

# Programová aplikace pro řešení sdílení tepla konvekcí

Jana Kolůchová

---

Bakalářská práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jana Kolůchová**  
Osobní číslo: **A14688**  
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Programová aplikace pro řešení sdílení tepla konvekcí**  
Téma anglicky: **A Software Application for Solving Convective Heat Transfer**

## Zásady pro vypracování:

1. **Nastudujte problematiku sdílení tepla konvekcí.**
2. **Seznamte se se způsobem stanovení součinitele přestupu tepla pro jednotlivé případy konvekce.**
3. **Vytvořte funkční programovou aplikaci pro stanovení tepelného toku konvekcí v programovacím jazyce C.**
4. **Dosažené výsledky zhodnoťte v diskusi a závěru práce.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Kolat, P.: Přenos tepla a hmoty, FS, VŠB-TU Ostrava, 2001
2. Dvořák, Z.: Sdílení tepla a výměníky, ČVUT Praha, FS, 1992
3. Kuneš, J.: Modelování tepelných procesů, SNTL Praha 1, 1989, ISBN 04-248-89
4. Himmelblau, D. M., Riggs, J. B.: Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering, Prentice Hall Professional Technical Reference, 2004, ISBN 0-13-140634-5
5. Kernighan, B. W., Ritchie, D. M.: Programovací jazyk C, Computer Press Brno, 2013, ISBN 978-80-251-0897-0
6. Herout, P.: Učebnice jazyka C 1.díl, KOPP nakladatelství, 2009, ISBN 978-80-7232-383-8

Vedoucí bakalářské práce:

**prof. Ing. Dagmar Janáčová, CSc.**  
Ústav automatizace a řídicí techniky


Datum zadání bakalářské práce:

**15. prosince 2017**

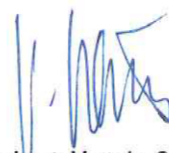
Termín odevzdání bakalářské práce:

**25. května 2018**

Ve Zlíně dne 15. prosince 2017



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*ředitel ústavu*


### **Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 23. 5. 2018

  
.....  
podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce je zaměřena na tvorbu programové aplikace pro výpočet součinitele přestupu tepla spadající do problematiky sdílení tepla konvekcí. Teoretická část se týká mechanismů sdílení tepla, kde jsou popsány jednotlivé případy sdílení tepla s detailním rozбором typů sdílení tepla konvekcí, pro které je mnohdy dosti komplikované stanovení součinitele přestupu tepla z empirických rovnic a výpočet tepelného toku. V praktické části je provedena analýza výpočtu požadovaných veličin, popsán způsob tvorby programové aplikace a na několika konkrétních příkladech ověřena její funkčnost.

Klíčová slova: sdílení tepla, konvekce, součinitel přestupu tepla, tepelný tok, kritéria podobnosti

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis is focused on the creation of a program application for the calculation of the heat transfer coefficient belonging to the issue of convection heat sharing. The theoretical part deals with heat sharing mechanisms, which describe individual cases of heat sharing with a detailed breakdown of convection heat sharing types, for which it is sometimes quite complicated to determine the product of heat transfer from empirical equations and to calculate heat flow. The practical part analyzes the calculation of the required quantities, the method of creation of the program application is described, and its functionality is verified on several concrete examples.

Keywords: heat sharing, convection, heat transfer coefficient, heat flux, similarity criteria

Na tomto místě bych chtěla poděkovat prof. Ing. Dagmar Janáčové, CSc. za vedení práce, Ing. Viliamu Dolinayovi, Ph.D. za pomoc a cenné rady při programování a své rodině za podporu při studiu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>9</b>
<b>1 SDÍLENÍ TEPLA</b> .....	<b>10</b>
1.1 VEDENÍ (KONDUKCE) .....	11
1.2 PROUDĚNÍ (KONVEKCE).....	12
1.3 SÁLÁNÍ (ZÁŘENÍ, RADIACE).....	12
<b>2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM</b> .....	<b>14</b>
2.1 POUŽÍVANÁ KRITÉRIA PODOBNOSTI.....	14
2.2 PŘÍPADY SDÍLENÍ TEPLA KONVEKČÍ.....	18
2.2.1 Volná konvekce.....	20
2.2.2 Nucená konvekce .....	20
2.2.3 Kondenzace .....	25
2.2.4 Var.....	27
<b>3 PROGRAMOVACÍ JAZYK, VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ</b> .....	<b>29</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>31</b>
<b>4 PROGRAMOVÁ APLIKACE</b> .....	<b>32</b>
4.1 ANALÝZA ÚLOHY – POSTUP VÝPOČTU .....	32
4.2 TVORBA APLIKACE .....	34
<b>5 PŘÍKLADY VÝPOČTU</b> .....	<b>67</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>73</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>74</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>75</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>77</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>78</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>79</b>

## ÚVOD

Cílem této práce je vytvoření programové aplikace pro řešení sdílení tepla konvekcí neboli prouděním, což je jeden ze tří mechanismů sdílení tepla, vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (zářením, radiací). Vedení tepla je molekulárním mechanismem sdílení tepla, přenos energie prouděním je vázán na pohybující se hmotné částice a při sálání se energie přenáší ve formě elektromagnetického vlnění.

Sdílení tepla prouděním se uplatňuje v tekutinách a není možné u pevných látek. Při konvekcii může dojít ke změně skupenství zúčastněných látek, nastává kondenzace nebo var. V případech, kdy ke změně skupenství nedochází, rozlišujeme proudění volné, vyvolané pouze rozdílem teplot, nebo nucené. Nucené proudění probíhá v trubkových systémech, které mohou být obtékány příčně nebo podélně, podél rovinné stěny nebo v mechanicky míchaných nádobách, tzv. duplikátorech.

Protože přenos tepla může být žádoucí, ale také nežádoucí, a je třeba stanovit skutečný účinek či ztrátu tepla. Ke stanovení tepelného toku se využívá Newtonův ochlazovací zákon. Zdánlivě jednoduchá rovnice obsahující teplosměnnou plochu, tj. je element povrchu stěny, na kterém k přestupu tepla dochází, rozdíl teplot obou systémů a součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . Tento však není materiálovou konstantou a jeho určení je dosti složité. Pro výpočet  $\alpha$  byla většinou čistě experimentálně stanovena celá řada empirických vztahů platících pro jednotlivé typy konvekce. Nabízí se proto vytvoření programové aplikace pro usnadnění tohoto složitého procesu stanovení součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . Je však zaměřena na problematiku sdílení tepla prouděním jen obecně a pro školní potřeby, neboť stanovení tepelného toku pro reálné procesy je daleko složitější problém.

Téma práce považuji za velmi aktuální, neboť tepelné procesy tvoří nedílnou součást živé i neživé přírody. Tepelný proces má přímý vliv na buněčné procesy v živé tkáni, obdobně jako působí na materiál konstrukcí strojů a zařízení. U obou tepelných systémů, biologického i technického, ovlivňuje dynamiku vývoje, spolehlivost a životnost. Analogie v technických i netechnických tepelných systémech je nejen zajímavá, ale v mnohém také poučná. Teplo a jeho různé způsoby přenosu jsou, na rozdíl např. od elektřiny nebo magnetismu, trvale a uvědoměle vnímaným průvodcem člověka. [3]



## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 SDÍLENÍ TEPLA

Přenosové jevy patří k základním přírodním jevům. Rozmanité pochody přenosu tepla provázejí vývoj vesmíru od samotného počátku až po současnost. Příklady v přírodě i technice jsou např. přenos sluneční energie k zemskému povrchu, oběh vody mezi zemským povrchem a atmosférou, hoření a spalování, fázové přeměny při vypařování, kondenzace nebo frakční destilace, přestup tepla v tepelných a jaderných energetických zařízeních aj. [1]

Přenosové děje proudící viskózní tekutiny a na fázovém rozhraní představují složité případy přenosu hybnosti, energie a hmoty, provázené i chemickými reakcemi. Teorie přenosu tepla a hmoty má základní význam pro všechna odvětví techniky. Uplatňuje se v jaderných reaktorech, parogenerátorech, parních a plynových turbínách, fluidních ohništích, spalovacích motorech, chladících zařízeních, výměnících tepla a v technice prostředí. [1]

Tepla mohou sdílet – předávat dva systémy (těleso a okolí) pouze v případě rozdílných teplot obou systémů.

**Tepla** je forma energie a míru vnitřní energie vyjadřuje **teplota**. Tepla je fyzikální veličina se značkou  $Q$  a její jednotkou je joule (J), vypočte se podle vztahu:

$$Q = c_p m (t_2 - t_1) \quad (1)$$

kde  $c_p$  je měrná tepelná kapacita,  $m$  hmotnost a  $(t_2 - t_1)$  je rozdíl teplot obou systémů.

**Teplený tok** je kvantitativním vyjádřením procesu výměny energie mezi systémem a okolím vlivem rozdílu teplot. Značí se  $\dot{Q}$  a jednotkou je watt (W), vypočte se podle vztahu:

$$\dot{Q} = c_p \dot{m} (t_2 - t_1) \quad (2)$$

do kterého se na rozdíl od rovnice (1) zadává  $\dot{m}$  hmotnostní průtok.

Sdílení tepla může být žádoucí nebo nežádoucí, k žádoucímu sdílení tepla dochází v různých aparátech, kdy je toto nezbytné pro průběh daného procesu, např. tepelné výměníky, destilační aparáty, sušárny apod. Oproti tomu k nežádoucímu sdílení tepla dochází při sdílení tepla s okolím, např. ztráty tepla do okolí, nebo při nežádoucímu ohřevu vnitřku zařízení tokem tepla z okolí. [2]

Kinetika sdílení tepla závisí především na fyzikální podstatě tohoto děje, tedy jaký je mechanismus sdílení tepla. Rozlišujeme tři mechanismy sdílení tepla, vedením (kondukcí), prouděním (přestupem, konvekcí) a sáláním (zářením, radiací).

## 1.1 Vedení (konduktce)

**Vedení** nastává předáním kinetické energie mezi molekulami a elektrony vlivem teplotních rozdílů. Vedení tepla je tedy molekulárním mechanismem sdílení tepla. Molekuly a elektrony mají v místě s vyšší teplotou vyšší kinetickou energii. Kinetická energie se přenáší z molekuly na molekulu nebo z elektronu na elektron, a proto tento přenos závisí na jejich vlastnostech a vzdálenosti mezi nimi, tj. na prostředí, v němž se teplo vede. [2]

Vedení se týká pevných, kapalných i plyných látek. Snižováním tlaků u plynů dochází ke vzdalování molekul, a tedy zvyšuje se odpor proti vedení tepla. Plyny bývají zejména při velmi nízkém tlaku špatnými vodiči tepla a stejně jako některé pevné látky se využívají k tepelné izolaci zařízení. Volné a vysoce pohyblivé elektrony kovů jsou příčinou jejich vysoké elektrické i tepelné vodivosti. [2]

U tekutin vzhledem k jejich pohyblivosti dochází k přenosu energie kromě vedení tepla také pohybem, což je jiný mechanismus sdílení tepla – proudění.

Fourierův zákon vedení tepla je základním zákonem přenosu, umožňuje popsat molekulární přenosové děje pomocí makroskopických veličin. [1]

Je založen na Fourierově hypotéze o vztahu mezi hustotou tepelného toku  $q$  a teplotním gradientem  $\nabla T$ , kde  $\lambda$  je tepelná vodivost prostředí. [3]

$$q = -\lambda \nabla T \quad (3)$$

Fourierův zákon lze však vyjádřit také pomocí objemové hustoty vnitřní energie  $u$ , kde  $a$  je tepelná difuzivita. [3]

$$q = -a \nabla u \quad (4)$$

Platnost uvedených vztahů (3) a (4) je však omezena na lineární vedení tepla a méně intenzivní tepelné procesy v izotropním prostředí.

Při nelineárním vedení tepla je nutno psát Fourierův zákon (základní diferenciální rovnice pro přenos tepla vedením) ve tvaru:

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dx} dA \quad (5)$$

$dQ$  je tepelný tok elementu povrchu stěny,  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti,  $dA$  element povrchu stěny (teplosměnná plocha),  $dt$  časová změna a  $dx$  změna pozice (tloušťka stěny).

Po integraci ve tvaru:

$$\dot{Q} = \lambda \frac{t_2 - t_1}{\delta} A \quad (6)$$

Odpor  $R$  proti vedení tepla je vyjádřen vztahem:

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (7)$$

$\delta$  je tloušťka izolační stěny a  $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti.

## 1.2 Proudění (konvekce)

K **proudění** dochází v pohyblivém prostředí, v tekutinách. Tady dochází k přenosu energie z místa o vyšší teplotě na místo o nižší teplotě, a to cirkulačním a turbulentním pohybem částic. Tento přenos energie je vázán na pohybující se hmotné částice a je o řád až dva intenzivnější než pouhé molekulární sdílení tepla v téže látce. [2]

Intenzita přenosu energie prouděním závisí mj. na intenzitě pohybu částic ve směru požadovaného sdílení tepla. Obvykle směrem k fázovému rozhraní nebo od fázového rozhraní, které představuje plochu tepelné výměny, tzv. teplosměnnou plochu. Přitom hlavní proudění probíhá podél tohoto fázového rozhraní. [2]

Proudění tekutiny při sdílení tepla je buď volné nebo nucené. Proudění **volné** je vyvoláno pouze rozdílem hustot vlivem rozdílu teplot. Proudění **nucené** je realizováno různým způsobem (rozdílem tlaků, samospádem, v trubce, v nádobě s mechanickým míchadlem, vznikem parní fáze při varu nebo zánikem parní fáze při kondenzaci). [2]

Při kvantitativním popisu sdílení tepla konvekcí se uplatňuje Newtonův ochlazovací zákon.

$$dQ = \alpha | \langle t_o \rangle - t_p | dA \quad (8)$$

$$\dot{Q} = \alpha | \langle t_o \rangle - t_p | A \quad (9)$$

$dQ, \dot{Q}$  je tepelný tok,  $\alpha$  součinitel tepelné vodivosti,  $\langle t_o \rangle$  průměrná teplota tekutiny,  $t_p$  teplota povrchu stěny u tekutiny a  $dA, A$  teplosměnná plocha.

