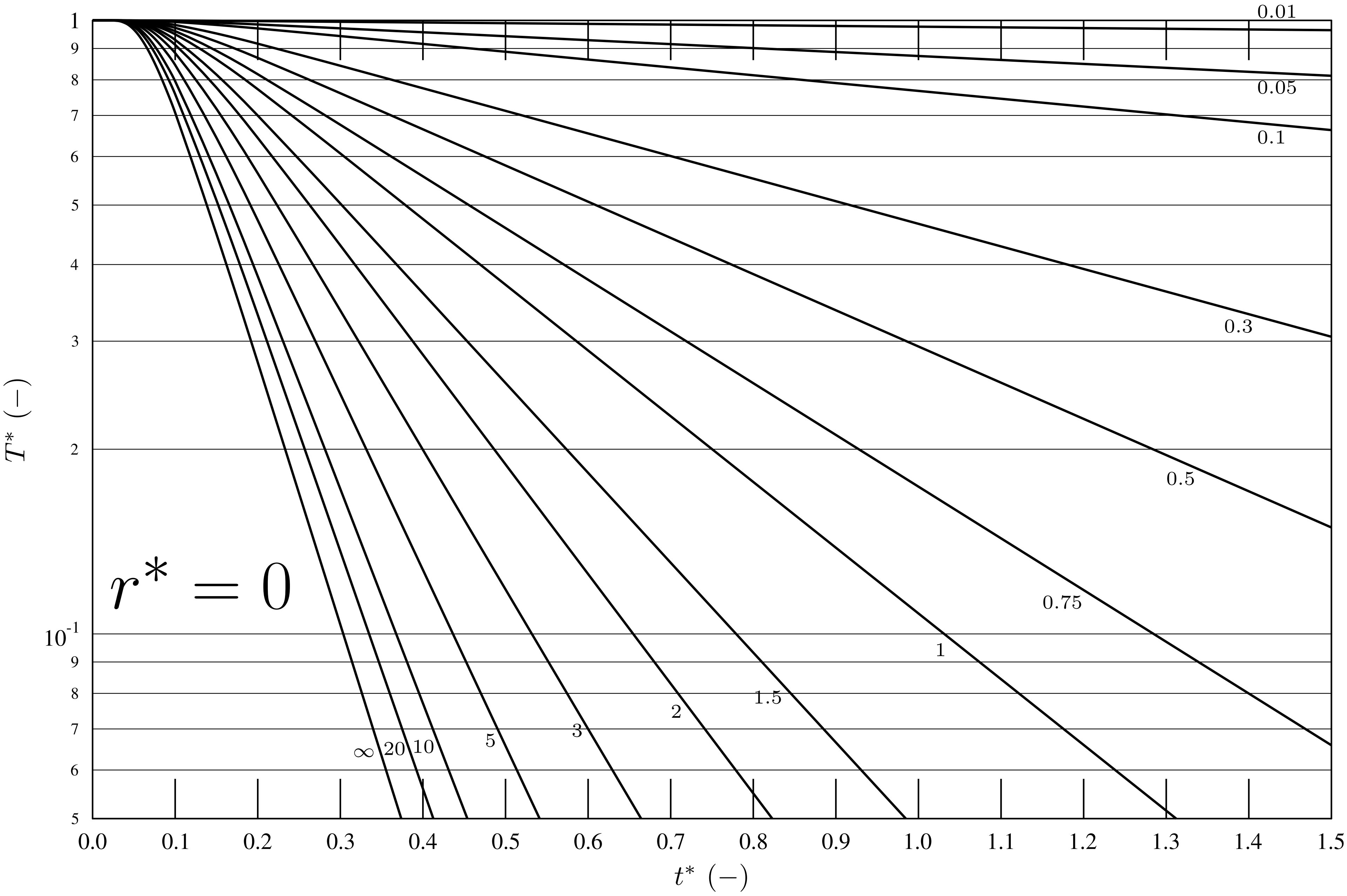
$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\frac{1}{r^2}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r^2\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r}\right)$$

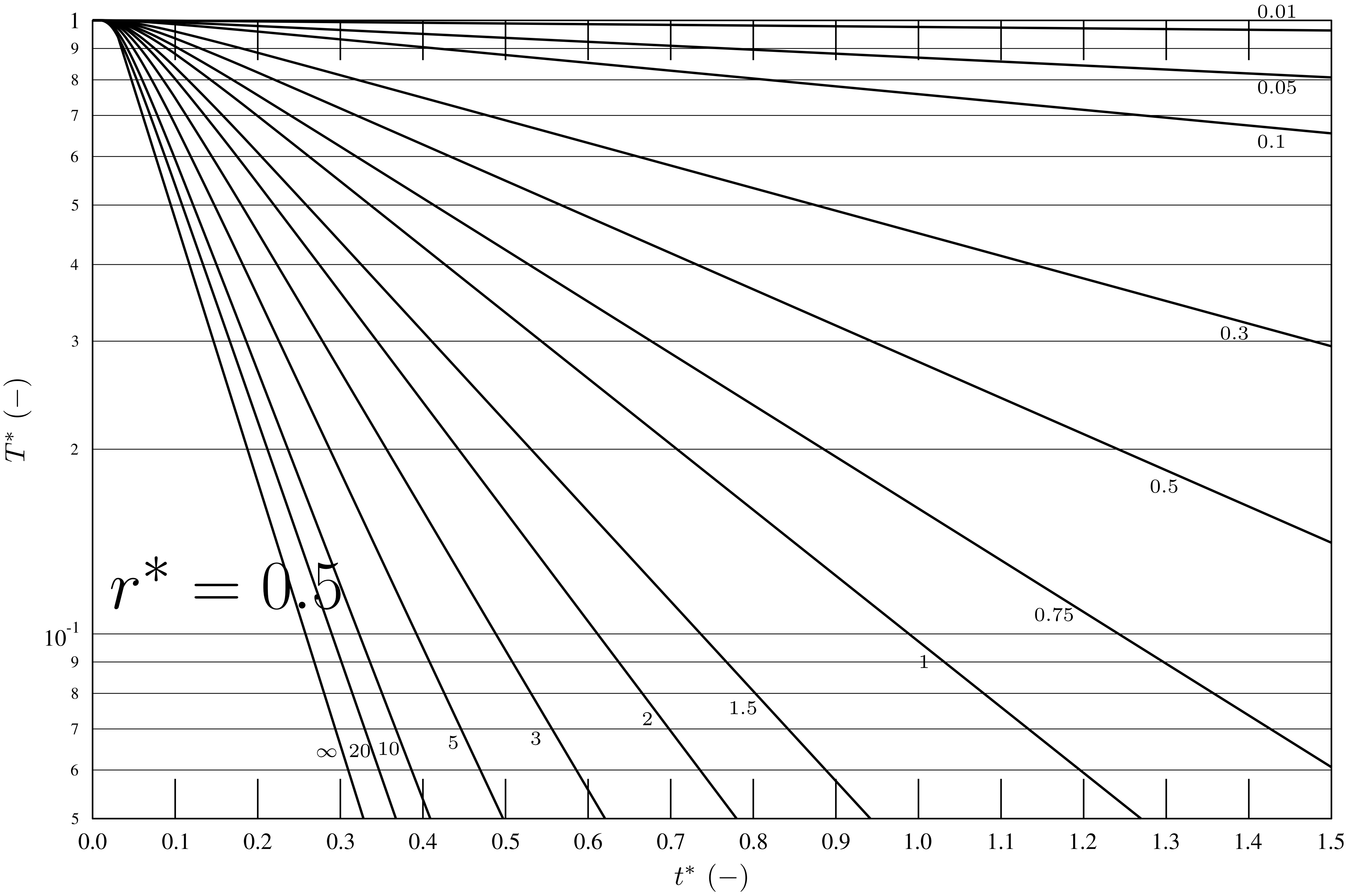
Vlastní číslo (eigenvalue) α_j je řešením rovnice

