

VAKUOVÉ CHLAZENÍ KAPALIN

Karel PETERA, Martin DOSTÁL

MATEMATICKÉ MODEL Y VAKUOVÉHO CHLAZENÍ KAPALIN: PŘEHLED A DISKUSE

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta strojní
Katedra procesní a zpracovatelské techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6
+420-2-2435 2749, petera@fsid.cvut.cz, http://www.fsid.cvut.cz/~petera/
+420-2-2435 2557, dostal@fsid.cvut.cz, http://www.fsid.cvut.cz/~dostal/

Abstrakt

Článek popisuje dva matematické modely procesu vakuového chlazení kapalin, které byly získány na základě provedené literární rešerše. Oba modely mohou být použity pro předpověď časové závislosti teploty chlazené kapaliny, tlaků, hmotnosti zkondenzovaných par kapaliny a hmotnosti kapaliny během procesu jejího vakuového chlazení. První z modelů předpokládá termodynamickou rovnováhu mezi chlazenou kapalinou a parami (rovnovážný model), kdy teplota chlazené kapaliny je shodná s teplotou nasycených par kapaliny, která je dána jen a pouze celkovým tlakem v zařízení. Druhý (nerovnovážný) model předpokládá, že hnací silou vypařování kapaliny během jejího varu při jejím vakuovém chlazení je rozdíl tlaku nasycených par kapaliny při teplotě chlazené kapaliny a celkového tlaku v zařízení. V článku je shrnuta matematická teorie obou modelů. S použitím této teorie jsou pak tyto modely převedeny do podoby programového kódu, který je následně používán při simulacích procesu vakuového chlazení.

V článku jsou uvedeny výsledky numerické simulace procesu vakuového chlazení vody v zařízení fiktivních parametrů (byly částečně převzaty z reálného zařízení). Jsou uvedeny závislosti, z nichž je patrný vliv některých důležitých parametrů na proces vakuového chlazení (teplota chladicí vody v kondenzátoru, plocha průřezu netěsnosti a součin součinitele přestupu hmoty a velikosti mezifázového rozhraní). V článku je také studován vliv velikosti časového kroku použitého při numerickém řešení při diskretizaci časových derivací. Právě tyto výsledky poukazují na některé problémy spojené s druhým, nerovnovážným, modelem. V diskusi je uveden také nástin možného řešení.

Nerovnovážný model I

Zde uvádíme modifikovanou formulaci nerovnovážného modelu procesu vakuového chlazení kapalin uvedenou v Houška et al. (1996). Je založena na následujících předpokladech.

Předpoklady

- Vakuové chlazení čisté kapaliny. V případě vakuového chlazení roztoků je nutno v těchto modelech uvažovat zvýšení bodu varu roztoku oproti bodu varu čisté kapaliny.

- Nedochází k výměně tepla mezi kapalinou (případně jejími parami) a okolím (adiabaticky izolovaná soustava).

- Při průtoku odsávaných inertních plynů a par kapaliny zařízením jsou zanedbatelné tlakové ztráty, tj. v celém prostoru je stejný celkový tlak p .

- Nádoba je dokonale míchána, tj. kapalina má v každém místě stejnou teplotu.

- Tok odpařované kapaliny je dán součinitelem přestupu hmoty, velikostí mezifázové plochy a koncentračním gradientem mezi celkovým tlakem a tlakem nasycených par při teplotě kapaliny, viz Burfoot et al. (1989).

- Časový průběh teploty inertů je stanoven experimentálně a předpokládá se, že inert y s touto teplotou se nacházejí v celém objemu. Pomocí numerické simulace bylo zjištěno, že výsledky nejsou na změnu teplotu inertů příliš závislé a při dalších simulacích byl používán empirický model, kdy teplota inertů a par kapaliny je stejná jako teplota chlazené kapaliny ($T_i = T_f$).