## 1.3 Sálání (záření, radiace)

K **sálání** neboli záření či radiaci dochází mezi dvěma tělesy tak, že se z jednoho tělesa energie ve formě elektromagnetického vlnění přenáší na druhé těleso. U tělesa, které vyzařuje – emituje, dojde k přeměně vnitřní energie na radiační energii. Opačný proces pak nastává

u tělesa, které energii pohlcuje – absorbuje. Aby k takovému přenosu mohlo dojít, musí být mezi emitujícím a absorbujícím tělesem prostředí propouštějící záření. [2]

Záření je přenos elektromagnetické energie rychlostí světla, šíří se přímočaře a řídí se zákony optiky, odrazu a lomu. Vzniká složitými přeměnami atomů a molekul, k fyzikálnímu popisu slouží vlnová délka a podle ní se dělí. Sálání zahrnuje oblast vlnových délek  $0,3 - 50 \mu m$ , to je částečně ultrafialové záření, oblast viditelného záření a část infračerveného záření. [1]

## 2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM

Sdílení tepla mezi povrchem stěny a tekutinou označujeme jako **přestup tepla** (ze stěny do tekutiny nebo naopak, vždy ale z teplejšího prostředí do chladnějšího).

K vyjádření tepelného toku  $\dot{Q}$  slouží **Newtonův ochlazovací zákon**,

$$dQ = \alpha | \langle t_o \rangle - t_p | dA \quad (10)$$

kde  $\alpha$  představuje součinitel přestupu tepla,  $dQ$  tepelný tok elementu povrchu stěny,  $dA$  element povrchu stěny (teplosměnná plocha),  $\langle t_o \rangle$  průměrnou teplotu tekutiny a  $t_p$  teplotu povrchu stěny.

I když Newtonův ochlazovací zákon je vyjádřen jednoduchým vztahem, jde o velmi složitý problém. Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  není materiálovou konstantou, ale složitou funkcí závisící na mnoha dalších veličinách. Hodnota součinitele přestupu tepla závisí především na způsobu realizace proudění tekutiny, který určuje nejen intenzitu složky pohybu tekutiny kolmo na teplosměnnou plochu, ale i tloušťku laminární podvrstvy, do níž je soustředěn odpor proti sdílení tepla přestupem. Charakter pohybu tekutiny při volném nebo nuceném proudění se liší, stejně jako při laminárním nebo turbulentním. Jiný pohyb bude mít tekutina podél zakřiveného nebo tvarovaného povrchu či v prostoru s příčnými vestavbami. Jiné proudění nastane v nádobě s rotujícím míchadlem, čímž se výrazně změní i hodnota součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . [2]

Existuje řada empirických vztahů, které bylo pro většinu případů konvekce nutno určit experimentálně. Zavádějí se bezrozměrné veličiny, pomocí kterých jsou výsledky měření vyjádřeny kritériální rovnicí, jejíž platnost je omezena rozsahem měření a meze platnosti vyjádřeny mezními hodnotami kritérií. Pro výpočet součinitele přestupu tepla se používá Nusseltovo kritérium obsahující konstantu  $\alpha$ .

### 2.1 Používaná kritéria podobnosti

Kritérii podobnosti se rozumí bezrozměrové parametry, představující jednoduchý poměr nebo složitější kombinaci fyzikálních veličin. *Jednoduchá kritéria* (simplexy) jsou vyjádřena poměrem dvou rozměrově stejných veličin, *složená kritéria* (komplexy) vyjadřují poměr více než dvou různých fyzikálních veličin. Používání kritérií a matematického modelu v bezrozměrovém tvaru vede k zobecnění výsledků na podobné tepelné systémy a procesy. Určitý tepelný proces je charakterizován množinou rozměrových veličin, kterou lze nahradit

množinou bezrozměrových kritérií podobnosti o menším počtu prvků. Každé z kritérií má tu vlastnost, že je stejné pro všechny fyzikálně podobné procesy či systémy. [3]

Odvození vychází ze dvou rovnic. První je Fourierova-Kirchhoffova rovnice charakterizující rozdělení teplot v proudící kapalině, dochází-li k přestupu tepla. Druhou rovnicí je okrajová podmínka.

### **Nuseltovo kritérium**

(obsahuje součinitel přestupu tepla  $\alpha$ )

Vyjadřuje poměr celkového přenosu tepla v systému k přenosu tepla vedením. Charakterizuje přestup tepla konvekcí mezi tekutinou a přiléhajícím k ní prostředím. [3]

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (11)$$

Kde  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla,  $l$  představuje charakteristický rozměr a  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti.

*(ERNST KRAFT WILHELM NUSSELT (1882-1957), německý inženýr. Již v roce 1915 publikoval významnou práci o zákonech přenosu tepla, v níž poprvé navrhol bezrozměrová kritéria tepelné podobnosti. [3])*

### **Fourierovo kritérium**

Vyjadřuje poměr času probíhajícího tepelného procesu k času molekulární difúze tepla. V bezrozměrově vyjádřeném čase se projevuje vztah mezi rychlostí změny teplotního pole, fyzikálními parametry a rozměry tepelného systému. [3]

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} \quad (12)$$

$l$  je charakteristický rozměr,  $a$  teplotní součinitel vodivosti a  $\tau$  dobu procesu sdílení tepla.

*(JEAN BAPTISTE JOSEPH FOURIER (1768-1830), francouzský matematik a fyzik. Svou prací „Théorie analytique de la chaleur“ z roku 1822 vytvořil základy matematické teorie vedení tepla. [3])*

### **Pécletovo kritérium**

Vyjadřuje poměr konvektivního tepelného toku přenášeného tekutinou k tepelnému toku přenášenému vedením. Charakterizuje tepelný proces při uvažování pohybu prostředí a fyzikálních vlastností. S rostoucím  $Pe$  číslem se podíl vedení tepla zmenšuje a podíl konvektivního tepla zvětšuje.

$$Pe = \frac{vl}{a} = RePr \quad (13)$$

$v$  je rychlost proudění,  $l$  charakteristický rozměr,  $a$  teplotní součinitel vodivosti,  $Re$  představuje Reynoldsovo kritérium a  $Pr$  Prandtlovo.

*(JEAN CLAUDE EUGENE PÉCLET (1793-1857), francouzský fyzik a experimentátor v oblasti přenosu tepla. Jeho stěžejní publikace byla vzorem přesného syntetického pohledu autora na nově vznikající obor. [3])*

### Reynoldsovo kritérium

Vyjadřuje poměr setrvačné síly tekutiny k síle molekulárního tření (vazkosti). Určuje charakter proudění (laminární, turbulentní, přechodové). Při nízkých hodnotách  $Re$  čísla vazké tření poměrně rychle a silně utlumuje vznikající účinek proudu, zachovává se laminární proudění. Při velkých  $Re$  číslech dochází ke ztrátě stability proudění projevující se víry a turbulencí v tekutině. [3]

$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad (14)$$

$v$  je rychlost proudění tekutiny,  $l$  charakteristický rozměr a  $\nu$  představuje kinematickou viskozitu tekutiny.

*(OSBORNE REYNOLDS (1842–1912), anglický fyzik a inženýr. Slavným experimentem se zviditelňováním proudění v trubce při různých teplotách proudu, předvedeným 22. 2. 1880 a publikovaným v roce 1883, zahájil éru konvektivního přenosu tepla. Ukázal, že proudění v trubce závisí na poměru síly setrvačnosti a vazkosti, vyjádřil tak základní kritérium pro nucenou konvekci vazké tekutiny a určil jeho kritickou hodnotu. [3])*

### Prandtlovo kritérium

(kombinace  $Pe$  a  $Re$ )

Vyjadřuje poměr viskozity (hybnostní difuzity) k tepelné difuzitě. Charakterizuje fyzikální vlastnosti tekutiny při konvektivním a difuzním přenosu tepla. Při malých  $Pr$  číslech ( $<1$ ) převažuje molekulární přenos tepla vedením nad konvektivním přenosem při  $Pr >1$  je tomu naopak. [3]

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\frac{vl}{a}}{\frac{vl}{\nu}} = \frac{\nu}{a} \quad (15)$$

$Pe$  je Pecletovo kritérium,  $Re$  Reynoldsovo kritérium,  $v$  rychlost proudění tekutiny,  $l$  charakteristický rozměr,  $a$  teplotní součinitel vodivosti a  $\nu$  představuje kinematickou viskozitu.



Dosadíme-li za kinematickou viskozitu  $\nu = \eta/\rho$  a za teplotní vodivost  $a = \lambda/\rho c_p$  dostaneme často používané vyjádření (veličiny v této rovnici představují vlastnosti tekutiny,  $\eta$  je dynamická viskozita,  $\rho$  hustota,  $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti a  $c_p$  měrnou tepelnou kapacitu):

$$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda} \quad (16)$$

Uplatnění  $Pe$  nebo  $Re$  je vhodné v případech, kdy je známa charakteristická rychlost  $v$ , což je při nuceném proudění. V jiných případech dochází k cirkulaci tekutiny uvnitř zařízení a určení charakteristické rychlosti je problematické (viz míchání). [2]

*(LUDWIG PRANDTL (1875-1953), německý fyzik. Stěžejní práce se týkají hydrodynamické a tepelné mezní vrstvy, zejména analýzy turbulentní mezní vrstvy a přenosu tepla. Široce uplatňoval modelové metody. [3])*

### Grashofovo kritérium

Při volném proudění, které je vyvoláno rozdílem hustot tekutin u teplosměnné plochy a v jádru tekutiny (vlivem rozdílu teplot) je střední rychlost tekutiny stále rovna nule. Probíhá cirkulace tekutiny, na jejích intenzitě je závislý přenos tepla. Intenzitu volné cirkulace tekutiny lze vyjádřit nepřímo pomocí těch veličin, které jsou pro cirkulaci rozhodující, a to především rozdíl teplot  $\Delta t \equiv \langle t_o \rangle - t_p$  mezi jádrem tekutiny a povrchem teplosměnné plochy. Rozdíl teplot vyvolá rozdíl hustot tekutiny  $\Delta \rho = \rho_p - \rho$  u teplosměnné plochy a v jádru tekutiny. Koeficient teplotní objemové roztažnosti  $\beta$  vyjadřuje souvislost mezi oběma veličinami

$$\beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \text{ při malých změnách objemu } V \text{ lze psát } \beta \cong \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta t} \Rightarrow \beta \Delta t = \frac{\Delta \rho}{\rho}. [2]$$

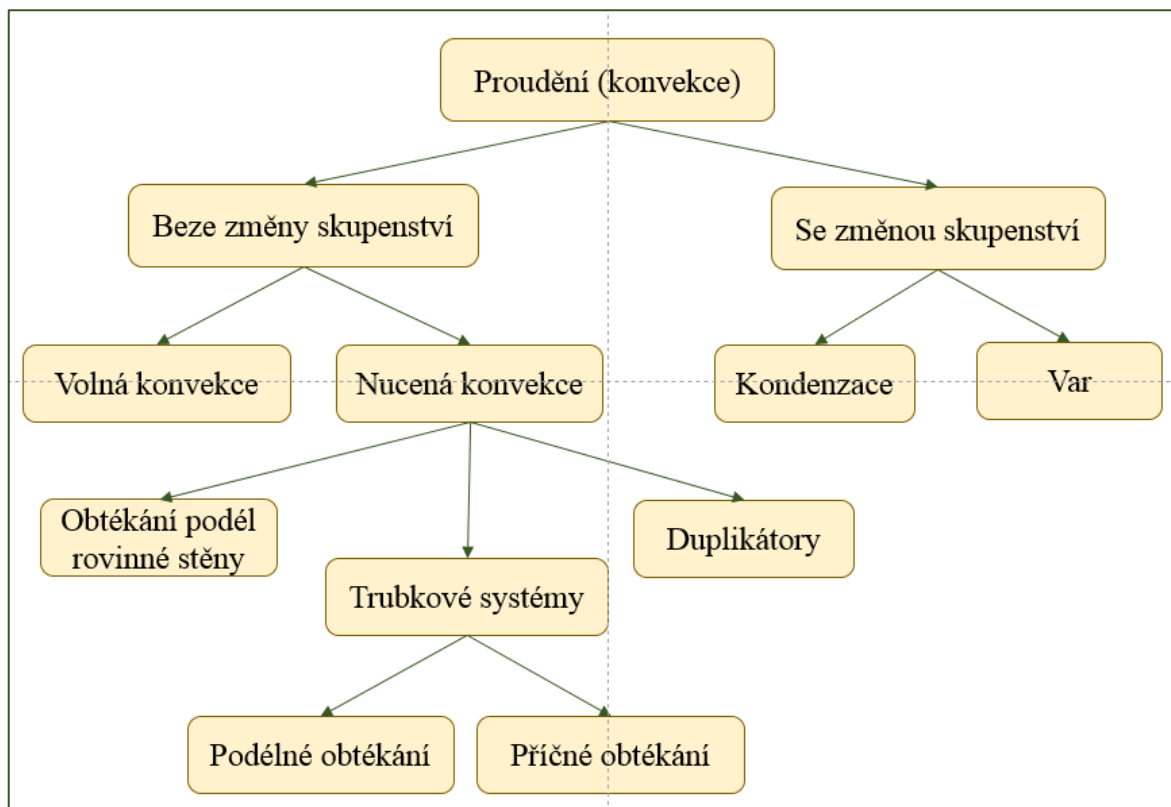
K vyjádření intenzity cirkulace vlivem rozdílu teplot při volném proudění tekutiny se užívá Grashofovo kritérium:

$$Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta t \quad (17)$$

$g$  je gravitační zrychlení,  $l$  charakteristický rozměr a  $\nu$  představuje kinematickou viskozitu

*(FRANZ GRASHOF (1826-1893), německý inženýr, podle kterého je kritérium pojmenované.)*

## 2.2 Případy sdílení tepla konvekcí



Obr. 1 Případy sdílení tepla konvekcí – prouděním

### Shrnutí součinitele přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla je koeficient závislý na celé řadě veličin charakteristických pro danou látku a daný stav proudění, vyjadřuje závislost na veličinách:  $\lambda$  – součinitel tepelné vodivosti,  $c_p$  – měrná tepelná kapacita,  $\eta$  – dynamická viskozita,  $\rho$  – hustota,  $l$  – charakteristický rozměr,  $v$  – rychlost proudění. Nejde tedy o materiálovou konstantu a jeho hodnota je obvykle určována experimentálně.