$$0 = 1 - \mathrm{Bi} - \alpha_j \operatorname{cotan}\alpha_j$$

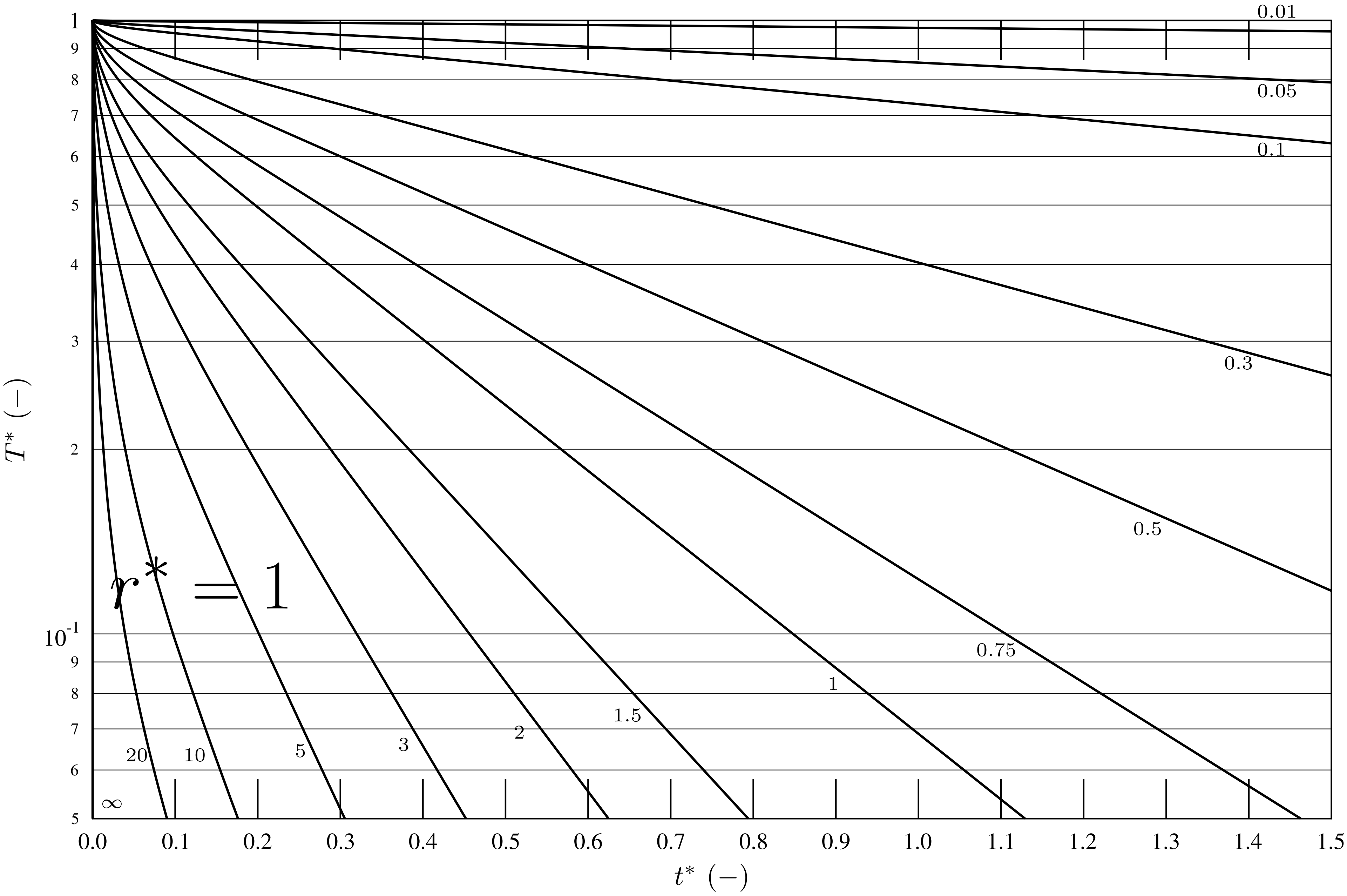
První vlastní číslo charakteristické rovnice pro neomezenou desku, neomezený válec a kouli (viz tabulka Aproximace pro dlouhé časy)




$r^* = 0$
T^* (−)
t^* (−)
1
9
8
7
6
5
4
3
2
10^{-1}
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
0.01
0.05
0.1
0.3
0.5
0.75
1
1.5
2
3
5
10
20
∞



0.01
0.05
0.1
0.3
0.5
0.75
1
1.5
2
3
5
10
20
∞
$r^* = 0.5$
T^* (−)
1
9
8
7
6
5
4
3
2
10^{-1}
9
8
7
6
5
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
t^* (−)



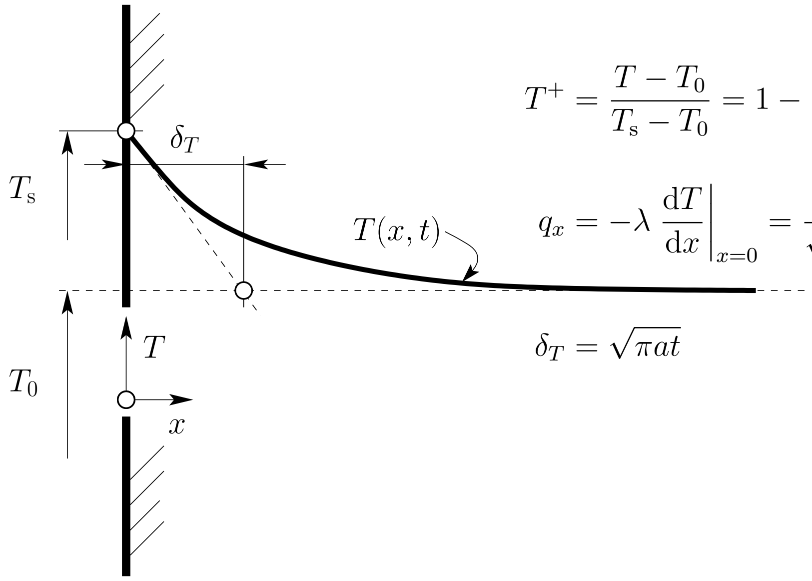
$r^* = 1$
T^* (−)
t^* (−)
0.01
0.05
0.1
0.3
0.5
0.75
1
1.5
2
3
5
10
20
∞
1
9
8
7
6
5
4
3
2
10^{-1}
9
8
7
6
5
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5