- Během procesu vakuového chlazení jsou v celém prostoru přítomny pouze inert y a koncentrace par kapaliny je zanedbatelná, tzn. že všechny vzniklé páry okamžitě v kondenzátoru zkondenzují. Tento předpoklad se rozchází s předpokladem modelu uvedeném v Houška et al. (1996), ale je shodný se závěry numerické simulace uvedenými v této práci, který je běhen procesu sycen parami kapaliny.

Matematický model

Hmotnostní balance inertů

$$\frac{dM_i}{dt} = \dot{M}_{in} - \dot{V}(p_i) \varrho_i$$

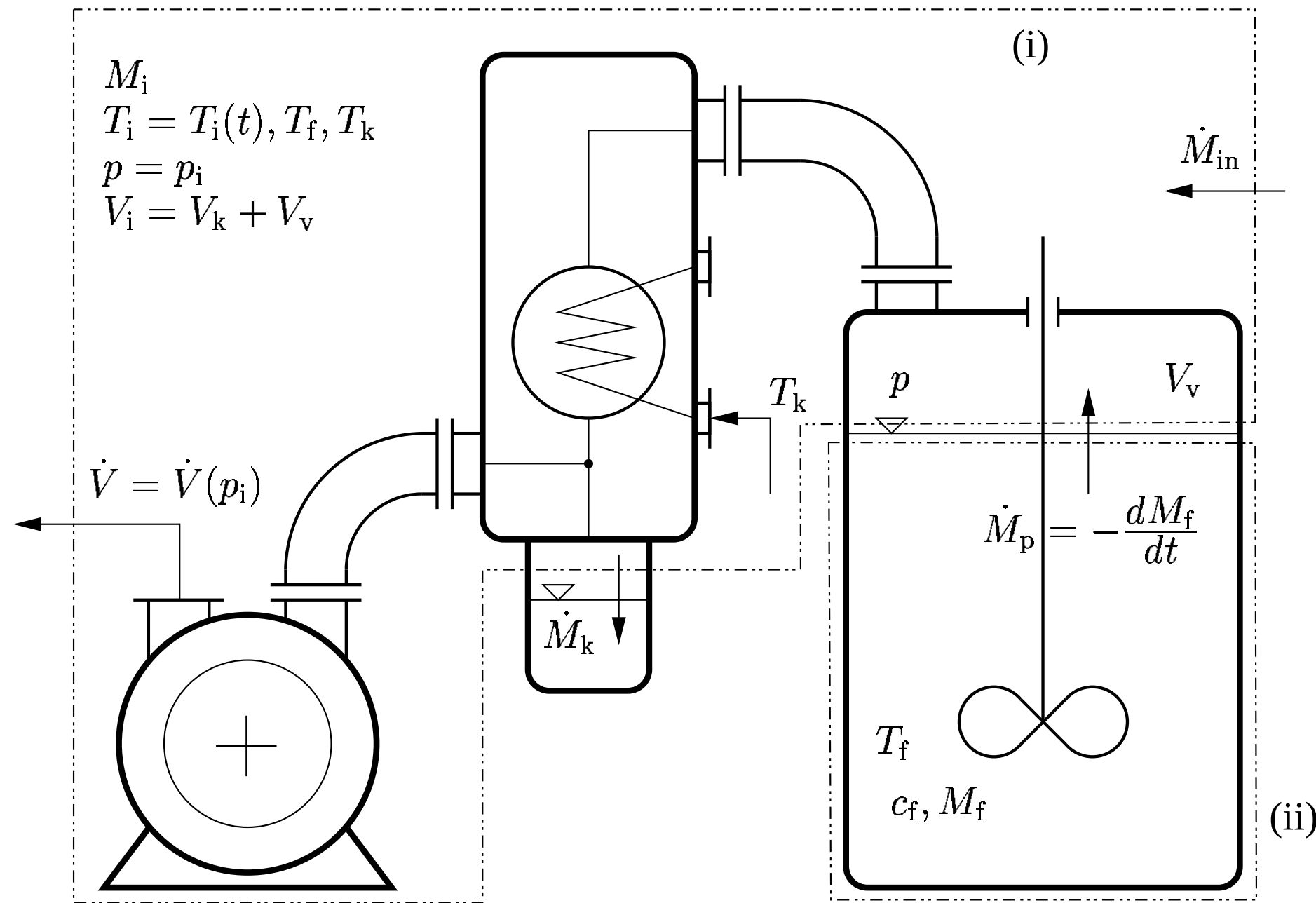
$$\varrho_i = \frac{\mathcal{M}_i p_i}{\mathcal{R} T_f}, \quad M_i = \varrho_i (V_k + V_v)$$