Experimentální řešení s použitím výpočetní techniky je nejužívanějším způsobem řešení složitých případů přestupu tepla. Výsledky měření jsou bezrozměrně vyjádřeny kritériální rovnicí, jejíž platnost je omezena rozsahem měření a meze platnosti vyjádřeny mezními hodnotami kritérií. Naměřené výsledky zachycují skutečný děj se vzájemnou závislostí všech zúčastněných veličin. Volba určujícího rozměru, teploty a kritériální rovnice různých autorů nedávají jednoznačné a číselně stejné hodnoty součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . Čím je tvar jednodušší, tím je rozsah platnosti užší. Rovnice, která by umožnila výpočet  $\alpha$ , musí obsahovat

vlivy fyzikálních vlastností kapaliny a charakteru proudění za daných podmínek. Nelze sestavit univerzální rovnici, experimentem bylo prokázáno, že rovnice pro výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha$  v nejobecnějším případě pro newtonovskou kapalinu bez změny skupenství bude mít tvar:

$$Nu = f\left(Re, Pr, Gr, \frac{L}{D}\right) \quad (18)$$

Pro technické výpočty zcela vyhovuje mocninový tvar:

$$Nu = a \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot Gr^o \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^p \quad (19)$$

Kde konstanty  $a, n, m, o, p$  je nutno experimentálně stanovit,  $L$  je délka a  $D$  je průměr. [1]

S rostoucím Reynoldsovým číslem ( $Re$ ) se zvyšuje intenzita přenosu tepla, při turbulentním proudění má tedy  $Re$  dominantní význam. S rostoucím Grashofovým číslem ( $Gr$ ) roste míra přirozené konvekce. Při malých rychlostech je i turbulence malá, a proto nahradíme  $Re$  za  $Gr$ . Prandtlovo číslo ( $Pr$ ) obsahuje pouze fyzikální parametry a exponent  $m$  nezávisí na typu proudění. Součinitel přestupu tepla roste s hodnotou  $Re$  kritéria s výjimkou laminární oblasti. Součinitel přestupu tepla nelze určit v celém rozsahu proudění, ale pro laminární, přechodovou a turbulentní oblast zvlášť. [1]

## KONVEKCE BEZE ZMĚNY SKUPENSTVÍ ZÚČASTNĚNÝCH LÁTEK

### 2.2.1 Volná konvekce

Je-li volné proudění vyvoláno pouze rozdílem teplot a je-li prostor, ve kterém k němu dochází, relativně velký, pak pro hodnotu Nuseltova kritéria je rozhodující součin  $Gr$  a  $Pr$ . [2]

Dobré výsledky dává vztah:

$$Nu = C(GrPr)^n \quad (20)$$

Tab. 1 Hodnoty konstanty  $C$  a exponentu  $n$  v závislosti na hodnotách  $GrPr$

$GrPr$	$C$	$n$
$<10^{-3}$	0,5	0
$<1 \cdot 10^{-3}; 5 \cdot 10^2>$	1,18	1/8
$<5 \cdot 10^2; 2 \cdot 10^7>$	0,54	1/4
$<2 \cdot 10^7; 1 \cdot 10^{23}>$	0,135	1/3

Charakteristickým rozměrem je u koule, vodorovného kruhového kotouče a vodorovného válce průměr, u svislé rovinné i válcové stěny výška, u vodorovné obdélníkové stěny je to kratší strana. Vlastnosti kapaliny se dosazují při střední teplotě  $t_s$ . [4]

$$t_s = \frac{t_0 + t_p}{2} \quad (21)$$

### 2.2.2 Nucená konvekce

Nuceným prouděním lze dosáhnout podstatně vyšší intenzity přestupu tepla než při volném proudění. V chemickém průmyslu jsou nejčastěji užívány systémy, u kterých je teplosměnná plocha vytvořena z trubek a nádoby s míchadlem. [2]

#### Obtékání podél rovinné stěny

Při nucené konvekci se významně uplatňuje Reynoldsovo číslo ( $Re$ ), proto vztah pro výpočet Nuseltova kritéria můžeme psát ve tvaru:

$$Nu = 0,0356Re^{0,8}Pr^{0,4} \quad (22)$$

Charakteristickým rozměrem je délka stěny.

**Trubkové systémy** (systémy s teplosměnnou plochou vytvořenou z trubek)

### Podélné obtékání

Je třeba rozlišovat, zda tekutina teče uvnitř trubky nebo ji obtéká. Při proudění uvnitř trubky kruhového průřezu se za charakteristický rozměr dosazuje vnitřní průměr trubky. U nekruhového průřezu trubky nebo pro výpočet součinitele přestupu tepla na vnější stěně trubek podélně obtékaného svazku uzavřeného v plášti dosazujeme za charakteristický rozměr tzv. ekvivalentní průměr  $d_{ek}$ , kde  $S$  je plocha průtočného průřezu a  $s$  obvod smočený tekutinou.

$$d_{ek} = \frac{4S}{s} \quad (23)$$

Za charakteristickou teplotu lze přibližně brát střed teplot na začátku a konci daného úseku trubky. [4]

Při laminárním proudění uvnitř trubky, kdy je možno zanedbat vliv volné konvekce tekutiny, tj.  $Gr/Re < 100$ , lze pro výpočet Nusseltova kritéria použít vztah

$$Nu = 1,86(Pe \, d/L)^{1/3} (\eta/\eta_w)^{0,14}, \quad (24)$$

který platí pro  $(Pe \, d/L) > 10$ ;  $d/L < 1$ .  $d$  je průměr trubky,  $L$  její délka a  $\eta$  představuje dynamickou viskozitu tekutiny.

Je-li proudění ve vodorovném potrubí laminární, tj.  $Re < 2300$ , s uvažováním volné konvekce, pak M. A. Michejev uvádí vztah

$$Nu = 0,15Re^{0,32}Pr^{0,33}(GrPr)^{0,1} \left(Pr/Pr_w\right)^{0,25} \varepsilon_f. \quad (25)$$

který platí pro  $GrPr > 5 \cdot 10^5$ .

Pro vlastnosti tekutiny je určující její střední teplota v potrubí, pouze  $Pr_w$  dosazujeme při teplotě stěny trubky. Charakteristickým rozměrem je vnitřní průměr potrubí. Hodnota součinitele  $\varepsilon_f$  závisí na poměru délky trubky  $L$  k vnitřnímu průměru trubky  $d$ . Užijeme-li vztah (29) pro svislé potrubí, pak by výsledný součinitel přestupu tepla při souproudu volného a nuceného proudění byl asi o 15 % menší a při jejich protiproudu o 15 % větší. [4]

Tab. 2 Hodnoty součinitele  $\varepsilon_f$  v závislosti na  $L/d$ 

$L/d$	1	2	5	10	15	20	30	40	$\geq 50$
$\varepsilon_f$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1

Pro laminární oblast,  $Re < 2300$ , kde již nelze vliv volné konvekce ve vodorovné trubce zanedbat, doporučuje Michejev vztah

$$Nu = 0,74Pe^{0,2}(GrPr)^{0,1}, \quad (26)$$

který platí pro  $Pe > 1800$ ;  $GrPr < 3,6 \cdot 10^6$ ;  $4d > 50$ . Vztah můžeme použít i pro svislé trubky násobíme-li vypočtený koeficient přestupu tepla v případě ohřívání a toku dolů číslem 1,15, tedy je o 15 % větší, a v případě chlazení a toku nahoru číslem 0,85, tj. je o 15 % menší. [4]

Při turbulentním režimu, tj.  $10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$ , je-li teplotní i rychlostní profil ustálen, dává podle Michejeva dobré výsledky vztah

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43} \left( Pr/Pr_w \right)^{0,25}, \quad (27)$$

který platí když  $0,6 < Pr < 2500$ ;  $4d > 50$ .

Je-li  $0,6 < Pr < 120$ , pak se vztah (31) dobře shoduje s jednodušší Dittusovou-Boelterovou reakcí

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4}, \quad (28)$$

které dáváme jako jednodušší přednost všude tam, kde je to možné.

Pro přechodovou oblast proudění, tj.  $2300 < Re < 10000$ , poskytuje užitečné výsledky vztah

$$Nu = 0,116 \left( Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) Pr^{\frac{1}{3}} \left[ 1 + \left( d/L \right)^{\frac{2}{3}} \right] (\eta/\eta_w)^{0,14}, \quad (29)$$

který platí také když  $2300 < Re < 2 \cdot 10^6$ ;  $0,5 < Pr < 500$  a  $d/L \geq 1$  a kde  $d$  je průměr trubky,  $L$  její délka a  $\eta$  představuje dynamickou viskozitu tekutiny.

### Příčné obtékání

Při příčném obtékání trubek se rozlišuje mezi řadovým a šachovnicovým uspořádáním trubek ve svazcích. Žukauskas na základě četných pokusů navrhuje pro oba typy vztah

$$Nu = K Re^m Pr^{0,36} (s_1/s_2)^n (Pr/Pr_w)^{0,25} \quad (30)$$

Tab. 3 Hodnoty exponentů  $K, m, n$  v závislosti na hodnotě  $Re$  a uspořádání trubek

$Re$	řadové			šachovnicové			$s_1/s_2$	oblast
	$K$	$m$	$n$	$K$	$m$	$n$		
$3 \cdot 10^1 - 2 \cdot 10^2$	0,52	0,5	0	0,6	0,5	0,2	< 2	laminární
	0,52	0,5	0	0,6	0,5	0	> 2	
$1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$	0,27	0,63	0	0,35	0,6	0,2	< 2	přechodová
	0,27	0,63	0	0,4	0,6	0	> 2	
$2 \cdot 10^5 - 1,6 \cdot 10^6$	0,02	0,84	0	0,021	0,84	0	-	turbulentní

$s_1/s_2$  je poměr roztečí trubek.

Vztah platí pro nežebrové trubky, když  $0,7 < Pr < 5,7 \cdot 10^2$ ;  $30 < Re < 1,2 \cdot 10^6$ .

Pro plyny je  $(Pr/Pr_w)^{0,25}$  prakticky roven 1.

Fyzikální vlastnosti tekutiny je do vztahu třeba dosazovat při teplotě přitékající tekutiny, pro  $Pr_w$  při teplotě stěny trubky, charakteristikou rychlostí je rychlost tekutiny v minimálním průtočném průřezu, který je u řadových svazků vždy kolmý na směr toku tekutiny, u šachovnicových může být i na diagonále. Za charakteristický rozměr dosazujeme do  $Nu$  a  $Re$  průměr obtékaných trubek. [4]

### Duplikátory

Jsou mechanicky míchané nádooby s topným pláštěm. Pursell navrhuje pro duplikátor vťah,

$$Nu = 0,112 Re_M^{0,75} Pr^{0,44} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,44} \left(\frac{h}{d}\right)^{0,13} \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,25} \quad (31)$$

kteřý platí pouze pro přestup tepla pláštěm nádoby a pro lopatková míchadla. Jeho platnost byla ověřena pro  $50 < Re_M < 5 \cdot 10^5$ ;  $7 < Pr < 5 \cdot 10^2$ ;  $1,3 < D/d < 4,1$ ;  $0,16 < b/d <$

0,51;  $0,52 < h/d < 1,7$ ;  $1,3 < H/d < 4,2$ . Vztah platí v tomto oboru pro nádoby s narážkami i bez narážek pro lapátková míchadla s relativní chybou asi 30 %. Měření byla prováděna v nádobách s kulatým dnem, lze však předpokládat, že s podobnou přesností bude vztah platit i pro nádoby s rovným dnem.