Aproximace pro dlouhé časy

	deska		válec		koule	
Bi	α_1	A_1	α_1	A_1	α_1	A_1
0,010	0,09983	1,0017	0,14124	1,0025	0,17303	1,0030
0,025	0,15746	1,0041	0,22291	1,0062	0,27318	1,0075
0,050	0,22176	1,0082	0,31426	1,0124	0,38537	1,0150
0,075	0,27048	1,0122	0,38370	1,0185	0,47080	1,0224
0,100	0,31105	1,0161	0,44168	1,0246	0,54228	1,0298
0,200	0,43284	1,0311	0,61697	1,0483	0,75931	1,0592
0,300	0,52179	1,0450	0,74646	1,0712	0,92079	1,0880
0,400	0,59324	1,0580	0,85158	1,0931	1,05279	1,1164
0,500	0,65327	1,0701	0,94077	1,1143	1,16556	1,1441
0,600	0,70507	1,0814	1,01844	1,1345	1,26440	1,1713
0,700	0,75056	1,0918	1,08725	1,1539	1,35252	1,1978
0,750	0,77136	1,0968	1,11891	1,1633	1,39325	1,2108
0,800	0,79103	1,1016	1,14897	1,1724	1,43203	1,2236
0,900	0,82740	1,1107	1,20484	1,1902	1,50442	1,2488
1,000	0,86033	1,1191	1,25578	1,2071	1,57080	1,2732
1,100	0,89035	1,1270	1,30251	1,2232	1,63199	1,2970
1,200	0,91785	1,1344	1,34558	1,2387	1,68868	1,3201
1,300	0,94316	1,1412	1,38543	1,2533	1,74140	1,3424
1,400	0,96655	1,1477	1,42246	1,2673	1,79058	1,3640
1,500	0,98824	1,1537	1,45695	1,2807	1,83660	1,3850
1,600	1,00842	1,1593	1,48917	1,2934	1,87976	1,4052
1,700	1,02725	1,1645	1,51936	1,3055	1,92035	1,4247
1,800	1,04486	1,1695	1,54769	1,3170	1,95857	1,4436
1,900	1,06136	1,1741	1,57434	1,3279	1,99465	1,4618
2,000	1,07687	1,1785	1,59945	1,3384	2,02876	1,4793
2,500	1,14223	1,1966	1,70602	1,3836	2,17463	1,5578
3,000	1,19246	1,2102	1,78866	1,4191	2,28893	1,6227
3,500	1,23227	1,2206	1,85449	1,4473	2,38064	1,6761
4,000	1,26459	1,2287	1,90808	1,4698	2,45564	1,7202
4,500	1,29134	1,2351	1,95248	1,4880	2,51795	1,7567
5,000	1,31384	1,2402	1,98981	1,5029	2,57043	1,7870
5,500	1,33302	1,2444	2,02162	1,5151	2,61515	1,8124
6,000	1,34955	1,2479	2,04901	1,5253	2,65366	1,8338
6,500	1,36396	1,2508	2,07283	1,5339	2,68713	1,8519
7,000	1,37662	1,2532	2,09373	1,5411	2,71646	1,8673
7,500	1,38782	1,2552	2,11220	1,5473	2,74235	1,8806
8,000	1,39782	1,2570	2,12864	1,5526	2,76536	1,8920
8,500	1,40678	1,2585	2,14336	1,5572	2,78593	1,9020
9,000	1,41487	1,2598	2,15661	1,5611	2,80443	1,9106
9,500	1,42220	1,2610	2,16860	1,5646	2,82113	1,9182
10,000	1,42887	1,2620	2,17950	1,5677	2,83630	1,9249
20,000	1,49613	1,2699	2,28805	1,5919	2,98572	1,9781
50,000	1,54001	1,2727	2,35724	1,6002	3,07884	1,9962
100,000	1,55525	1,2731	2,38090	1,6015	3,11019	1,9990
∞	1,57080	1,2732	2,40483	1,6020	3,14159	2,0000

```
https://www.wolframalpha.com/input/?i=solve+0=x-1*cot(x)
https://www.wolframalpha.com/input/?i=solve0=x*J1(x)-1*J0(x)
https://www.wolframalpha.com/input/?i=solve0=1-1-x*cot(x)
```

Nestacionární vedení tepla v poloneomezeném tělese



$$T^+ = \frac{T - T_0}{T_s - T_0} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int\limits_0^{\frac{x}{2\sqrt{at}}} e^{-\eta^2} d\eta = 1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$$

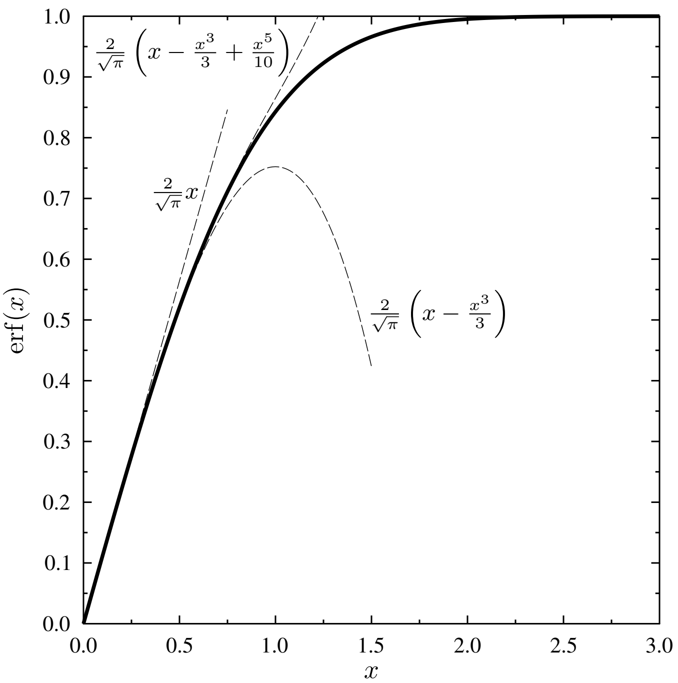
$$q_x = -\lambda \left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0} = \frac{\lambda}{\sqrt{\pi a t}} (T_s - T_0) = \frac{\lambda}{\delta_T} (T_s - T_0)$$

$$\delta_T = \sqrt{\pi a t}$$

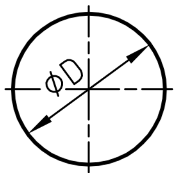
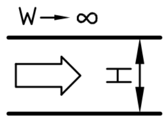
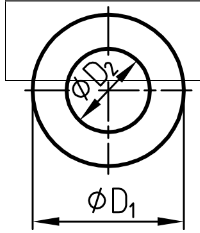
$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Chybová funkce (Gaussova chybová funkce)

```
https://www.wolframalpha.com/input/?i=plot+erf(x)+from+0+to+2
https://www.wolframalpha.com/input/?i=erf(1)
https://www.wolframalpha.com/input/?i=solve+erf(x)=0.5
```

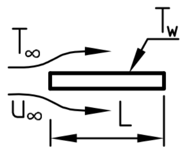
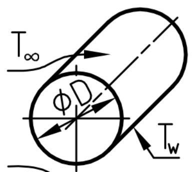
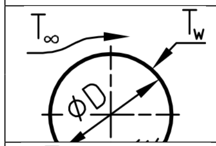
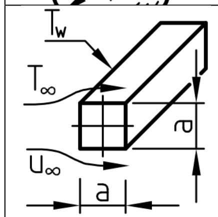


erf(x)	x
0.999	2.3268
0.995	1.9849
0.99	1.8214
0.95	1.3859
0.9	1.1631
0.8	0.9062
0.7	0.7329
0.6	0.5951
0.5	0.4769
0.4	0.3708
0.3	0.2725
0.2	0.1791
0.1	0.0889