Tepelná balance chlazené kapaliny

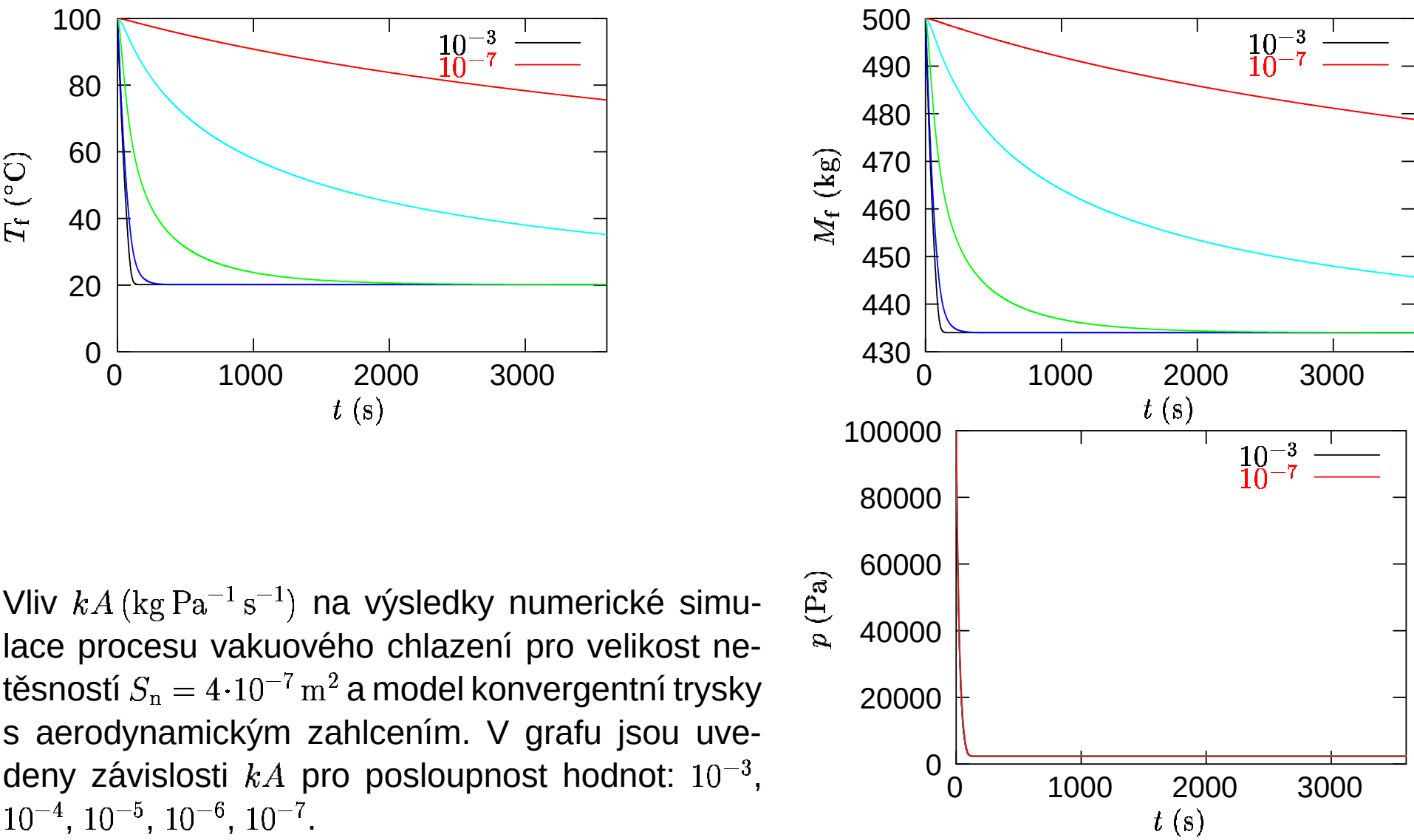
$$c_f M_f \frac{dT_f}{dt} = -\dot{M}_p r_{LG}$$