$Re_M$  je Reynoldsovo číslo modifikované pro míchání, kde  $f$  je charakteristická rychlost míchání,  $d$  je průměr míchadla,  $\rho$  hustota tekutiny a  $\eta$  její dynamická viskozita.

$$Re_M = \frac{f d^2 \rho}{\eta} \quad (32)$$

Do Nusseltova čísla dosazujeme za charakteristický rozměr průměr nádoby, do Reynoldsova pak průměr míchadla. Fyzikální vlastnosti se dosazují při teplotě vsádky, kromě dynamické viskozity  $\eta_w$ , která je při teplotě stěny nádoby. Za teplotu vsádky lze obvykle brát aritmetický průměr vsádky na začátku a konci operace.  $d$  je průměr míchadla,  $D$  průměr nádoby a  $h$  výška lopatek. [4]



## KONVEKCE SE ZMĚNOU SKUPENSTVÍ ZÚČASTNĚNÝCH LÁTEK

### 2.2.3 Kondenzace

Styk páry se stěnou o teplotě nižší, než je kondenzační teplota při daném tlaku, vede k postupné fázové přeměně páry na kapalinu, tj. na kondenzát, a k odvodu tepla uvolněného kondenzací chladicí stěnou. [2]

Zkondenzuje-li oblast páry o hmotnosti  $\Delta m$  a objemu  $\Delta V$ , poskytne kondenzát o téže hmotnosti  $\Delta m_1 = \Delta m$ , ale o podstatně menším objemu  $\Delta V_1$ , přibližně 0,001 původního objemu páry. Toto snížení objemu vyvolá intenzivní pohyb páry z přilehlého prostoru ke kondenzační ploše. [2]

Mechanismus průběhu kondenzace, a tedy přestupu tepla z páry na chladicí stěnu, může mít různý charakter. Nejčastěji kondenzace čisté nasycené páry nebo to může být i pára přehřátá a může obsahovat jistý podíl nekondenzujících plynů (inert). Stěna, na které dochází ke kondenzaci, může být pro kondenzát smáčivá nebo nesmáčivá. V případě smáčivé stěny tvoří kondenzát na stěně film a tato kondenzace se nazývá filmová, což je také nejlépe popsáný děj. V opačném případě vytváří kondenzát na stěně kapky a kondenzace se tak nazývá kapková. [2]

#### Filmová kondenzace čisté nasycené páry na svislé stěně

Nusselt teoreticky popsal přestup tepla při kondenzaci nasycené páry na svislé stěně a odvodil vztah pro podmínku laminárního proudění kondenzátu po stěně. V tomto případě pára kondenzuje na povrchu filmu. Hlavní odpor proti sdílení tepla je soustředěn do laminárního filmu stékajícího kondenzátu, kterým se sdílí teplo uvolněné kondenzací ke stěně pouze vedením, tedy molekulárním mechanismem. Tloušťka filmu od shora dolů roste a tím se mění i místní hodnota součinitele přestupu tepla – klesá. [2]

Z Fourierova zákona plyne tepelný tok  $q$  odváděný blanou o tloušťce  $\delta$ ,  $\lambda$  představuje součinitel tepelné vodivosti a  $(t_v - t_w)$  rozdíl teploty páry a kondenzační stěny. [1]

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_v - t_w) \quad (33)$$

Z Newtonova vztahu se tepelný tok vypočte za pomoci součinitele přestupu  $\alpha$ . [1]

$$q = \alpha (t_v - t_w) \quad (34)$$

Sřední hodnotu součinitele přestupu tepla  $\alpha$  lze určit z rovnice,

$$\alpha = C \left[ \frac{\lambda^3 \rho^2 g \Delta h_k}{l \eta (t_v - t_w)} \right]^{0,25} \quad (35)$$

kde  $C = 1,25$  pro kondenzaci na svislé trubce nebo na svislé rovinné desce,  $l$  je přitom svislý rozměr kondenzační plochy. Pro případ kondenzace na vodorovné trubce je  $C = 0,725$  a  $l$  je průměr trubky. [2]

Hustotu  $\rho$ , tepelnou vodivost  $\lambda$  a viskozitu  $\eta$  kondenzátu dosazujeme při aritmetickém průměru teplot páry a stěny. Kondenzační teplo  $\Delta h_k$  při teplotě páry.  $t_v$  je teplota páry a  $t_w$  je teplota povrchu kondenzační plochy.

Tok kondenzátu lze považovat za laminární, když  $Re_k < 1300$ , přičemž

$$Re_k = \frac{4\Gamma}{\eta} \quad (36)$$

kde  $\Gamma$  je tzv. lineární hustota skrápění stěny, kterou určuje vztah  $\Gamma = \dot{m}/s$ , kde  $\dot{m}$  je hmotnostní průtok kondenzátu a  $s$  se pro vodorovnou trubku dosazuje její dvojnásobná délka a v případě svislé trubky její obvod.

### **Kapková kondenzace nasycené páry na svislé stěně**

Kondenzuje-li pára na svislé stěně, která je pro kondenzát nesmáčivá, netvoří na kondenzačním povrchu film, ale kapky. Doroste-li kapka kondenzátu do určité velikosti vlivem gravitace steče a spojí se s dalšími kapkami. Tím se kondenzační povrch uvolní pro další kondenzaci. Je zřejmé, že kondenzační povrch je kapkami vždy pokryt jen z části, proto je při kapkové kondenzaci odpor proti přestupu tepla nižší než při kondenzaci filmové. Tomu pak odpovídá vyšší součinitel přestupu tepla. Proto se také některé povrchy upravují tak, aby byly pro kondenzát nesmáčivé. [2]

### **Kondenzace přehřáté páry**

Pro výpočet přestupu tepla při kondenzaci přehřáté páry se často doporučuje postup výpočtu vycházející z předpokladu, že na části povrchu dochází k ochlazení přehřáté páry až na teplotu nasycené páry při daném tlaku bez kondenzace a že na zbývající části povrchu probíhá kondenzace nasycené páry. Na části teplosměnné plochy, kde podle předpokladu nedochází ke kondenzaci, se hodnota součinitele přestupu tepla  $\alpha$  počítá jako při nuceném přestupu

z plynu na stěnu a ve zbývající části jako při kondenzaci nasycené páry. Ve skutečnosti dochází ke kondenzaci i v úseku přehřáté páry a skutečné hodnoty  $\alpha$  jsou proto vyšší než vypočtené, i přesto však tento postup dává spolehlivý odhad součinitele přestupu tepla. [2]

### **Kondenzace páry smíšené s inertem**

Obsahuje-li pára nekondenzující plyny, je objemová změna při kondenzaci takto znečištěné páry nižší než u čisté páry. Tím se také sníží intenzita proudění páry ke kondenzačnímu povrchu a navíc dojde ke zvýšení koncentrace inerty u kondenzačního povrchu, což vyvolá difúzní proudění inerty od kondenzačního povrchu proti pohybu páry. Zvýšená koncentrace inerty zhoršuje styk páry s kondenzačním povrchem a opačný směr proudění inerty brzdí přítok páry ke kondenzační ploše. Přítomnost inerty v páře tedy snižuje součinitele přestupu tepla, a proto je třeba inert z parního prostoru vypouštět, tzv. odvodušňování. [2]

### **2.2.4 Var**

Přestup tepla při varu kapaliny je dost složitý děj. Součinitel přestupu tepla v tomto případě závisí na rozdílu teplot  $\Delta t$  mezi teplosměnnou (varnou) plochou a vroucí kapalinou. [2]

Z hlediska konstrukčního uspořádání výhřevné plochy a pohybu kapaliny rozeznáváme:

#### Objemový var

Nastává tam, kde je topná soustava umístěn apod volnou hladinou kapaliny v nádobě, např. v parogenerátoru jaderné elektrárny.[1]

#### Var při nucené konvekci

Nastává tehdy, proudí-li kapalina potrubím, které je současně výhřevnou plochou, např. v průtočných kotlech. [1]

Při nízkých hodnotách  $\Delta t$  se bubliny netvoří, probíhá povrchové odpařování a o hodnotě  $\alpha$  rozhoduje volná konvekce. Přejít kapalná fáze na parní je provázen značnou objemovou změnou, která vyvolá intenzivní pohyb u plochy tepelné výměny, původně laminární vrstvička je nyní silně turbulizovaná. Stoupání bublin kapalinou rovněž vyvolá pohyb kapaliny. Oba tyto jevy mají vliv na vzrůst součinitele přestupu tepla. [2]

Při nízkých hodnotách  $\Delta t$  stále roste počet bublin na varné ploše. Od určité hodnoty  $\Delta t$  dochází ke spojování bublin do formy parní blány, která odděluje varný povrch od vroucí kapaliny. Toto snižuje součinitele přestupu tepla. Jakmile je celý povrch pokryt blánou páry, již zůstává součinitel přestupu tepla konstatní  $\alpha = f(\Delta t)$ .

Intenzita tepelného toku  $q$

$$q = \alpha \Delta t \quad (37)$$

V praxi lze doporučit hodnoty  $\Delta t$  blízko  $\Delta t_{kr}$ , při které je přestup tepla při varu kapaliny maximální.

Hodnotu součinitele přestupu tepla  $\alpha$  je možno odhadnout z rovnice typu

$$\alpha = K q^r p^z \quad (38)$$

$K, r, z$  jsou empiricky zjištěné konstanty charakterizující kapalinu a varný povrch,  $p$  je tlak a  $q$  měrný tepelný tok.

Při varu je objemová změna opačného charakteru než při kondenzaci. Objem vzniklé páry je vůči kapalině, ze které pára vznikla, řádově  $10^3$ krát větší. [2]

Z výše uvedeného přehledu jednotlivých případů proudění je zřejmé, že stanovení součinitele přestupu tepla je složité, vytvoření programové aplikace pro usnadnění tohoto výpočtu se proto nabízí.

### 3 PROGRAMOVACÍ JAZYK, VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ

Jazyk C je univerzální programovací jazyk. Jeho historie je úzce spjata s operačním systémem UNIX, kde byl vyvinut a téměř celý systém i většina programů, které na něm běží, jsou napsány v jazyce C. Jazyk sám však není svázán s žádným operačním systémem nebo hardwarovou platformou. Prvním standardem jazyka C byla vezre jeho autorů – Brian W. Kernighan a Denis M. Ritchie – popsána ve famožní knize *The C Programming Language*, kniha vyšla v roce 1978 a kromě jiného se stala základní učebnicí jazyka C. [6][7]

Jazyk C je relativně nízkoúrovňový jazyk, což znamená, že přímo pracuje se stejnými objekty jako většina počítačů, se znaky, čísly a adresami, a to pomocí aritmetický a logických operátorů implementovaných skutečnými počítači. Jazyk C nenabízí žádné operace, které by přímo pracovaly se složenými objekty, jako jsou znakové řetězce, množiny, seznamy nebo pole, nemá žádné nástroje pro vstup a výstup. Všechny tyto akce je nutné provádět pomocí volání funkcí, což přináší jednoduchost jazyka a jeho nezávislost na počítači. Specifikace knihovny definuje funkce pro přístup k operačnímu systému, formátovaný vstup a výstup, alokaci paměti a další. Sbíрка standardních hlavičkových souborů představuje jednotný přístup k deklaracím funkcí a datových typů, zajišťuje kompatibilní chování. [6]

Jazyk C je strukturovaný, není specifikovaný pro jednu oblast používání a pro mnoho úloh je efektivnější a rychlejší než jiné jazyky. [7]

Základní zpracování programu v jazyce C probíhá v několika fázích:

Editor – pomocí něj se vytváří a opravuje zdrojový (.c) soubor.

Preprocesor – je součást překladače, která předzpracovává zdrojový soubor tak, aby měl překladač snadnější práci. Vynechává komentáře, zajišťuje správné vložení hlavičkových (.h) souborů, rozvoj maker atd. Výsledkem jeho práce je opět textový soubor, který preprocesor předává přímo kompilátoru.

Compiler (překladač, kompilátor) – provádí překlad zdrojového souboru do relativního kódu počítače, vzniká (.obj) soubor. Relativní kód je téměř hotový program, adresy proměnných nebo funkcí ještě nejsou známy, např. proto, že jsou uloženy v knihovně, v .obj souboru jsou tedy zapsány relativně.

Linker – sestavovací program, který přidělí relativnímu kódu, resp. jeho relativním adresám, absolutní adresy a provede všechny odkazy na dosud neznámé identifikátory. Výsledkem je přímo spustitelný program (.exe).

Debugger – slouží pro ladění, nalézání chyb, které nastávají při běhu programu. Po nalezení chyby se celý cyklus (editor, compiler, linker, debugger) opakuje.

Celý cyklus probíhá při použití jakéhokoliv překladače. Např. u graficky orientovaných vývojových prostředí se všechny činnosti dělají téměř automaticky a najednou, ale i tam je nutné nejdříve program přeložit, sestavit, a nakonec spustit nebo ladit. [7]

Jazyk C++ je multiparadigmatický programovací jazyk, který vyvinul Bjarne Stroustrup jako nadstavbu jazyka C. Jazyk C++ podporuje procedurální, objektově orientované a generické programování, tedy několik programovacích stylů (paradigmat). V současné době patří mezi nejrozšířenější programovací jazyky, je velmi komplexní a pravděpodobně jeden z nejtěžších jazyků na naučení. Kombinuje vysokou rychlost jazyka C s novým objektově orientovaným přístupem moderních jazyků jako např. Java, C# nebo PHP.

Jazyk C++ je vlastně jazyk C s další syntaxí (příkazy) navíc. To umožňuje kompilovat všechny programy napsané v jazyce C a také používat céčkové knihovny. Jazyk C je až na několik jasně definovaných výjimek podmnožinou jazyka C++.

Jazyk C++ použijeme zpravidla, pokud potřebujeme např. GUI – grafické uživatelské rozhraní umožňující ovládání pomocí interaktivních grafických ovládacích prvků, pro uživatele značně komfortnější. Právě z tohoto důvodu je programová aplikace napsána v jazyce C++.

Vývojové prostředí je software usnadňující práci programátorů, obsahuje editor zdrojového kódu, překladač a většinou také debugger. Visual studio je populární vývojové prostředí Microsoftu, které je standardem pro programování nových aplikací pro Windows. Visual Studio Community 2013, které jsem pro tvorbu aplikace využila, je bezplatné rozšiřitelné integrované vývojové prostředí (IDE) s plnou funkční výbavou, umožňující vytvářet modení aplikace pro Android, iOS a Windows, webové aplikace a cloudové služby.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 PROGRAMOVÁ APLIKACE

### 4.1 Analýza úlohy – postup výpočtu

Tepelný tok vypočteme podle vztahu (10), Newtonova ochlazovacího zákona. Nejdříve však musíme stanovit součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . Rozhodneme, zda probíhá fázová přeměna, pokud ne, uvážíme, zda jde o volnou nebo nucenou konvekci. Je-li volná konvekce, rozhoduje o tvaru rovnice součin  $GrPr$ . Je-li konvekce nucená, pak rozhoduje hodnota  $Re$ . Při fázové přeměně záleží na tom, zda je to var či kondenzace.