Geometrie	Korelace	Char. roz.	Char. teplota	Omezení	Poznámka
Nucená konvekce v potrubí					
	$\mathrm{Nu} = 0{,}027\,\mathrm{Re}^{0{,}8}\mathrm{Pr}^{1/3}$ 0,023 (více konzervativní) Colburn	D	$\frac{1}{2}(T_{in} + T_{out})$	$\mathrm{Re} \geq 10^4 (3 \cdot 10^3)$ $0{,}5 < \mathrm{Pr} < 17000$	$10 < L/D < 60$ $\left[1 + (D/L)^{2/3}\right]$ Sieder–Tate $(\bar{\mu}/\mu_w)^{0{,}14}$
	$\mathrm{Nu} = 0{,}015\,\mathrm{Re}^{0{,}83}\mathrm{Pr}^{0{,}42}$ Whitaker	D	$\frac{1}{2}(T_{in} + T_{out})$	$2300 < \mathrm{Re} < 10^5$ $0{,}48 < \mathrm{Pr} < 592$	Sieder–Tate $(\bar{\mu}/\mu_w)^{0{,}14}$
	$\mathrm{Nu} = 1{,}86\,\mathrm{Gz}^{1/3}$ 1,615 (Leveque pro krátké trubky a konstantní teplotu stěny)	D	$\frac{1}{2}(T_{in} + T_{out})$	$\mathrm{Re} < 2100$ $0{,}5 < \mathrm{Pr} < 17000$ $\mathrm{Nu} > 3{,}72$	Sieder–Tate $(\bar{\mu}/\mu_w)^{0{,}14}$
	$\mathrm{Nu} = 3{,}66 + \dfrac{0{,}0668\,\mathrm{Gz}}{1 + 0{,}04\,\mathrm{Gz}^{2/3}}$ Hausen	D	$\frac{1}{2}(T_{in} + T_{out})$	$\mathrm{Re} < 2300$	Sieder–Tate $(\bar{\mu}/\mu_w)^{0{,}14}$
	$\mathrm{Nu} = 7{,}55 + \dfrac{0{,}024\,\mathrm{Gz}^{1{,}14}}{1 + 0{,}0358\,\mathrm{Gz}^{2/3}}$	$2H$	$\frac{1}{2}(T_{in} + T_{out})$	$\mathrm{Re} < 2200$ $0{,}1 < \mathrm{Pr} < 1000$	
	$\mathrm{Nu} = 3{,}66 + 1{,}2\kappa^{0{,}8} + \dfrac{0{,}19\left[1 + 0{,}14\kappa^{0{,}5}\right]\mathrm{Gz}^{0{,}8}}{1 + 0{,}117\,\mathrm{Gz}^{0{,}467}}$	$D_1 - D_2$	$\frac{1}{2}(T_{in} + T_{out})$	laminární tok	

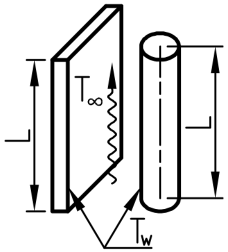
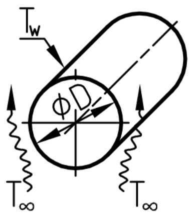
pokračování na další straně

pokračování z předchozí strany

Geometrie	Korelace	Char. roz.	Char. teplota	Omezení	Poznámka
	kde $\kappa = D_2/D_1$; $\mathrm{Gz} = \mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}\,D_e/L$ Gnielinski			v mezikruží	
Externí tok					
	$\mathrm{Nu} = 0{,}664\,\mathrm{Re}^{1/2}\mathrm{Pr}^{1/3}$	L	$\frac{1}{2}(T_\infty + T_w)$	$\mathrm{Re} < 5 \cdot 10^5$ $0{,}6 < \mathrm{Pr} < 60$	
	$\mathrm{Nu} = (0{,}037\,\mathrm{Re}^{0{,}8} - 870)\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	L	$\frac{1}{2}(T_\infty + T_w)$	$5 \cdot 10^5 < \mathrm{Re} < 10^8$ $0{,}6 < \mathrm{Pr} < 60$	
	$\mathrm{Nu} = 0{,}3 + \dfrac{0{,}62\,\mathrm{Re}^{1/2}\mathrm{Pr}^{1/3}}{[1 + (0{,}4/\mathrm{Pr})^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\dfrac{\mathrm{Re}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$	D	$\frac{1}{2}(T_\infty + T_w)$	$\mathrm{RePr} > 0{,}2$	
	$\mathrm{Nu} = 0{,}25 + \left(0{,}4\,\mathrm{Re}^{1/2} + 0{,}06\,\mathrm{Re}^{2/3}\right)\mathrm{Pr}^{0{,}4}$	D	T_∞	$1 < \mathrm{Re} < 10^5$ $0{,}67 < \mathrm{Pr} < 300$	Sieder–Tate $(\mu_\infty/\mu_w)^{0{,}25}$
	$\mathrm{Nu} = 2 + \left(0{,}4\,\mathrm{Re}^{1/2} + 0{,}06\,\mathrm{Re}^{2/3}\right)\mathrm{Pr}^{0{,}4}$	D	T_∞	$3{,}5 < \mathrm{Re} < 8 \cdot 10^4$ $0{,}7 < \mathrm{Pr} < 380$	Sieder–Tate $(\mu_\infty/\mu_w)^{0{,}25}$
	$\mathrm{Nu} = 0{,}102\,\mathrm{Re}^{0{,}675}\mathrm{Pr}^{1/3}$	a	$\frac{1}{2}(T_\infty + T_w)$	$5000 < \mathrm{Re} < 10^5$	

pokračování na další straně

pokračování z předchozí strany

Geometrie	Korelace	Char. roz.	Char. teplota	Omezení	Poznámka
Volná konvekce					
	$\mathrm{Nu} = \left\{0{,}825 + \frac{0{,}387\,\mathrm{Ra}^{1/6}}{\left[1+(0{,}492/\mathrm{Pr})^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2$	L	$\frac{1}{2}(T_\infty + T_w)$	$0{,}1 \leq \mathrm{Ra} \leq 10^{12}$	$\mathrm{Nu}_{cyl}/\mathrm{Nu}_{plate} = \left[1 + 1{,}43\left(\frac{L}{D\mathrm{Gr}^{0{,}25}}\right)^{0{,}9}\right]$
	$\mathrm{Nu} = 0{,}59\,\mathrm{Ra}^{1/4}$	L	$\frac{1}{2}(T_\infty + T_w)$	$10^4 \leq \mathrm{Ra} \leq 10^9$	
	$\mathrm{Nu} = 0{,}1\,\mathrm{Ra}^{1/3}$	L	$\frac{1}{2}(T_\infty + T_w)$	$10^9 \leq \mathrm{Ra} \leq 10^{13}$	experiment
	$\mathrm{Nu} = \left\{0{,}6 + \frac{0{,}387\,\mathrm{Ra}^{1/6}}{\left[1+(0{,}559/\mathrm{Pr})^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2$	D	$\frac{1}{2}(T_\infty + T_w)$	$10^5 \leq \mathrm{Ra} \leq 10^{12}$	
	$\mathrm{Nu} = 0{,}53\,\mathrm{Ra}^{1/4}$	D	$\frac{1}{2}(T_\infty + T_w)$	$10^4 \leq \mathrm{Ra} \leq 10^9$	
	$\mathrm{Nu} = 0{,}13\,\mathrm{Ra}^{1/3}$	D	$\frac{1}{2}(T_\infty + T_w)$	$10^9 \leq \mathrm{Ra} \leq 10^{12}$	experiment