Rovnice přenosu hmoty (Burfoot et al., 1989)

$$\dot{M}_p = kA [p''(T_f) - p_i]$$



Výsledky numerické simulace



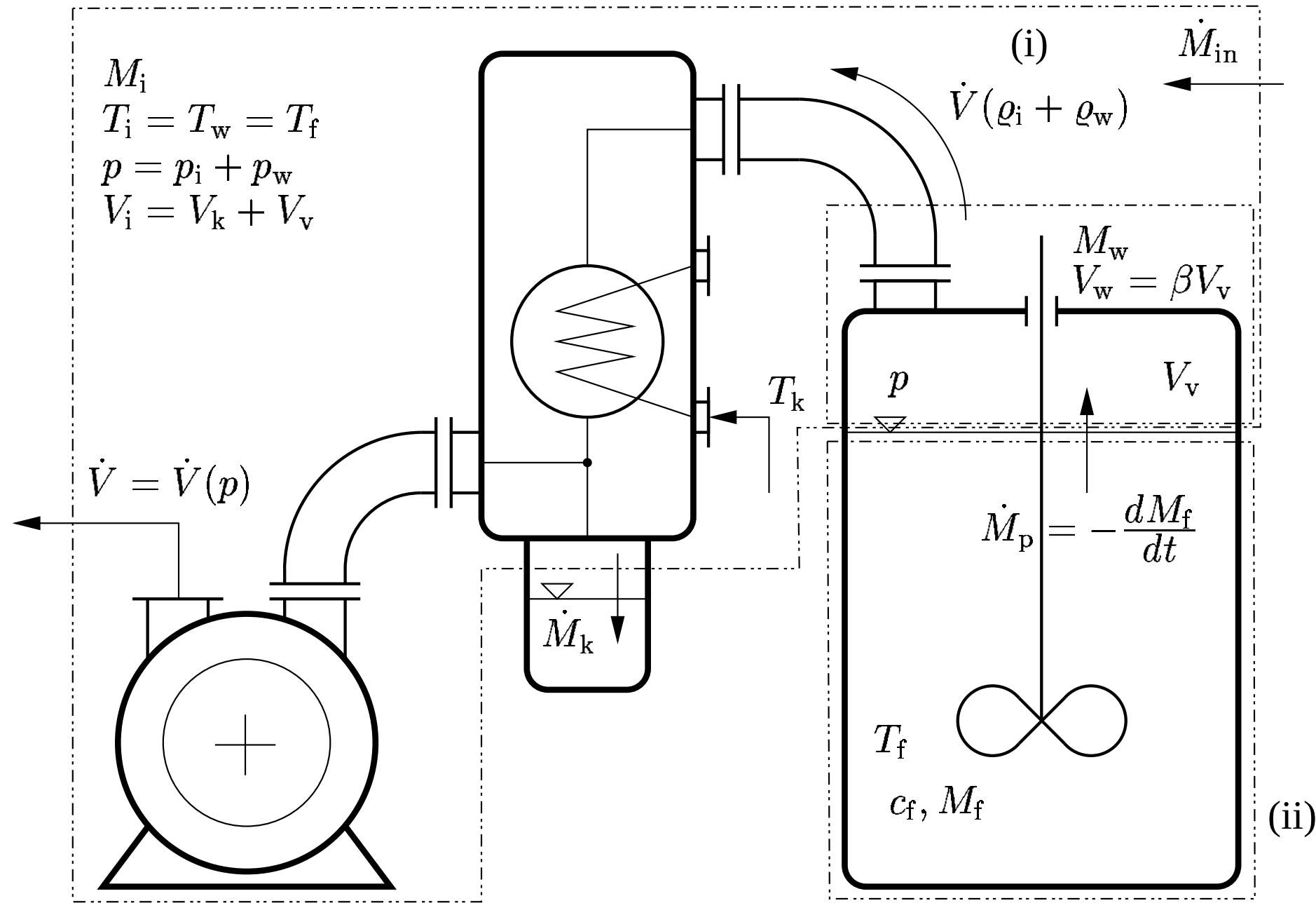
Vliv kA ($\text{kg Pa}^{-1} \text{s}^{-1}$) na výsledky numerické simulace procesu vakuového chlazení pro velikost netěsnosti $S_n = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ a model konvergentní trysky s aerodynamickým zahlením. V grafu jsou uvedeny závislosti kA pro posloupnost hodnot: 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} .