Nejprve tedy určíme, o jaký typ konvekce se jedná (viz *Obr. 1 – Případy sdílení tepla konvekcí – prouděním*). Pro jednotlivé typy proudění pak výpočet provedeme takto:

#### Konvekce beze změny skupenství

##### Volná konvekce

1. Vypočteme  $Pr$  a  $Gr$  podle vztahu (16) (17).
2. Podle  $GrPr$  dle *Tab. 1* stanovíme koeficienty  $C, n$  a vypočteme  $Nu$  (20).
3. Ze vztahu (11) vypočteme  $\alpha$ , tj.  $\alpha = \frac{Nu\lambda}{l}$ .
4. Vypočteme podle vztahu (9) tepelný tok  $\dot{Q}$ .

##### Nucená konvekce – trubkové systémy – podélné obtékání

1. Vypočteme  $Re$  podle vztahu (14).
2. Podle hodnoty  $Re$  stanovíme o jakou oblast se jedná (laminární, přechodová, turbulentní).
3. Pro případ laminárního proudění vypočteme  $Pr$  podle vztahu (16) a  $Gr$  podle vztahu (17). Pro výpočet  $Nu$  podle vztahu (26) vypočteme ještě ze vztahu (13)  $Pe$  a pro výpočet  $Nu$  podle vztahu (25) vypočteme ještě  $Pr_w$  podle vztahu (16). Vypočteme  $Nu$  podle vztahu (25) nebo (26).
4. Pro případ proudění v přechodové oblasti vypočteme  $Pr$  podle vztahu (16) a poté podle vztahu (29)  $Nu$ .
5. Pro případ turbulentního proudění vypočteme  $Pr$  podle vztahu (16) a pro výpočet  $Nu$  podle vztahu (27) ještě  $Pr_w$  podle vztahu (16). Vypočteme  $Nu$  podle vztahu (27) nebo (28).



6. Ze vztahu (11) vypočteme  $\alpha$ , tj.  $\alpha = \frac{Nu\lambda}{l}$ .

7. Vypočteme podle vztahu (9) tepelný tok  $\dot{Q}$ .

#### **Nucená konvekce – trubkové systémy – příčné obtékání**

1. Vypočteme  $Re$ ,  $Pr$  a  $Pr_w$  podle vztahů (14) (16).

2. Podle vztahu (30) vypočteme  $Nu$ .

3. Ze vztahu (11) vypočteme  $\alpha$ , tj.  $\alpha = \frac{Nu\lambda}{l}$ .

4. Vypočteme podle vztahu (9) tepelný tok  $\dot{Q}$ .

#### **Nucená konvekce – obtékání podél rovinné stěny**

1. Vypočteme  $Re$  a  $Pr$  podle vztahu (14) (16).

2. Podle vztahu (22) vypočteme  $Nu$ .

3. Ze vztahu (11) vypočteme  $\alpha$ , tj.  $\alpha = \frac{Nu\lambda}{l}$ .

4. Vypočteme podle vztahu (9) tepelný tok  $\dot{Q}$ .

#### **Nucená konvekce – duplikátory**

1. Vypočteme  $Re_M$  a  $Pr$  podle vztahu (32) (16).

2. Podle vztahu (31) vypočteme  $Nu$ .

3. Ze vztahu (11) vypočteme  $\alpha$ , tj.  $\alpha = \frac{Nu\lambda}{l}$ .

4. Vypočteme podle vztahu (9) tepelný tok  $\dot{Q}$ .

#### **Konvekce se změnou skupenství**

##### **Kondenzace**

1. Vypočteme  $\alpha$  podle vztahu (35).

2. Podle vztahu (34) vypočteme hustotu tepelného toku  $q$ .

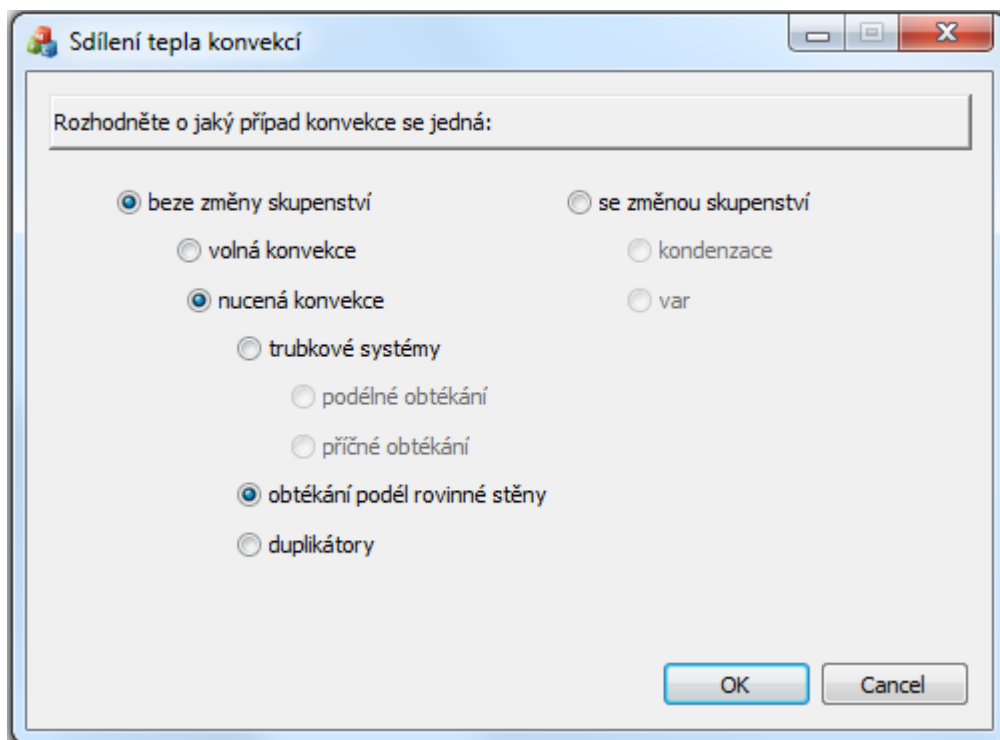
##### **Var**

1. Podle vztahu (38) vypočteme součinitele přestupu tepla  $\alpha$ .

## 4.2 Tvorba aplikace

Dialogové okno je základní prvek grafického uživatelského rozhraní, který jsem v aplikaci použila. Ze sady nástrojů (Toolbox) byly použity tyto další ovládací prvky – pro statický text *Static Text*, pro výběr *Radio button* (přepínač), pro vkládání vstupních hodnot a zobrazování vypočtených hodnot *Edit Control* (editační box), pro potvrzení, pokračování a provedení výpočtů *Button* (tlačítko). Aplikace obsahuje následující dialogová okna:

Úvodní Dialogové okno aplikace – **Sdílení tepla konvekcí**



Obr. 2 Dialogové okno – Sdílení tepla konvekcí

- ID: IDD\_MFCAPPLICATION\_BP\_DIALOG

V tomto dialogovém okně uživatel rozhodne, o jaký způsob konvekce se jedná.

Radio buton

- beze změny skupenství, ID: IDC\_RADIO\_bez\_zm\_skup
- volná konvekce, ID: IDC\_RADIO\_volna
- nucená konvekce, ID: IDC\_RADIO\_nucena
- trubkové systémy, ID: IDC\_RADIO\_trubka
- podélné obtékání, ID: IDC\_RADIO\_trubka\_podelne
- příčné obtékání, ID: IDC\_RADIO\_trubka\_pricne
- obtékání podél rovinné stěny, ID: IDC\_RADIO\_stena
- duplikátory, ID: IDC\_RADIO\_duplikator
- se změnou skupenství, ID: IDC\_RADIO\_se\_zm\_skup
- kondenzace, ID: IDC\_RADIO\_kondenzace
- var, ID: IDC\_RADIO\_var

Radio buttony jsou obslouženy tak, aby vždy byly zpřístupněny jen přepínače pro výběr v daný okamžik logicky možné.

Při spuštění aplikace je zaškrtnuta volba „beze změny skupenství“, toto je zajištěno v inicializační funkci dialogového okna takto

```
BOOL CMFCApplication_BPDlg::OnInitDialog()  
{ ...  
  
    ((CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO_bez_zm_skup))->SetCheck(1);  
    OnBnClickedRadiobezzmskup();  
  
}
```

Volba „beze změny skupenství je obsloužena takto:

```
void CMFCApplication_BPDlg::OnBnClickedRadiobezzmskup()  
{  
    GetDlgItem(IDC_RADIO_volna)->EnableWindow(TRUE);  
    GetDlgItem(IDC_RADIO_nucena)->EnableWindow(TRUE);  
    GetDlgItem(IDC_RADIO_trubka)->EnableWindow(FALSE);  
    GetDlgItem(IDC_RADIO_trubka_podelne)->EnableWindow(FALSE);  
    GetDlgItem(IDC_RADIO_trubka_pricne)->EnableWindow(FALSE);  
    GetDlgItem(IDC_RADIO_stena)->EnableWindow(FALSE);  
    GetDlgItem(IDC_RADIO_duplikator)->EnableWindow(FALSE);  
    GetDlgItem(IDC_RADIO_kondenzace)->EnableWindow(FALSE);  
    GetDlgItem(IDC_RADIO_var)->EnableWindow(FALSE);  
}
```

Volba „volná konvekce“:

```
void CMFCApplication_BPDlg::OnBnClickedRadiovolna()  
{  
    ((CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO_bez_zm_skup))->SetCheck(1);}
```

Všechny ostatní volby (přepínače), a to „nucená konvekce“, „trubkové systémy“, „podélné obtékání“, „příčné obtékání“, „obtékání podél rovinné stěny“, „duplikátory“, „se změnou skupenství“, „kondenzace“ a „var“ jsou obslouženy podobně (viz zdrojový kód MFCApplication\_BPDIg.cpp).

### Button

- OK, ID: IDOK

Volbou tohoto tlačítka se podle zvoleného způsobu konvekce otevře nové dialogové okno pro zadání vstupních hodnot a výpočet součinitele přestupu tepla a tepelného toku. Není-li výběr správně dokončen neprovede se operace žádná.

Volba „OK“:

```
void CMFCApplication_BPDIg::OnBnClickedOk()
{
    int c = ((CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO_volna))->GetCheck();
    if (c == 1) {
        Volna okno_volna;
        okno_volna.DoModal();
    }

    c = ((CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO_stena))->GetCheck();
    if (c == 1) {
        Stena okno_stena;
        okno_stena.DoModal();
    }

    c = ((CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO_duplikator))->GetCheck();
    if (c == 1) {
        Duplikator okno_duplikator;
        okno_duplikator.DoModal();
    }
    .
    .
    .
}
```

Podrobně viz zdrojový kód MFCApplication\_BPDIg.cpp.

## Dialogové okno – Volná konvekce

Volná konvekce

Zadejte:

Prandtlovo kritérium:

Měrná tepelná kapacita:  J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Kinematická viskozita:  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

Dynamická viskozita:  Pa s

Hustota:  kg m<sup>-3</sup>

Součinitel tepelné vodivosti :  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Teplota tekutiny:  °C

Teplota povrchu stěny:  °C

Teplotní součinitel objemové roztažnosti:  K<sup>-1</sup> >

Charakteristický rozměr:  m

proved' výpočet

---

Součinitel přestupu tepla je  W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

Zadejte:

Teplosměnná plocha:  m<sup>2</sup> >

proved' výpočet

---

Teplený tok je  W

zpět Cancel

Obr. 3 Dialogové okno – Volná konvekce

- ID: IDD\_DIALOG\_Volna

V tomto dialogovém okně uživatel zadá všechny vstupní hodnoty nutné pro výpočet součinitele přestupu tepla a tepelného toku pro případ volné konvekce.

### Static Text

Tento ovládací prvek byl použit pro popis veličin zadávaných do editačních boxů, tyto není třeba ošetřit programově, ale pouze ve vlastnostech ovládacího prvku.

Pro zobrazení jednotek zadávaných veličin byly také použity tyto ovládací prvky, a to

- IDC\_STATIC\_cp, jednotky měrné tepelné kapacity
- IDC\_STATIC\_ny, jednotky kinematické viskozity
- IDC\_STATIC\_eta, jednotky dynamické viskozity
- IDC\_STATIC\_ro, jednotky dynamické viskozity
- IDC\_STATIC\_lam, jednotky součinitele tepelné vodivosti
- IDC\_STATIC\_t, jednotky teploty kapaliny
- IDC\_STATIC\_tw, jednotky teploty povrchu stěny
- IDC\_STATIC\_beta, jednotky teplotního součinitele objemové roztažnosti
- IDC\_STATIC\_l, jednotky charakteristického rozměru
- IDC\_STATIC\_alfa, jednotky součinitele přestupu tepla
- IDC\_STATIC\_plocha, jednotky teplosměnné plochy
- IDC\_STATIC\_q, jednotky tepelného toku

avšak jejich zobrazení je třeba ošetřit programově při inicializaci dialogového okna takto:

```
BOOL Volna::OnInitDialog()  
{  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_cp, L"J kg\u207B\u00B9 K\u207B\u00B9");  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_eta, L"Pa s");  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_lam, L"W m\u207B\u00B9 K\u207B\u00B9");  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_ny, L"m\u00B2 s\u207B\u00B9");  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_ro, L"kg m\u207B\u00B3");  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_t, L"\u00B0C");  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_tw, L"\u00B0C");  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_beta, L"K\u207B\u00B9");  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_l, L"m");  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_plocha, L"m\u00B2");  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_alfa, L"W m\u207B\u00B2 K\u207B\u00B9");  
    SetDlgItemText(IDC_STATIC_q, L"W"); ...  
}
```

### Edit Control

- Prandtlovo kritérium, ID: IDC\_EDIT\_pr
- Měrná tepelná kapacita, ID: IDC\_EDIT\_cp
- Kinematická viskozita, ID: IDC\_EDIT\_ny
- Dynamická viskozita, ID: IDC\_EDIT\_eta
- Hustota, ID: IDC\_EDIT\_ro

- Součinitel tepelné vodivosti, ID: IDC\_EDIT\_lam
- Teplota kapaliny, ID: IDC\_EDIT\_t
- Teplota povrchu stěny, ID: IDC\_EDIT\_tw
- Teplotní součinitel objemové roztažnosti, ID: IDC\_EDIT\_beta
- Charakteristický rozměr, ID: IDC\_EDIT\_l
- Součinitel přestupu tepla, ID: IDC\_EDIT\_alfa
- Teplosměnná plocha, ID: IDC\_EDIT\_plocha
- Editační box pro zobrazení použitého vztahu pro výpočet Nuseltova kritéria, ID: IDC\_EDIT\_vzorec
- Tepelný tok, ID: IDC\_EDIT\_q

Při otevření dialogového okna Volná konvekce jsou zpřístupněny pro zápis všechny editační boxy pro zadání vstupních hodnot. Editační boxy pro zobrazení výsledků výpočtu (IDC\_EDIT\_alfa, IDC\_EDIT\_vzorec, IDC\_EDIT\_q) jsou pro zápis znepřístupněny, toto je nastaveno ve vlastnostech (Read Only – True).