Termofyzikální vlastnosti

Vzduch*)

T (°C)	$\varrho\ (\mathrm{kg\,m^{-3}})$	$c_p\ (\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}})$	$\lambda\ (\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}})$	$\nu\ (\mathrm{m^2\,s^{-1}})$	$\beta\ (\mathrm{K^{-1}})$
0	1,2760	1006	0,0241	$13{,}5 \cdot 10^{-6}$	$3{,}67 \cdot 10^{-3}$
20	1,1887	1006	0,0256	$15{,}3 \cdot 10^{-6}$	$3{,}43 \cdot 10^{-3}$
40	1,1119	1006	0,0270	$17{,}2 \cdot 10^{-6}$	$3{,}20 \cdot 10^{-3}$
60	1,0456	1007	0,0285	$19{,}2 \cdot 10^{-6}$	$3{,}00 \cdot 10^{-3}$
80	0,9867	1009	0,0299	$21{,}2 \cdot 10^{-6}$	$2{,}83 \cdot 10^{-3}$
100	0,9334	1011	0,0314	$23{,}8 \cdot 10^{-6}$	$2{,}68 \cdot 10^{-3}$
200	0,7359	1026	0,0385	$35{,}0 \cdot 10^{-6}$	$2{,}11 \cdot 10^{-3}$
300	0,6076	1047	0,0447	$48{,}5 \cdot 10^{-6}$	$1{,}75 \cdot 10^{-3}$
400	0,5173	1068	0,0502	$63{,}4 \cdot 10^{-6}$	$1{,}49 \cdot 10^{-3}$
500	0,4504	1093	0,0555	$79{,}5 \cdot 10^{-6}$	
600	0,3988	1114	0,0607	$96{,}8 \cdot 10^{-6}$	
700	0,3578	1137	0,0660	$115 \cdot 10^{-6}$	
800	0,3244	1160	0,0706	$135 \cdot 10^{-6}$	
900	0,2970	1182	0,0750	$155 \cdot 10^{-6}$	
1000	0,2730	1193	0,0791	$175 \cdot 10^{-6}$	

*) Transportní a termodynamické vlastnosti suchého vzduchu při tlaku 101325 Pa. Podle Šesták, J., Bukovský, J., Houška, M. Tepelné pochody. Transportní a termodynamická data, Vydavatelství ČVUT, Praha (1986). V posledním sloupci je uveden součinitel objemové teplotní roztažnosti, který vystupuje například v Grashoffově čísle Gr.

Voda**)

T (°C)	$\varrho\ (\mathrm{kg\,m^{-3}})$	$c_p\ (\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}})$	$\lambda\ (\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}})$	$\nu\ (\mathrm{m^2\,s^{-1}})$	$\beta\ (\mathrm{K^{-1}})$
0	999,8	4218	0,569	$1{,}751 \cdot 10^{-6}$	$-0{,}07 \cdot 10^{-3}$
10	999,7	4192	0,587	$1{,}304 \cdot 10^{-6}$	$0{,}088 \cdot 10^{-3}$
20	998,2	4182	0,604	$1{,}004 \cdot 10^{-6}$	$0{,}206 \cdot 10^{-3}$
30	995,7	4178	0,618	$0{,}801 \cdot 10^{-6}$	$0{,}303 \cdot 10^{-3}$
40	992,2	4178	0,632	$0{,}658 \cdot 10^{-6}$	$0{,}385 \cdot 10^{-3}$
50	988,0	4181	0,643	$0{,}553 \cdot 10^{-6}$	$0{,}457 \cdot 10^{-3}$
60	983,2	4184	0,654	$0{,}474 \cdot 10^{-6}$	$0{,}523 \cdot 10^{-3}$
70	977,8	4190	0,662	$0{,}413 \cdot 10^{-6}$	$0{,}585 \cdot 10^{-3}$
80	971,8	4196	0,669	$0{,}365 \cdot 10^{-6}$	$0{,}643 \cdot 10^{-3}$
90	965,3	4205	0,676	$0{,}326 \cdot 10^{-6}$	$0{,}698 \cdot 10^{-3}$
100	958,4	4216	0,682	$0{,}295 \cdot 10^{-6}$	$0{,}753 \cdot 10^{-3}$

**) Termofyzikální parametry vody na dolní mezní křivce. Pro teploty 0 – 100°C při tlaku 101325 Pa. Podle Šesták, J., Bukovský, J., Houška, M. Tepelné pochody. Transportní a termodynamická data, Vydavatelství ČVUT, Praha (1986). V posledním sloupci je uveden součinitel objemové teplotní roztažnosti, který vystupuje například v Grashoffově čísle Gr.

Vlastnosti některých látek

	$\varrho_{20\ ^\circ\mathrm{C}}$ $\mathrm{kg\,m^{-3}}$	$c_{p,20\ ^\circ\mathrm{C}}$ $\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$	$\lambda_{20\ ^\circ\mathrm{C}}$ $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$
hliník	2710	902	236
dural (96 % Al, 4 % Cu, Mg)	2790	881	169
měď	8930	386	398
hliníkový bronz (90 % Cu, 10 % Al)	8360	420	56
bronz (89 % Cu, 11 % Sn)	8800	343	24,8
mosaz (70 % Cu, 30 % Zn)	8440	377	109
zlato	19300	127	315
olovo	11340	128	35,3
nikl	8900	444	91,4
platina	21450	133	71,4
stříbro	10500	234	427
cín	7310	228	67
titan	4500	520	22
wolfram	19350	134	179
uran	19070	116	27,4
cihly (suché)	1760 – 1800	840	0,38 – 0,57
sklo	2710	840	0,76
šamot	2000 – 2050	960	1,22 – 1,35 (400 °C)

Šesták, J., Bukovský, J., Houška, M. Tepelné pochody. Transportní a termodynamická data, Vydavatelství ČVUT, Praha (1986).