Nerovnovážný model II

Tato druhá modifikace aplikuje myšlenky postupného sycení inertů parami kapaliny v nerovnovážném modelu procesu vakuového chlazení. To se projeví ve změně posledních dvou předpokladů modelu I.

- Během procesu vakuového chlazení kapaliny se v celém objemu zařízení nachází směs inertů a par kapaliny o konstantní teplotě $T_i = T_w$ shodné s teplotou chlazené kapaliny T_f . Tento předpoklad je podložen experimetálními měřeními a numerickou simulací.

- Na počátku celého procesu jsou v celém objemu zařízení přítomny pouze inert y, které jsou pak v průběhu vakuového chlazení syceny parami kapaliny. Předpokládáme, že k akumulaci par kapaliny dochází v části objemu zařízení V_w , blízkému chlazené kapalíně, a vývěva pak již dále přes kondenzátor odsává tuto směs inertů a par kapaliny.



Matematický model

Hmotnostní balance inertů

$$\frac{dM_i}{dt} = \dot{M}_{in} - \dot{V}(p) \varrho_i$$

$$\varrho_i = \frac{\mathcal{M}_i p_i}{\mathcal{R} T_f}, \quad M_i = \varrho_i (V_k + V_v)$$

Hmotnostní balance par

$$\frac{dM_w}{dt} = \dot{M}_p - \dot{V}(p) \varrho_w$$

$$\varrho_w = \frac{\mathcal{M}_w p_w}{\mathcal{R} T_f}, \quad M_w = \varrho_w V_w$$