Je-li změněn editační box IDC\_EDIT\_pr, pak je pro zápis znepřístupněn editační box IDC\_EDIT\_cp, IDC\_EDIT\_eta a IDC\_EDIT\_ro, je-li změněn editační box IDC\_EDIT\_cp je pro zápis znepřístupněn IDC\_EDIT\_pr. Při změně editačního boxu IDC\_EDIT\_eta je znepřístupněn IDC\_EDIT\_pr a IDC\_EDIT\_ro a při změně editačního boxu IDC\_EDIT\_ro je pro zápis znepřístupněn IDC\_EDIT\_eta, tato změna je zabezpečena takto:

```
void Volna::OnEnChangeEditpr()
{
    GetDlgItem(IDC_EDIT_cp)->EnableWindow(FALSE);
    GetDlgItem(IDC_EDIT_eta)->EnableWindow(FALSE);
    GetDlgItem(IDC_EDIT_ro)->EnableWindow(FALSE);
}
void Volna::OnEnChangeEditcp()
{
    GetDlgItem(IDC_EDIT_pr)->EnableWindow(FALSE);
    pom_pr = 0;
}
void Volna::OnEnChangeEditeta()
{
    GetDlgItem(IDC_EDIT_pr)->EnableWindow(FALSE);
    pom_pr = 0;
    GetDlgItem(IDC_EDIT_ro)->EnableWindow(FALSE);
    pom_ro = 0;
}
void Volna::OnEnChangeEditro()
{
    GetDlgItem(IDC_EDIT_eta)->EnableWindow(FALSE);
}
```

„pom\_pr“ a „pom\_ro“ jsou pomocné proměnné pro načtení správných vstupních údajů a provedení výpočtu.

### Button

- tlačítko (>), jehož volbou se otevře nové dialogové okno (IDD\_DIALOG\_Beta) pro výpočet teplotního součinitele objemové roztažnosti (platí pouze pro vzduch), není-li uživateli jeho hodnota známa, ID: IDC\_BUTTON\_beta\_vypocet

```
void Volna::OnBnClickedButtonbetavypocet()
{
    Beta okno_beta;
    okno_beta.DoModal();
}
```

- tlačítko (>), jehož volbou se otevře nové dialogové okno (IDD\_DIALOG\_Plocha) pro výpočet teplosměnné plochy, ID: IDC\_BUTTON\_plocha\_vypocet

```
void Volna::OnBnClickedButtonplochavypocet()
{
    Plocha okno_plocha;
    okno_plocha.DoModal();
}
```

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_proved

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet součinitele přestupu tepla, výsledek vč. použitého vztahu pro výpočet Nuseltova čísla se zobrazí v editačním boxu IDC\_EDIT\_alfa a IDC\_EDIT\_vzorec.

Tlačítko „proved' výpočet“ je obslouženo takto:

```
void Volna::OnBnClickedButtonproved()
{
    CString tx, tx_nu;
    double pr, cp, eta, ro;
    BOOL chybaPrevodu;

    GetDlgItemText(IDC_EDIT_ny, tx);
    double ny = ChytryPrevod(tx, chybaPrevodu);
    if (chybaPrevodu)
    {
        AfxMessageBox(L"Neplatná hodnota kinematické viskozity");
        GetDlgItem(IDC_EDIT_ny)->SetFocus(); //presune kurzor na pole,
        ktere je chybně vyplněno
        ((CEdit*)GetDlgItem(IDC_EDIT_ny))->SetSel(0, -1); //oznaci
        text v editu od zacatku az do konce
        return;
    }

    if (pom_pr == 0){
        GetDlgItemText(IDC_EDIT_cp, tx);
        cp = ChytryPrevod(tx, chybaPrevodu);
```



```
        if (chybaPrevodu)
        {
            AfxMessageBox(L"Neplatná hodnota měrné tepelné kapa-
city");

            GetDlgItem(IDC_EDIT_cp)->SetFocus();
            ((CEdit*)GetDlgItem(IDC_EDIT_cp))->SetSel(0, -1);
            return;
        }

        if (pom_ro == 0){
            GetDlgItemText(IDC_EDIT_eta, tx);
            eta = ChytryPrevod(tx, chybaPrevodu);
            if (chybaPrevodu)
            {
                ...
            }
        }
        else {
            GetDlgItemText(IDC_EDIT_ro, tx);
            ro = ChytryPrevod(tx, chybaPrevodu);
            if (chybaPrevodu)
            {
                ...
            }
        }
    }
    else {
        GetDlgItemText(IDC_EDIT_pr, tx);
        pr = ChytryPrevod(tx, chybaPrevodu);
        if (chybaPrevodu)
        {
            ...
        }
    }

    GetDlgItemText(IDC_EDIT_lam, tx);
    double lam = ChytryPrevod(tx, chybaPrevodu);
    if (chybaPrevodu)
    {
        ...
    }

    if (pom_pr == 0) {
        if (pom_ro == 0){
            pr = (cp*eta) / lam;
        }
        else {
            eta = ny * ro;
            pr = (cp*eta) / lam;
        }
    }

    GetDlgItemText(IDC_EDIT_t, tx);
    double t = ChytryPrevod(tx, chybaPrevodu);
    if (chybaPrevodu)
    {
        ...
    }
    GetDlgItemText(IDC_EDIT_tw, tx);
    double tw = ChytryPrevod(tx, chybaPrevodu);
    if (chybaPrevodu)
    {
        ...
    }

    delta_t = fabs (t - tw);

    GetDlgItemText(IDC_EDIT_beta, tx);
    double beta = ChytryPrevod(tx, chybaPrevodu);
    if (chybaPrevodu)
    {
        ...
    }

    GetDlgItemText(IDC_EDIT_l, tx);
```

```

double l = ChytryPrevod(tx, chybaPrevodu);
if (chybaPrevodu)
{
    ...
}

double g = 9.80665;
double gr = (g*pow(l, 3)*beta*delta_t) / pow(ny, 2);
double grpr = gr*pr;
double nu;

if (grpr < 0.01){
    nu = 0.5;
    tx_nu = L"Nu = 0.5(GrPr)\u2070";
}
else if (grpr < 500){
    nu = 1.18*pow(grpr, 0.125);
    tx_nu = L"Nu = 1.18(GrPr)\u2070\u2219\u00B9\u00B2\u2075";
}
else if (grpr < 20000000){
    nu = 0.54*pow(grpr, 0.25);
    tx_nu = L"Nu = 0.54(GrPr)\u2070\u2219\u00B2\u2075";
}
else {
    nu = 0.135*pow(grpr, 0.333333);
    tx_nu = L"Nu = 0.135(GrPr)\u2070\u2219\u00B3\u00B3\u00B3";
}
alfa = (nu*lam) / l;

tx.Format(L"%.2f", alfa);

SetDlgItemText(IDC_EDIT_alfa, tx);
SetDlgItemText(IDC_EDIT_vzorec, tx_nu);
}

```

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_vypocet\_q

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet tepelného toku a výsledek se zobrazí v editačním boxu IDC\_EDIT\_q.

Tlačítko „proved' výpočet“ je obslouženo takto:

```

void Volna::OnBnClickedButtonvypocetq()
{
    CString tx;
    BOOL chybaPrevodu;

    GetDlgItemText(IDC_EDIT_plocha, tx);
    double plocha = ChytryPrevod(tx, chybaPrevodu);
    if (chybaPrevodu)
    {
        ...
    }
    double q = alfa*delta_t*plocha;

    tx.Format(L"%.2f", q);

    SetDlgItemText(IDC_EDIT_q, tx);}

```

Editací boxy pro vstupní hodnoty lze ve vlastnostech nastavit pouze na celá čísla nebo text, pro naše výpočty je třeba načtený text převést na desetinné číslo (double). Je vytvořena

funkce `double ChytryPrevod(CString text, BOOL &chyba)`, jejíž tělo je umístěno v souboru „Volna.cpp“ a její deklarace v hlavičkovém souboru „MFCApplication\_BP.h“, tak je funkce přístupná pro všechny třídy.

```
double ChytryPrevod(CString text, BOOL &chyba) //funkce pro převod na
double
{
    chyba = TRUE;
    if (text.GetLength() == 0){
        return 0;
    } //text nulove delky nema cenu prevadet

    text = text.Trim(); //odstrani pripadne mezery pred a za textem
    text.Replace(',', '.'); //vsechny carky v textu nahradi teckama

    wchar_t* endprt;
    double cislo = wctod(text, &endprt); //nahrada za _wtof, navíc
vrati kde se prevod zastavil
    if (*endprt == L'\0'){
        chyba = FALSE;
    } //pokud se prevod zastavil az na konci textu (ukoncovaci nula
stringu), tak byl uspesny

    return cislo;
}
```

Při inicializaci dialogového okna je nastaven větší (lépe čitelnější) font pro zobrazení výsledků výpočtu takto

```
CFont fontVZOREC_volna;
CToolTipCtrl toolTip_volna;

BOOL Volna::OnInitDialog()
{
    . . .
    CFont* pF = GetDlgItem(IDC_EDIT_vzorec)->GetFont();
    LOGFONT lFont;
    pF->GetLogFont(&lFont);
    lFont.lfHeight = -16; //zvetseni - pozor roztahnout i okraje sta-
ticu v resource editoru
    fontVZOREC_volna.CreateFontIndirect(&lFont);

    GetDlgItem(IDC_EDIT_vzorec)->SetFont(&fontVZOREC_volna);
    GetDlgItem(IDC_EDIT_alfa)->SetFont(&fontVZOREC_volna);
    GetDlgItem(IDC_EDIT_q)->SetFont(&fontVZOREC_volna);
```

a zobrazení nápovědy (tooltip) k editačním boxům takto

```
toolTip_volna.AddTool(GetDlgItem(IDC_EDIT_cp), L"při střední tep-
lotě tekutiny");
toolTip_volna.AddTool(GetDlgItem(IDC_EDIT_eta), L"při střední tep-
lotě tekutiny");
toolTip_volna.AddTool(GetDlgItem(IDC_EDIT_pr), L"při střední tep-
lotě tekutiny");
toolTip_volna.AddTool(GetDlgItem(IDC_EDIT_lam), L"při střední tep-
lotě tekutiny");
toolTip_volna.AddTool(GetDlgItem(IDC_EDIT_ny), L"při střední tep-
lotě tekutiny");
```

```

        tooltip_volna.AddTool(GetDlgItem(IDC_EDIT_beta), L"při střední tep-
lotě tekutiny");
        tooltip_volna.AddTool(GetDlgItem(IDC_EDIT_ro), L"při střední tep-
lotě tekutiny");
        tooltip_volna.AddTool(GetDlgItem(IDC_EDIT_l), L"průměr: koule, vo-
dorovný válec\nvýška: svislá rovinná i válcová stěna\nkratší strana: vo-
dorovná stěna");
        tooltip_volna.AddTool(GetDlgItem(IDC_BUTTON_beta_vypocet), L"výpo-
čet platí pouze pro vzduch");
        return TRUE;
    }

```

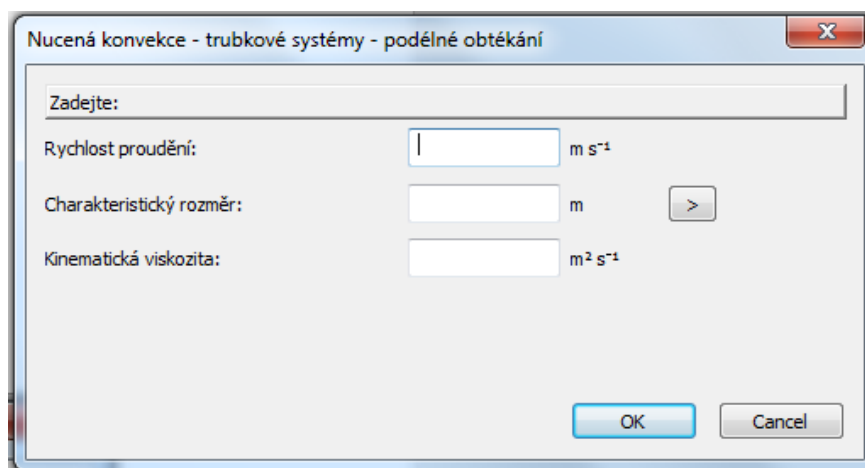
Pro zobrazení nápovědy je dále třeba implementovat funkci

```

BOOL Volna::PreTranslateMessage(MSG *pMsg)
{
    tooltip_volna.RelayEvent(pMsg);
    return CDialog::PreTranslateMessage(pMsg);
}

```

### Nucená konvekce – trubkové systémy – podélné obtékání



Obr. 4 Dialogové okno – Nucená konvekce – trubkové systémy – podélné obtékání

- ID: IDD\_DIALOG\_Trubka\_podelne

V tomto dialogovém okně uživatel zadá všechny vstupní hodnoty pro výpočet *Re* Static Text

Ovládací prvky byly použity pro popis veličin zadávaných do editačních boxů, a pro zobrazení jednotek zadávaných veličin, podobně jako u dialogového okna pro volnou konvekci (viz zdrojový kód Trubka\_podelne.cpp).