Tlak nasycených par

$$\left.\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T}\right|_{\mathrm{fr}} = \frac{\Delta h^{\mathrm{fr}}}{T\Delta v^{\mathrm{fr}}} \qquad \left.\frac{\mathrm{d}\ln p}{\mathrm{d}T}\right|_{\mathrm{lg}} = \frac{\Delta \tilde{H}^{\mathrm{lg}}}{\mathrm{R}T^2} \qquad \ln p'' = A - \frac{B}{T+C} \quad (\mathrm{Pa,\ K})$$

	$\mathcal{M}$ $\mathrm{kg\,mol^{-1}}$	$\varrho_{T_{\mathrm{ref}}}$ $\mathrm{kg\,m^{-3}}$	T_{ref} K	A	B	C
H_2O	0,018015	998	293,15	23,1964	3816,44	−46,13
CO	0,028010	803	81	19,2614	530,22	−13,15
NH_3	0,017031	639	273,15	21,8409	2132,5	−32,98
N_2H_4	0,032045	1008	293,15	22,8827	3877,65	−45,15
CH_4	0,016043	425	111,7	20,1171	897,84	−7,16
C_8H_{18}	0,114232	692	293,15	20,5778	2896,28	−52,41
C_6H_6	0,078114	885	289,15	20,7936	2788,51	−52,36
C_2H_5OH	0,046069	789	293,15	23,8047	3803,98	−41,68
CH_3OH	0,032042	791	293,15	23,4803	3626,55	−34,29

Šesták, J., Bukovský, J., Houška, M. Tepelné pochody. Transportní a termodynamická data, Vydavatelství ČVUT, Praha (1986).

11416 ~ P265GH ~ 1.0425

ČSN 41 1416	Nízkouhlíková ocel obvyklých jakostí	OCEL
STN 41 1416	pro vyšší teploty	11 416

Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Cr + Ni + Cu	P	S
max 0,20	min 0,50	max 0,35	max 0,30	max 0,30	max 0,30	max 0,70	max 0,040	max 0,040

Polotovary

[1] předvalky

[2] tlusté plechy válcované za tepla

[3] tyče válcované za tepla

[4] výkovky

Mechanické vlastnosti

Polotovar	[1]		[2]	
Rozměr t, d [mm]	60–130	> 130	≤ 40	40–60
Stav	.0 ¹)		.1	
Mez kluzu R_e nebo $R_p0{,}2$ [MPa] min	225		255	245
Mez pevnosti R_m [MPa]	400–490		400–490	
Tažnost A_5 [%] min	27		napříč 23	napříč 22
Kontrakce Z [%]	–		–	
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm^{-2}] min	–		59	
Vrubová houževnatost KCV [J.cm^{-2}] min	–		35	
Tvrdost HB	–			
Modul pružnosti E [GPa]	206			
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]	–			

Polotovar	[3] [4]			
Rozměr t, d [mm]	≤ 60	60–100	100–150	150–300
Stav	.1 nebo .5			
Mez kluzu R_e nebo $R_p0{,}2$ [MPa] min	235	225	215	205
Mez pevnosti R_m [MPa]	400–490			
Tažnost A_5 [%] min podél	26	25	25	24
Tažnost A_5 [%] min tang.	22	21	21	20
Kontrakce Z [%]	–			
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm^{-2}] min podél	50		–	
Tvrdost HB max	149			
Modul pružnosti E [GPa]	206			
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]	–			

Teplota [°C]	100	200	300	400	500	600
Modul pružnosti E [GPa] za zvýšených teplot	201	191	181	172	162	152

Teplota [°C]	20	100	200	250	300	350	400
Nejnižší mez kluzu R_p 0,2 [MPa]	235	226	206	181	162	127	118
za zvýšených teplot	225	216	196	172	152	127	108
	215	206	181	162	142	118	103
	205	196	172	152	132	113	98

Fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [kg.m^{-3}]	Měrná tepelná kapacita c_p [J.kg^{-1}.K^{-1}]	Teplotní součinitel roztažnosti α [K^{-1}]	Tepelná vodivost λ_t [W.m^{-1}.K^{-1}]	Rezistivita ρ [Ω.m]
7 800	–	11,0.10^{-6}	53,5	–

Odolnost proti degradačním procesům

ODOLNOST PROTI TEČENÍ

Mez pevnosti při tečení v tahu R_{mT} [MPa]

Teplota [°C]	380	400	420	440	460	480	500
$R_{mT}/10^4$	213	181	151	125	100	78	57
$R_{mT}/10^5$	171	141	114	90	67	47	–
$R_{mT}/2.10^5$	159	130	104	80	58	37	–
$R_{mT}/2{,}5.10^5$	155	126	101	77	55	34	–

Mez tečení v tahu R_T [MPa]

Teplota [°C]	380	400	420	440	460	480
$R_T/10^4/1$	164	136	113	91	72	53
$R_T/10^5/1$	118	95	73	57	42	30

Technologické údaje

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

normalizační žíhání	890–920 °C	ochlazovat na vzduchu	
žíhání ke snížení pnutí	600–650 °C	zvolna ochlazovat	
popouštění	600–680 °C	ochlazovat na vzduchu	
teploty přeměn	A_{c1} ~ 710–720 °C		A_{c3} ~ 840–860 °C

TVAŘITELNOST

třída tvařitelnosti za tepla 1

teploty tváření 1 100–850 °C ochlazovat na vzduchu

11416 ~ P265GH ~ 1.0425

SVAŘITELNOST
podle ČSN 05 1309, ČSN 05 1311 – vhodná ke svařování
– uhlíkový ekvivalent $C_e \leq 0{,}38$

doporučený předehřev	t ≤ 25 mm	– bez předehřevu
	t = 25–35 mm	– bez předehřevu při C < 0,18% a přídavném materiálu s nízkým obsahem vodíku (např. bázické elektrody)
	t > 35 mm	– 75–150 °C

Doporučené přídavné materiály pro svařování

plamenem ručně	drát G 42 podle ČSN 05 5322
el. obloukem ručně	E 44.72 (E- K103) podle ČSN 05 5026 E 44.83 (E- B 121) podle ČSN 05 5027
v ochranné atmosféře CO_2	drát P 44.13C (C 113), popř. 44.23 C (C 123) podle ČSN 05 5390
pod tavidlem	drát S1 (A 102) podle ČSN 05 5370 tavidlo FMS 1 (F 102). FMS 2 (F 103), FMS 6 (F 106)

OBROBITELNOST

polotovar	stav	soustružení, hoblování	frézování, vrtání	broušení
[2] [4]	.1	16b	15b	–

TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY
zkouška lámavosti podle ČSN 42 0401

polotovar [3] stav .1	úhel ohybu α = 180	průměr trnu		podél D = 1,5 a tang. D = 2 a
[2] .1	α = 180°		t ≤ 40	D = 1,5 a
			t = 40–60	D = 2 a

Použití

Na součásti kotlů a tlakových nádob podle ČSN 42 0090 a ČSN 69 0010.