Celkový tlak

$$p = p_i + p_w$$

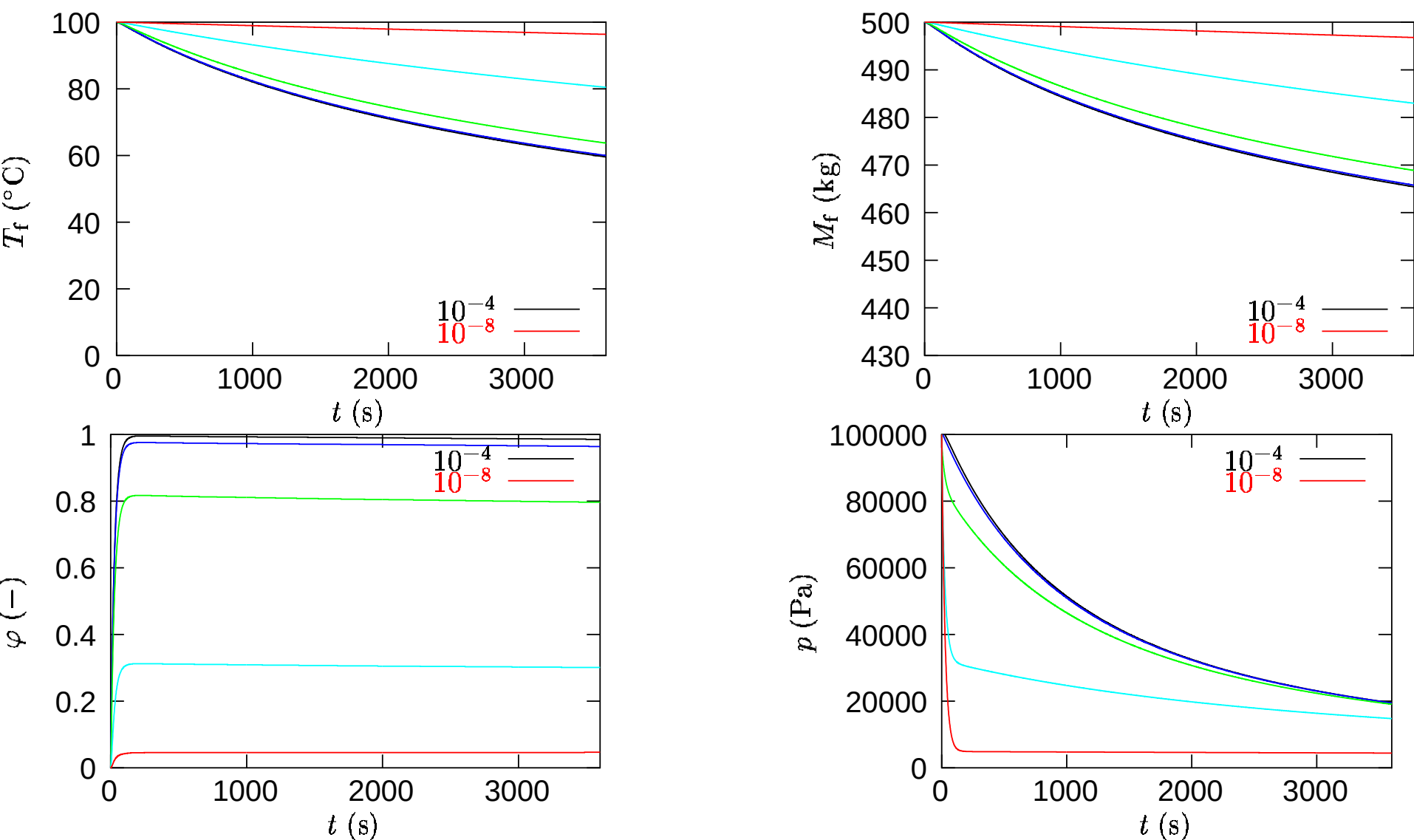
Tepelná balance chlazené kapaliny

$$c_f M_f \frac{dT_f}{dt} = -\dot{M}_p r_{LG}$$

Rovnice přenosu hmoty (Burfoot et al., 1989)

$$\dot{M}_p = kA [p''(T_f) - p_i]$$

Výsledky numerické simulace



Vliv kA ($\text{kg Pa}^{-1} \text{s}^{-1}$) na výsledky numerické simulace procesu vakuového chlazení pro velikost netěsnosti $S_n = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ a model konvergentní trysky s aerodynamickým zahlením. V grafu jsou uvedeny závislosti kA pro posloupnost hodnot: 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} .

Závěr

- První modifikovaný nerovnovážný model procesu vakuového chlazení kapalin lze použít pro popis procesu. Model je založen na volbě parametru kA , který je nutno určit na základě výsledků experimentálního měření chlazení kapaliny v reálném zařízení. Model předpokládá existenci tlakového gradientu, který je hnací silou vypařování.