Edit Control

- Rychlost proudění, ID: IDC\_EDIT\_v
- Charakteristický rozměr, ID: IDC\_EDIT\_l
- Kinematická viskozita, ID: IDC\_EDIT\_ny

Button

- Tlačítko (>)), jehož volbou se otevře nové dialogové okno (IDD\_DIALOG\_d\_ek) pro výpočet tzv. ekvivalentního průměru, ID: IDC\_BUTTON\_d\_ek\_vypocet

```
void Trubka_podelne::OnBnClickedButtondekvyvypocet()
{
    D_ek okno_d_ek;
    okno_d_ek.DoModal();
}
```

- OK, ID: IDOK

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet  $Re$  a podle jeho hodnoty se otevře další dialogové okno pro výpočet součinitele přestupu tepla a tepelného toku pro laminární, přechodovou nebo turbulentní oblast proudění.

Tlačítko „OK“ je obsluženo takto:

```
void Trubka_podelne::OnBnClickedOk()
{
    CString tx;
    BOOL chybaPrevodu;

    ...načtení v, l a ny...

    double re = (v*l) / ny;

    if (re < 2300) {
        Trubka_podelne_laminarni okno_laminarni;
        okno_laminarni.DoModal();
    }
    else if (re < 10000){
        Trubka_podelne_prechodova okno_prechodova;
        okno_prechodova.DoModal();
    }
    else if (re < 5000000)
    {
        Trubka_podelne_turbulentni okno_turbulentni;
        okno_turbulentni.DoModal();
    }
    else AfxMessageBox(L"Hodnota Re mimo stanovenou oblast");
}
```

Podrobně viz zdrojový kód Trubka\_podelne.cpp.

## Laminární oblast

Laminární oblast (Re < 2 300)

Zadejte:

Rychlost proudění:  m s<sup>-1</sup>

Charakteristický rozměr:  m

Kinematická viskozita:  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

Dynamická viskozita:  Pa s

Hustota:  kg m<sup>-3</sup>

Měrná tepelná kapacita:  J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Součinitel tepelné vodivosti:  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Teplotní součinitel objemové roztažnosti:  K<sup>-1</sup> >

Teplota tekutiny:  °C

Teplota stěny trubky:  °C

Teplotní součinitel vodivosti:  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

(1)  $Nu = 0,74 Pe^{0.2} (GrPr)^{0.1}$   
(Re < 2300; Pe > 1800; GrPr < 3,6 · 10<sup>4</sup>; 4d > 50)

proved' výpočet (1)

Součinitel přestupu tepla je  W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

Teplosměnná plocha:  m<sup>2</sup> >

Tepelný tok je  W

výpočet (1)

(2)  $Nu = 0,15 Re^{0.32} Pr^{0.33} (GrPr)^{0.1} (Pr / Pr_w)^{0.25} \epsilon_f$   
(GrPr < 5 · 10<sup>4</sup>; koeficient  $\epsilon_f$  je stanoven dle poměru L/d)

Zadejte:

Kinematická viskozita\_w:  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

Dynamická viskozita\_w:  Pa s

Hustota\_w:  kg m<sup>-3</sup>

Měrná tepelná kapacita\_w:  J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Součinitel tepelné vodivosti\_w:  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Délka trubky:  m

proved' výpočet (2)

Součinitel přestupu tepla je  W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

Tepelný tok je  W

výpočet (2)

zpět Cancel

Obr. 5 Dialogové okno – Laminární oblast

- ID: IDD\_DIALOG\_Trubka\_podelne\_laminarni

V tomto dialogovém okně uživatel zadá všechny další vstupní hodnoty potřebné pro výpočet součinitele přestupu tepla a tepelného toku, má možnost provést výpočet podle dvou vtaů Nuseltova kritéria, hodnoty zadané v rodičovském dialogovém okně jsou z něj vloženy a nelze je editovat.

Ovládací prvky *Static Text* byly použity pro popis veličin zadávaných do editačních boxů a pro zobrazení jednotek zadávaných veličin podobně jako u dialogového okna pro volnou konvekci, stejně tak i *Edit Control* pro zadání vstupních hodnot a tlačítka (>) pro výpočet teplotního součinitele objemové roztažnosti a teplosměnné plochy, podrobně viz zdrojový kód Trubka\_podelne\_laminarni.cpp.

Button

- proved' výpočet (1), ID: IDC\_BUTTON\_vypocet1

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet součinitele přestupu tepla podle vzorce pro  $Nu$  (26).

Tlačítko „proved' výpočet (1)“ je obslouženo takto:

```
void Trubka_podelne_laminarni::OnBnClickedButtonvypocet1()
{
    CString tx;
    double eta, ny;
    BOOL chybaPrevodu;

    if (pom_ro == 0) {
        ...načtení eta...
        GetParent()->GetDlgItemText(IDC_EDIT_ny, tx);
        ny = Prevod(tx);
    }
    else {
        ...načtení ro...
        GetParent()->GetDlgItemText(IDC_EDIT_ny, tx);
        ny = Prevod(tx);
        eta = ny * ro;
    }

    ... načtení cp, lam, beta, t a tw...
    delta_t = fabs(t - tw);
    double pr = (cp*eta) / lam;

    GetParent()->GetDlgItemText(IDC_EDIT_v, tx);
    double v = Prevod(tx);
    GetParent()->GetDlgItemText(IDC_EDIT_l, tx);
    double l = Prevod(tx);
    ...načtení a...

    double pe = (v*1) / a;
    double g = 9.80665;
    double gr = ((g*pow(1, 3)) / pow(ny, 2))*beta*delta_t;
    double grpr = gr * pr;

    double nul = 0.74*pow(pe, 0.2)*pow(grpr, 0.1);
    alfa1 = (nul*lam) / l;

    tx.Format(L"% .2f", alfa1);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT_alfa1, tx);
}

```

- proved' výpočet (2), ID: IDC\_BUTTON\_vypocet2

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet součinitele přestupu tepla podle vzorce pro  $Nu$  (25).

Tlačítko „proved' výpočet (2)“ je obslouženo takto:

```
void Trubka_podelne_laminarni::OnBnClickedButtonvypocet2()
{
    CString tx;
    double eta, eta_w, ny;
    BOOL chybaPrevodu;

```

```
if (pom_ro == 0){
    ...načtení eta, ny...
}
else {
    ...načtení ro, ny...
    eta = ny * ro;
}
...načtení cp, lam, beta, t, tw...

delta_t = fabs(t - tw);
double pr = (cp*eta) / lam;

GetParent()->GetDlgItemText(IDC_EDIT_v, tx);
double v = Prevod(tx);
GetParent()->GetDlgItemText(IDC_EDIT_l, tx);
double l = Prevod(tx);

if (pom_ny_w == 0){
    ...načtení eta_w...
}
else{
    ...načtení ny_w a ro_w...
    eta_w = ny_w * ro_w;
}

...načtení cp_w, lam_w, delka...

double pr_w = (cp_w * eta_w) / lam_w;
double delkad = delka / l;
double ef;

if (delkad >= 50){
    ef = 1;
}
else if (delkad >= 40){
    ef = 1.02;
}
else if (delkad >= 30){
    ef = 1.05;
}
else if (delkad >= 20){
    ef = 1.13;
}
else if (delkad >= 15){
    ef = 1.18;
}
else if (delkad >= 10){
    ef = 1.28;
}
else if (delkad >= 5){
    ef = 1.44;
}
else if (delkad >= 2){
    ef = 1.7;
}
else {
    ef = 1.9;
}

double prprw = pr / pr_w;
double re = (v * l) / ny;
```



```

double g = 9.80665;
double gr = ((g*pow(l, 3)) / pow(ny, 2))*beta*delta_t;
double grpr = gr * pr;
double nu2 = 0.15*pow(re, 0.32)*pow(pr, 0.33)*pow(grpr, 0.1) +
pow(prprw, 0.25)*ef;

alfa2 = (nu2*lam) / l;
tx.Format(L"% .2f", alfa2);
SetDlgItemText(IDC_EDIT_alfa2, tx);
}

```

Pro převod hodnot zadaných do editačního boxu v rodičovském dialogovém okně `IDD_DIALOG_Trubka_podelne` je vytvořena funkce `double Prevod(CString text)`, která již neobsahuje kontrolu správnosti zadávaného údaje. Její tělo je umístěno v souboru „Trubka\_podelne.cpp“ a její deklarace v hlavičkovém souboru „Trubka\_podelne.h“.

```

double Prevod(CString text) //funkce pro převod na double bez kontroly
{
    text = text.Trim(); //odstrani pripadne mezery pred a za textem
    text.Replace(',','.'); //vsechny carky v textu nahradi teckama
    //wchar_t* endprt;
    double cislo = _wtof(text);
    return cislo;
}

```

- výpočet (1), ID: `IDC_BUTTON_vypocet_q1`

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet tepelného toku pro součinitele přestupu tepla vypočteného volbou „proved' výpočet (1)“.

Tlačítko „výpočet (1)“ je obslouženo takto:

```

void Trubka_podelne_laminarni::OnBnClickedButtonvypocetq1()
{
    CString tx;
    BOOL chybaPrevodu;

    ...načtení plochy...

    double q1 = alfa1*delta_t*plocha;

    tx.Format(L"% .2f", q1);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT_q1, tx);
}

```

- výpočet (2), ID: `IDC_BUTTON_vypocet_q2`

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet tepelného toku pro součinitele přestupu tepla vypočteného volbou „proved' výpočet (2)“.

Tlačítko „výpočet (2)“ je obslouženo podobně jako „výpočet (1)“, podrobně viz zdrojový kód `Trubka_podelne_laminarni.cpp`.

## Přechodová oblast

Obr. 6 Dialogové okno – Přechodová oblast

- ID: IDD\_DIALOG\_Trubka\_podelne\_prechodova

Ovládací prvky *Static Text* byly použity pro popis veličin zadávaných do editačních boxů a pro zobrazení jednotek zadávaných veličin podobně jako u dialogového okna pro volnou konvekci, stejně tak i *Edit Control* pro zadání vstupních hodnot a tlačítko (>) pro výpočet teplosměnné plochy, podrobně viz zdrojový kód `Trubka_podelne_prechodova.cpp`.

Button

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_vypocet  
Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet součinitele přestupu tepla.

Tlačítko „proved' výpočet“ je obslouženo takto:

```
void Trubka_podelne_prechodova::OnBnClickedButtonvypocet()
{
    CString tx;
    double eta, eta_w, ny;
    BOOL chybaPrevodu;

    if (pom_ro == 0) {
        ...načtení eta, ny... }
}
```

```

else {
    ...načtení ro...
    eta = ny * ro;
}

...načtení cp, lam, t, tw...

delta_t = fabs(t - tw);
double pr = (cp*eta) / lam;

if (pom_ny_w == 0){
    ...načtení eta_w...
}
else{
    ...načtení ny_w a ro_w...
    eta_w = ny_w * ro_w;
}

...načtení delka, v, l...

double re = (v*l) / ny;
double ddelka = l / delka;
double etaetaw = eta / eta_w;
double nu = 0.116*(pow(re, 0.66666)-125)*pow(pr,
0.33333)*(1+pow(ddelka, 0.66666))*pow(etaetaw,0.14);
alfa = (nu*lam) / l;

tx.Format(L"%.2f", alfa);
SetDlgItemText(IDC_EDIT_alfa, tx);
}

```

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_vypocetq  
Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet tepelného toku.

Tlačítko „proved' výpočet“ je obslouženo takto:

```

void Trubka_podelne_prechodova::OnBnClickedButtonvypocetq()
{
    CString tx;
    BOOL chybaPrevodu;

    ...načti plocha...

    double q = alfa*delta_t*plocha;

    tx.Format(L"%.2f", q);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT_q, tx);
}

```

Podrobně viz zdrojový kód Trubka\_podelne.cpp.

## Turbulentní oblast

Obr. 7 Dialogové okno – Turbulentní oblast

- ID: IDD\_DIALOG\_Trubka\_podelne\_turbulentni

V tomto dialogovém okně uživatel zadá všechny další vstupní hodnoty potřebné pro výpočet součinitele přestupu tepla a tepelného toku, má možnost provést výpočet podle dvou vtaů Nuseltova kritéria.

Ovládací prvky *Static Text* byly použity pro popis veličin zadávaných do editačních boxů a pro zobrazení jednotek zadávaných veličin podobně jako u dialogového okna pro volnou konvekci, stejně tak i *Edit Control* pro zadání vstupních hodnot a tlačítko (>) pro výpočet teplosměnné plochy, podrobně viz zdrojový kód `Trubka_podelne_turbulentni.cpp`.

### Button

- proved' výpočet (1), ID: IDC\_BUTTON\_vypocet1

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet součinitele přestupu tepla podle vzorce pro  $Nu$  (28).

Tlačítko „proved' výpočet (1)“ je obsluženo takto:

```
void Trubka_podelne_turbulentni::OnBnClickedButtonvypocet1()
```

```

{
    CString tx;
    double eta, ny;
    BOOL chybaPrevodu;

    if (pom_ro == 0){
        ...načtení eta, ny...
    }
    else {
        ...načtení ro, ny...
        eta = ny * ro;
    }

    ...načtení cp, lam...

    double pr = (cp*eta) / lam;

    ...načtení v, l...

    double re = (v*1) / ny;
    double nul = 0.023*pow(re, 0.8)*pow(pr, 0.4);
    alfa1 = (nul*lam) / l;

    tx.Format(L"%.2f", alfa1);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT_alfa1, tx);
}

```

- proved' výpočet (2), ID: IDC\_BUTTON\_vypocet2

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet součinitele přestupu tepla podle vzorce pro  $Nu$  (27).