Ostatní vlastnosti

Druh oceli podle způsobu výroby	Barevné značení podle ČSN 42 0010	Třída odpadu podle ČSN 42 0030
uklidněná	žlutá–červená	007

Porovnání se zahraničními materiály

ISO		*EURO*		*Německo*	
F 5 F 8 P 7 P 8	ISO 2604/I,IV-75 ISO 2604/I,IV-75 ISO 2604/I,IV-75 ISO 2604/I,IV-75	P 265 GH	EN 10028/2-92	H II P 265 GH	DIN 17155-83 DIN EN 10028-92
Francie		*Velká Británie*		*Rusko*	
A 42 AP A 42 CP	NF A36-205-82 NF A36-205-82	151-400 154-400 161-400 164-400 P 265 GH	BS 1501/1-80 BS 1501/1-80 BS 1501/1-80 BS 1501/1-80 BS EN 10028/2-92	16K 20K	GOST 5520-79 GOST 5520-79
USA		*Japonsko*		*Kanada*	
Gr. A Gr. C Gr. D Gr. 60 Gr. 60	ASTM A662 ASTM A284 ASTM A414 ASTM A442 ASTM A515	SG 295 SGV 410 SGV 450 SGV 480 SPV 315	JIS G3116-90 JIS G3118-87 JIS G3118-87 JIS G3118-87 JIS G3115-90	–	–
Itálie		*Rakousko*		*Švédsko*	
Fe 410KG,KT,KW Fe 410-1KG,KT,KW Fe 410-2KG,KT,KW P 265 GH	UNI 7660-77 UNI 5869-75 UNI 5869-75 UNI EN 10028/2-92	St 41KW	ÖNORM M3121-91	1430 1431 1432	SS 141430 SS 141431 SS 141432
Polsko		*Maďarsko*		*Norsko*	
St 41K	PN H-84024-75	KL 2C	MSZ 1741-89		
Finsko		*Švýcarsko*		*Španělsko*	
–	–	–	–	A 42RCI A 42RCII P 265 GH	UNE 36087/1-78 UNE 36087/1-78 UNE EN 10028-94
Belgie		*Bulharsko*		*Jugoslávie*	
D 42-1 D 42-2 E 42-1	NBN 629-72 NBN 629-72 NBN 630-72	16K	BDS 5930-76	Č. 1204	JUS C.B4.014-77
Rumunsko		–		–	
K 410	STAS 2883/3-88	–		–	

Poznámky

[1]) mechanické vlastnosti se zkoušejí na vzorku překovaném na ∅ 50 mm a normalizačně žíhaném

12021 ~ 1.0305

ČSN 41 2021 / STN 41 2021	Žárupevná uhlíková ocel	OCEL 12 021

Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,07–0,15	0,35–0,60	0,17–0,35	max 0,25	max 0,25	max 0,25	max 0,040	max 0,040

Polotovary

[1] trubky bezešvé
[2] trubky bezešvé přesné

Mechanické vlastnosti

Polotovar	[1] [2]		
Rozměr t, d [mm]	≤12	12–25	25–36
Stav	.1		
Mez kluzu R_e [MPa] min	235	225	215
Mez pevnosti R_m [MPa]	340–470		
Tažnost A_5 [%] min	25		
Kontrakce Z [%]	–		
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm^{-2}] podél min	69		
Tvrdost HB max	147		
Modul pružnosti E [GPa]	206		
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]	–		

Teplota [°C]	100	200	300	400	500	600
Modul pružnosti E [GPa] za zvýšených teplot	199,0	191,0	181,4	171,6	161,8	152,0

Teplota [°C]		100	200	250	300	350	400	425	450
Nejnižší mez kluzu	t ≤12 mm	205	186	166	147	127	107	98	88
R_e [MPa]	t =12–25 mm	205	186	166	137	117	107	98	88
za zvýšených teplot	t =25–36 mm	205	186	166	137	117	107	98	88

Fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [kg.m^{-3}]	Měrná tepelná kapacita c_p [J.kg^{-1}.K^{-1}]	Teplotní součinitel roztažnosti α [K^{-1}]	Tepelná vodivost λ_t [W.m^{-1}.K^{-1}]	Rezistivita ρ [Ω.m]
–	–	11,1.10^{-6}	47	–

Odolnost proti degradačním procesům

ODOLNOST PROTI TEČENÍ

Mez pevnosti při tečení v tahu R_{mT} [MPa]

Teplota [°C]	380	400	420	440	460	480	500
R_{mT} /10^4	221	181	148	118	91	69	51
R_{mT} /10^5	164	127	94	68	46	(33)	–
R_{mT} /2.10^5	146	111	77	53	(36)	–	–

Mez tečení v tahu R_T [MPa]

Teplota [°C]	380	400	420	440	460	480	500
R_T /10^4/1	164	136	113	91	72	53	38
R_T /10^5/1	118	95	74	57	42	30	21

Technologické údaje

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

normalizační žíhání	900–930 °C	ochlazovat na vzduchu
žíhání na měkko	670–700 °C	min 4 h na teplotě, ochlazovat v peci
žíhání ke snížení pnutí	600–650 °C	ochlazovat v peci
teploty přeměn	A_{c1} ~710–720 °C	A_{c3} ~850–880 °C

TVAŘITELNOST

teploty tváření 1 100–850 °C ochlazovat na vzduchu

SVAŘITELNOST

podle ČSN 05 1310 – zaručená – pro t ≤25 mm
– zaručená podmíněná – teplota předehřevu 150–200 °C – pro t >25 mm

doporučené přídavné materiály pro svařování

el. obloukem ručně	E 44.71 (ČSN 05 5037)
automatem pod tavidlem	drát A 302 (ČSN 05 5373) s tavidlem Z 41 (ČSN 05 5711)
v ochranné atmosféře	drát E 44.23C (ČSN 05 5390)
plamenem	drát (ČSN 05 5323)

OBROBITELNOST	soustružení, hoblování	frézování, vrtání	broušení
polotovar [1] [2] stav .1	16b	15b	–

TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY

zkouška smáčknutím podle ČSN 42 0415

vzdálenost tlačných desek $H = \frac{1{,}09 \,.\, D \,.\, a}{0{,}09\, D + a}$

zkouška rozšiřováním podle ČSN 42 0415

d/D	0,9	0,8	0,7	0,6
$\frac{D_n - D}{D}$. 100 [%]	16	17	18	19

Použití

Ocel má zaručenou minimální hodnotu meze kluzu za zvýšených teplot, je vhodná na potrubí, součásti energetických a chemických zařízení podle ČSN 13 0020, ČSN 42 0090 a ČSN 69 0010.

17240 ~ 1.4301 ~ AISI 304 ~ X5CrNi18-10

ČSN 41 7240	Korozivzdorná austentická ocel	OCEL 17 240

Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
max 0,07	max 2,0	max 1,0	17,0–20,0	9,0–11,5	max 0,045	max 0,030

Polotovary

[1] tyče
[2] plechy
[3] trubky bezešvé
[4] tlusté plechy

Mechanické vlastnosti

Polotovar	[1]			[2]	
Rozměr t, d [mm]	< 60	60–100	100–150	< 10	10–30
Stav	.4			.4	
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa] min	186			186	
Mez pevnosti R_m [MPa]	490–686			490–686	
Tažnost A_5 [%] min	50	45	40	37	34
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm^{-2}] min	podél 196	podél 137 napříč 98	podél 98 napříč 68	–	podél 137 napříč 98

Polotovar	[3]	[4]
Rozměr t, d [mm]	do 89	30–80
Stav	.4	.4
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa]	186	181
Mez pevnosti R_m [MPa]	490–735	481–672
Tažnost A_5 [%]	40	37
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm^{-2}] min	–	podél 132 napříč 98

Modul pružnosti E [GPa] za zvýšených teplot	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
	199	194	186	179	172	164	–

Nejnižší mez kluzu R_p 0,2 [MPa] za zvýšených teplot	20 °C	50 °C	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	400 °C
	186	177	157	142	127	118	109	98

Fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [kg.m^{-3}] . 10^3 při 20 °C	Měrná tepelná kapacita c_p [J-kg^{-1} . K^{-1}]	Tepelná vodivost λ_t [W.m^{-1} . K^{-1}]	Rezistivita ρ [Ω.m]
7,9	500	14,7	730.10^{-9}

Teplotní součinitel roztažnosti α [K^{-1}] . 10^{-6}	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
	16	17	17	18	18

Odolnost proti degradačním procesům

ODOLNOST PROTI KOROZI

odolnost proti plošné korozi – odolává kyselině dusičné, slabým roztokům organických kyselin; odolnost proti korozi lze zvýšit leštěním; tvářením zastudena se korozivzdornost mírně snižuje

odolnost proti mezikrystalové korozi – ve srovnání s ocelí 17 241 odolává lépe; při aplikaci svaru v silném korozním prostředí, nutno přežíhat celou součást s následujícím ochlazením na vzduchu

ODOLNOST PROTI ŽÁRU

na vzduchu	do 850°C
v oxidačním sirném prostředí (obsahujícím SO_2)	do 750°C
v redukčním sirném prostředí (obsahujícím H_2S)	do 600°C
v páře	do 750°C
ve směsných plynech	do 550°C

ODOLNOST PROTI TEČENÍ

Mez pevnosti při tečení v tahu [MPa] (střední hodnoty)

Teplota [°C]	560	580	600	620	640	660	680	700
$R_{mT}/10^4$	163,8	142,2	121,6	104	87,3	72,6	60,8	48,1
$R_{mT}/3.10^4$	135,3	114,7	96,1	80,4	66,7	54,9	44,1	(35,3)
$R_{mT}/ 5.10^4$	122,6	103,0	85,3	71,6	57,9	47,1	(36,3)	(27,5)
$R_{mT}/10^5$	104,9	89,2	73,5	60,8	50,0	(40,2)	(30,4)	(22,6)

Technologické údaje

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

rozpouštěcí žíhání	1 020–1 080 °C	ochlazovat podle tloušťky na vzduchu nebo ve vodě
žíhání ke snížení pnutí	850–950°C	ochlazovat na vzduchu

TVAŘITELNOST

teploty tváření	1 150–850 °C	ochlazovat na vzduchu

SVAŘITELNOST

zaručená doporučené přídavné materiály – elektroda VÚS-A3F

OBROBITELNOST	soustružení, hoblování	frézování, vrtání
[1] [2] .4	9b	9b

TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY

zkouška hloubením podle Erichsena na 1 mm plechu 13

Použití

Austenitická, svařitelná, nestabilizovaná, korozivzdorná ocel vhodná pro chemické zařízení včetně tlakových nádob. Vhodná pro prostředí oxidační povahy pro silné anorganické kyseliny jen při velmi nízkých koncentracích a v oblasti normálních teplot. Lze ji použít též pro prostředí vyžadující vysokou čistotu produktu (farmaceutický a potravinářský průmysl).

Ostatní vlastnosti

Druh oceli podle způsobu výroby	Barevné značení podle ČSN 42 0010	Třída odpadu podle ČSN 42 0030
elektroocel	červená–černá–zelená	026

17346 ~ 1.4401 ~ AISI 316 ~ X5CrNiMo17-12-2

ČSN 41 7346 STN 41 7346	Korozivzdorná Cr-Ni-Mo ocel	OCEL 17 346

Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
max 0,07	max 2,00	max 1,00	16,5–18,5	10,5–13,5	2,00–2,50	max 0,045	max 0,030

Polotovary

[1] tyče tvářené za tepla
[2] plechy válcované za tepla
[3] tlusté plechy válcované za tepla

Mechanické vlastnosti

Polotovar		[1]			[2]	
Rozměr t, d [mm]		≤ 60	60–100	100–150	≤ 10	10–30
Stav		.4			.4	
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa] min		206			206	
Mez kluzu R_p 1,0 [MPa] min		245			245	
Mez pevnosti R_m [MPa]		490–686			490–686	
Tažnost A_5 [%] min		45	40	35	34	30
Kontrakce Z [%]		–	–	–	–	–
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm^{-2}]	podél min	196	137	98	–	137
	napříč min	–	98	69	–	98
Modul pružnosti E [GPa]		203				
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]		–				

Polotovar		[3]
Rozměr t, d [mm]		30–50
Stav		.4
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa] min		196
Mez kluzu R_p 1,0 [MPa] min		226
Mez pevnosti R_m [MPa] min		490
Tažnost A_5 [%] min		35
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm^{-2}] min	podél	70
	napříč	49
Vrubová houževnatost KCV^{-196} podél min		39
Tvrdost HB max		200
Modul pružnosti E [GPa]		203
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]		–

Teplota [°C]	100	200	400	600	800
Modul pružnosti E [GPa] za zvýšených teplot	195	185	170	155	135

Mechanické vlastnosti za nízkých teplot [2]

Teplota [°C]	20	–20	–50	–100	–150	–190
R_p 0,2 [MPa]	260	270	340	390	440	500
R_m [MPa]	590	710	800	950	1110	1290
A_5 [%]	60	87	84	67	60	56
KCV [J.cm^{-2}]	190	180	170	160	130	100

Mez kluzu za zvýšených teplot

Teplota [°C]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
R_p 0,2 [MPa]	196	176	162	147	137	127	122	117	112	107	102	97	90
R_p 1,0 [MPa]	226	206	192	177	167	157	152	147	142	137	132	127	120

Fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [kg.m^{-3}]	Měrná tepelná kapacita c_p [J.kg^{-1}.K^{-1}]	Teplotní součinitel roztažnosti α [K^{-1}]	Tepelná vodivost λ_t [W.m^{-1}.K^{-1}]	Rezistivita ρ [Ω.m]
8 000	440	16,5.10^{-6}	13,5	750.10^{-9}

Odolnost proti degradačním procesům

ODOLNOST PROTI PLOŠNÉ KOROZI
má zvýšenou schopnost pasivace a vyšší odolnost proti korozi v aktivním stavu; odolává kyselině sírové, fosforečné a dalším anorganickým kyselinám a agresivním prostředím

ODOLNOST PROTI MEZIKRYSTALOVÉ KOROZI
při aplikaci svaru v silnějším korozním prostředí nutno po svaření přežíhat celou svařovanou součást; svarové spoje plechů do tl. 6 mm musí vyhovovat zkoušce podle ČSN ve stavu po svaření bez dalšího zcitlivění

ODOLNOST PROTI OXIDACI ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT

na vzduchu	do 850 °C
v oxidačním sirném prostředí (SO_2)	do 750 °C
v redukčním sirném prostředí (H_2S)	do 600 °C
v páře	do 650 °C

ODOLNOST PROTI TEČENÍ
Mez pevnosti při tečení v tahu R_{mT} [MPa]

Teplota [°C]	550	575	600	625	650	675	700	725	750
$R_{mT}/10^4$	260	220	179	143	111	84	65	50	39
$R_{mT}/10^5$	196	155	118	90	69	49	37	28	23

Technologické údaje

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

žíhání ke snížení pnutí	850–950 °C	10–15 min. na teplotě, ochlazovat na vzduchu
rozpouštěcí žíhání	1 020–1 080 °C	ochlazovat buď na vzduchu nebo ve vodě

TVAŘITELNOST

teploty tváření	1 150–850 °C	ochlazovat na vzduchu