- Druhý modifikovaný nerovnovážný model procesu vakuového chlazení kapalin je založen na předpokladu postupného sycení inertů parami kapaliny, jejichž množství je dáno nestacionární hmotnostní bilancí. Tento model vykazuje příliš pomalý pokles teploty, který není od určité meze závislý na volbě parametru kA . To je pravděpodobně způsobeno konstrukcí empirického modelu přenosu hmoty založeném na tlakovém gradientu, neodpovídajícím zcela teorii přenosu hmoty. Bylo by vhodné též model doplnit tepelnými bilancemi inertů a par kapaliny.

- V budoucí práci bude vhodné se zaměřit na formulaci modelu odpovídajícímu lépe teorii přenosu hmoty (vypařování) a jeho experimentálního ověření.

Seznam symbolů

A	plocha mezifázového rozhraní pro vypařování (přestup hmoty) (m^2)
c_f	měrná tepelná kapacita chlazené kapaliny ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
k	součinitel přestupu hmoty ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$)
M_f	hmotnost chlazené kapaliny (kg)
M_i	hmotnost vzduchu (kg)
M_{in}	hmotnostní průtok vzduchu netěsnostmi (kg s^{-1})
M_k	hmotnost zkondenzovaných par kapaliny (kg)
$\dot{M}_k$	rychlost změny hmotnosti zkondenzovaných par kapaliny, tj. hmotnostní průtok kondenzátu (kg s^{-1})
$\dot{M}_p$	hmotnostní průtok vypařených par kapaliny (kg s^{-1})
M_p	hmotnost vypařených par kapaliny (kg)
M_w	hmotnost par kapaliny nad hladinou chlazené kapaliny (kg)
$\mathcal{M}_i$	molární hmotnost vzduchu (inertů) ve vakuovaném prostoru (kg kmol^{-1})
$\mathcal{M}_w$	molární hmotnost par kapaliny (kg kmol^{-1})
p	celkový tlak vzduchu (Pa)
p_i	parciální tlak vzduchu (Pa)
p_w	parciální tlak par kapaliny (Pa)
p''	tlak nasycených par kapaliny při dané teplotě (Pa)
r_{LG}	výparné teplo kapaliny (J kg^{-1})
$\mathcal{R}$	univerzální plynová konstanta ($\text{J kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
t	čas (s)
dt	diferenciál času (s)
T_f	teplota chlazené kapaliny ($^{\circ}\text{C}$, K)
T_i	teplota vzduchu (inertních plynů, inertů, nezkondenzovaných plynů) ($^{\circ}\text{C}$, K)
T_k	teplota chladicí vody v kondenzátoru ($^{\circ}\text{C}$, K)
T_w	teplota par kapaliny ($^{\circ}\text{C}$, K)
V_i	objem, který zaujímá vzduch (inerty) uvnitř systému (m^3)
V_k	objem kondenzátoru a okolních armatur (m^3)
V_v	objem prostoru v nádobě nad chlazenou kapalinou (m^3)
V_w	kontrolní objem pro bilanci vodních par (m^3)
$\dot{V}$	objemový průtok směsi vzduchu a par kapaliny vývěvou ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
β	poměr V_w/V_v (–)
ϱ_f	hustota chlazené kapaliny (kg m^{-3})
ϱ_i	hustota (hmotnostní koncentrace) vzduchu při daných podmínkách (kg m^{-3})
ϱ_w	hustota (hmotnostní koncentrace) par kapaliny při daných podmínkách (kg m^{-3})

Literatura

Burfoot, D., Hayden, R., Badran, R.: Simulation of a pressure cook/water and vacuum cooled processing system, v R. W. Field, J. Howell, ed., *Process Engineering in the Food Industry Developments and Opportunities*, Elsevier Applied Science, London (1989), 27–41.

Houška, M., Podloucký, Š., Žitný, R., Greé, R., Šesták, J., Dostál, M., Burfoot, D.: Mathematical model of the vacuum cooling of liquids, *Journal of Food Engineering*, 29 (1996), 339–348.