Tlačítko „proved' výpočet (2)“ je obsluženo takto:

```

void Trubka_podelne_turbulentni::OnBnClickedButtonvypocet2()
{
    CString tx;
    double eta, eta_w, ny;
    BOOL chybaPrevodu;

    if (pom_ro == 0){
        ...načtení eta, ny...
    }
    else {
        ...načtení ro, ny...
        eta = ny * ro;
    }

    ...načtení cp, lam...
    double pr = (cp*eta) / lam;

    ...načtení v, l...
    double re = (v*1) / ny;

    if (pom_ny_w == 0){
        ...načtení eta_w...
    }
    else{
        ...načtení ny_w, ro_w...
    }
}

```

```

        eta_w = ny_w * ro_w;
    }

    ...načtení cp_w, lam_w...

    double pr_w = (cp_w*eta_w) / lam_w;
    double prprw = pr / pr_w;
    double nu2 = 0.021*pow(re, 0.8)*pow(pr, 0.43)*pow(prprw, 0.25);
    alfa2 = (nu2*lam) / l;

    tx.Format(L"% .2f", alfa2);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT_alfa2, tx);
}

```

- výpočet (1), ID: IDC\_BUTTON\_vypocet\_q1  
Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet tepelného toku pro součinitele přestupu tepla vypočteného volbou „proved' výpočet (1)“.

Tlačítko „výpočet (1)“ je obslouženo takto:

```

void Trubka_podelne_turbulentni::OnBnClickedButtonvypocetq1()
{
    CString tx;
    BOOL chybaPrevodu;

    ...načtení t, tw...
    delta_t = fabs(t - tw);

    ...načtení plocha...

    double q1 = alfa1*delta_t*plocha;

    tx.Format(L"% .2f", q1);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT_q1, tx);
}

```

- výpočet (2), ID: IDC\_BUTTON\_vypocet\_q2  
Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet tepelného toku pro součinitele přestupu tepla vypočteného volbou „proved' výpočet (2)“.

Tlačítko „výpočet (2)“ je obslouženo podobně jako „výpočet (1)“, podrobně viz zdrojový kód Trubka\_podelne\_turbulentni.cpp.

## Nucená konvekce – trubkové systémy – příčné obtékání

Nucená konvekce - trubkové systémy - příčné obtékání

Zadejte:

Rychlost proudění:  m s<sup>-1</sup>

Charakteristický rozměr:  m

Kinematická viskozita:  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> Prandtlovo kritérium\_w:

Prandtlovo kritérium:  Měrná tepelná kapacita\_w:  J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Měrná tepelná kapacita:  J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> Kinematická viskozita\_w:  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

Dynamická viskozita:  Pa s Dynamická viskozita\_w:  Pa s

Hustota:  kg m<sup>-3</sup> Hustota\_w:  kg m<sup>-3</sup>

Součinitel tepelné vodivosti:  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> Součinitel tepelné vodivosti\_w:  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Poměr roztečí trubek:

Uspořádání trubek:  řadové  šachovnicové

---

Součinitel přestupu tepla je  W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

Zadejte:

Teplota tekutiny:  °C

Teplota povrchu stěny:  °C

Teplosměnná plocha:  m<sup>2</sup>

---

Tepelný tok je  W

Obr. 8 Dialogové okno – Nucená konvekce – trubkové systémy – příčné obtékání

- ID: IDD\_DIALOG\_Trubka\_pricne

Ovládací prvky *Static Text* byly použity pro popis veličin zadávaných do editačních boxů a pro zobrazení jednotek zadávaných veličin podobně jako u dialogového okna pro volnou konvekci, stejně tak i *Edit Control* pro zadání vstupních hodnot a tlačítko (>) pro výpočet teplosměnné plochy, podrobně viz zdrojový kód `Trubka_pricne.cpp`.

Button

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_vypocet  
Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet součinitele přestupu tepla, výsledek vč. použitého vztahu pro výpočet Nuseltova čísla se zobrazí v příslušných editačních boxech.

Tlačítko „proved' výpočet“ je obslouženo takto:

```
void Trubka_pricne::OnBnClickedButtonvypocet()
{
    CString tx, tx_nu;
    double pr, pr_w, cp, cp_w, eta, eta_w, ro, ro_w, ny_w, lam, lam_w;
    double k, m, n;
    BOOL chybaPrevodu;

    ...načtení v, l, ny...

    if (pom_pr == 0){
        ...načtení cp...

        if (pom_ro == 0){
            ...načtení eta...
        }
        else {
            ...načtení ro...
        }
    }
    else {
        ...načtení pr...
    }

    ...načtení lam...

    if (pom_pr == 0) {
        if (pom_ro == 0){
            pr = (cp*eta) / lam;
        }
        else {
            eta = ny * ro;
            pr = (cp*eta) / lam;
        }
    }

    if (pom_pr_w == 0){
        ...načtení cp_w...

        if (pom_ny_w == 1){
            ...načtení ny_w, ro_w...
        }
        else {
            ...načtení eta_w...
        }

        ...načtení lam_w...
    }
    else {
```



```

        ...načtení pr_w...
    }
    if (pom_pr_w == 0) {
        if (pom_ny_w == 1) {
            eta_w = ny_w * ro_w;
            pr_w = (cp_w*eta_w) / lam_w;
        }
        else {
            pr_w = (cp_w*eta_w) / lam_w;
        }
    }

    ...načtení s1_s2...

    int rada = ((CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO_rada))->GetCheck();
    double re = (v*1) / ny;

    if (re > 30 && re < 200) {
        if (rada == 1) {
            k = 0.52;
            m = 0.5;
            n = 0;
            tx_nu = L"Nu = 0.52 Re\u2070\u2219\u2075
Pr\u2070\u2219\u00B3\u2076 (Pr/Prw)\u2070\u2219\u00B2\u2075";
        }
        else if (s1_s2 < 2) {
            k = 0.6;
            m = 0.5;
            n = 0.2;
            tx_nu = L"Nu = 0.6 Re\u2070\u2219\u2075
Pr\u2070\u2219\u00B3\u2076 (s\u2081/s\u2082)\u2070\u2219\u00B2
(Pr/Prw)\u2070\u2219\u00B2\u2075";
        }
        else {
            k = 0.6;
            m = 0.5;
            n = 0;
            tx_nu = L"Nu = 0.6 Re\u2070\u2219\u2075
Pr\u2070\u2219\u00B3\u2076 (Pr/Prw)\u2070\u2219\u00B2\u2075";
        }
    }
    else if (re < 200000) {
        if (rada == 1) {
            k = 0.27;
            m = 0.63;
            n = 0;
            tx_nu = L"Nu = 0.27 Re\u2070\u2219\u2076\u00B3
Pr\u2070\u2219\u00B3\u2076 (Pr/Prw)\u2070\u2219\u00B2\u2075";
        }
        else if (s1_s2 < 2) {
            k = 0.35;
            m = 0.6;
            n = 0.2;
            tx_nu = L"Nu = 0.35 Re\u2070\u2219\u2076
Pr\u2070\u2219\u00B3\u2076 (s\u2081/s\u2082)\u2070\u2219\u2070\u00B2
(Pr/Prw)\u2070\u2219\u00B2\u2075";
        }
    }
}

```

```

    }
    else {
        k = 0.4;
        m = 0.6;
        n = 0;
        tx_nu = L"Nu = 0.4 Re\u2070\u2219\u2076
Pr\u2070\u2219\u00B3\u2076 (Pr/Prw)\u2070\u2219\u00B2\u2075";

    }
}
else if (re < 1600000){
    if (rada == 1){
        k = 0.02;
        m = 0.84;
        n = 0;
        tx_nu = L"Nu = 0.02 Re\u2070\u2219\u2078\u2074
Pr\u2070\u2219\u00B3\u2076 (Pr/Prw)\u2070\u2219\u00B2\u2075";

    }
    else {
        k = 0.021;
        m = 0.84;
        n = 0;
        tx_nu = L"Nu = 0.21 Re\u2070\u2219\u2078\u2074
Pr\u2070\u2219\u00B3\u2076 (Pr/Prw)\u2070\u2219\u00B2\u2075";

    }
}

double prpr_w = pr / pr_w;
double nu = k*pow(re, m)*pow(pr, 0.36)*pow(s1_s2, n)*pow(prpr_w,
n);
alfa = (nu*lam) / l;

tx.Format(L"% .2f", alfa);

SetDlgItemText(IDC_EDIT_alfa, tx);
SetDlgItemText(IDC_EDIT_vzorec2, tx_nu);
}

```

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_vypocetq

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet tepelného toku. Jeho obsluha je provedena obdobně jako v předchozích výpočtech  $q$ , podrobně viz zdrojový kód `Trubka_pricne.cpp`.

## Nucená konvekce – obtékání podél rovinné stěny

Nucená konvekce - obtékání podél rovinné stěny

Zadejte:

Rychlost proudění:  m s<sup>-1</sup>

Charakteristický rozměr:  m

Kinematická viskozita:  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

Prandtlovo kritérium:

Měrná tepelná kapacita:  J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Dynamická viskozita:  Pa s

Hustota:  kg m<sup>-3</sup>

Součinitel tepelné vodivosti:  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

proved' výpočet

Součinitel přestupu tepla je  W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

Zadejte:

Teplosměnná plocha:  m<sup>2</sup> >

Teplota tekutiny:  °C

Teplota povrchu stěny:  °C

proved' výpočet

Tepelný tok je  W

zpět Cancel

Obr. 9 Dialogové okno – Nucená konvekce – obtékání podél rovinné stěny

- ID: IDD\_DIALOG\_Stena

Ovládací prvky *Static Text* byly použity pro popis veličin zadávaných do editačních boxů a pro zobrazení jednotek zadávaných veličin podobně jako u dialogového okna pro volnou konvekci, stejně tak i *Edit Control* pro zadání vstupních hodnot a tlačítko (>) pro výpočet teplosměnné plochy, podrobně viz zdrojový kód Stena.cpp.

Button

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_vypocet

Tlačítko „proved' výpočet“ je obslouženo takto:

```
void Stena::OnBnClickedButtonvypocet()
{
    CString tx, tx_nu;
    double pr, cp, eta, ro;
    BOOL chybaPrevodu;

    ...načtení v, l, ny...

    if (pom_pr == 0){
        ...načtení cp...

        if (pom_ro == 0){
            ...načtení eta...
        }
        else {
            ...načtení ro...
        }
    }
    else {
        ...načtení pr...
    }

    ...načtení lam...

    if (pom_pr == 0) {
        if (pom_ro == 0){
            pr = (cp*eta) / lam;
        }
        else {
            eta = ny * ro;
            pr = (cp*eta) / lam;
        }
    }

    double re = (v*l)/ny;
    double nu = 0.0356*pow(re, 0.8)*pow(pr, 0.4);
    alfa = (nu*lam) / l;

    tx.Format(L"%.2f", alfa);
    tx_nu = L"Nu = 0.0356 Re\u2070\u2219\u2078 Pr\u2070\u2219\u2074";

    SetDlgItemText(IDC_EDIT_alfa, tx);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT_vzorec, tx_nu);
}
```

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_vypocetq,

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet tepelného toku. Jeho obsluha je provedena obdobně jako v předchozích výpočtech q, podrobně viz zdrojový kód Stena.cpp.

## Nucená konvekce – duplikátory

Duplikátory

Zadejte:

Charakteristická rychlost:  m s<sup>-1</sup>

Průměr míchadla:  m

Průměr nádoby:  m      Dynamická viskozita\_w:  Pa s

Výška lopatek:  m      Kinematická viskozita\_w:  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

Hustota:  kg m<sup>-3</sup>      Hustota\_w:  kg m<sup>-3</sup>

Dynamická viskozita:  Pa s      Měrná tepelná kapacita:  J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Kinematická viskozita:  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>      Součinitel tepelné vodivosti:  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

proved' výpočet

Součinitel přestupu tepla je  W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

Zadejte:

Teplota tekutiny:  °C

Teplota povrchu stěny:  °C

Teplosměnná plocha:  m<sup>2</sup>

proved' výpočet

Tepelný tok je  W

zpět      Cancel

Obr. 10 Dialogové okno – Duplikátory

- ID: IDD\_DIALOG\_Duplikator

Ovládací prvky *Static Text* byly použity pro popis veličin zadávaných do editačních boxů a pro zobrazení jednotek zadávaných veličin podobně jako u dialogového okna pro volnou konvekci, stejně tak i *Edit Control* pro zadání vstupních hodnot a tlačítko (>) pro výpočet teplosměnné plochy, podrobně viz zdrojový kód Duplikator.cpp.

Button

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_vypocet

Tlačítko „proved' výpočet“ je obslouženo takto:

```
void Duplikator::OnBnClickedButtonvypocet()
{
    CString tx, tx_nu;
    BOOL chybaPrevodu;
    double eta, eta_w, ny, ny_w, ro_w;

    ...načtení f, dm, dn, h, ro...

    if (pom_ny == 0){
        ...načtení eta...
    }
    else {
        ...načtení ny...
        eta = ny * ro;
    }

    if (pom_ny_w == 0){
        ...načtení eta_w...
    }
    else{
        ...načtení ny_w, ro_w...
        eta_w = ny_w * ro_w;
    }

    ...načtení cp, lam...

    double re = (f*pow(dm,2)*ro) / eta;
    double pr = (cp*eta) / lam;
    double dndm = dn / dm;
    double hdm = h / dm;
    double etaeta_w = eta / eta_w;
    double nu = 0.112*pow(re, 0.75)*pow(pr, 0.44)*pow(dndm,
0.44)*pow(hdm, 0.33)*pow(etaeta_w, 0.25);
    alfa = (nu*lam) / dm;

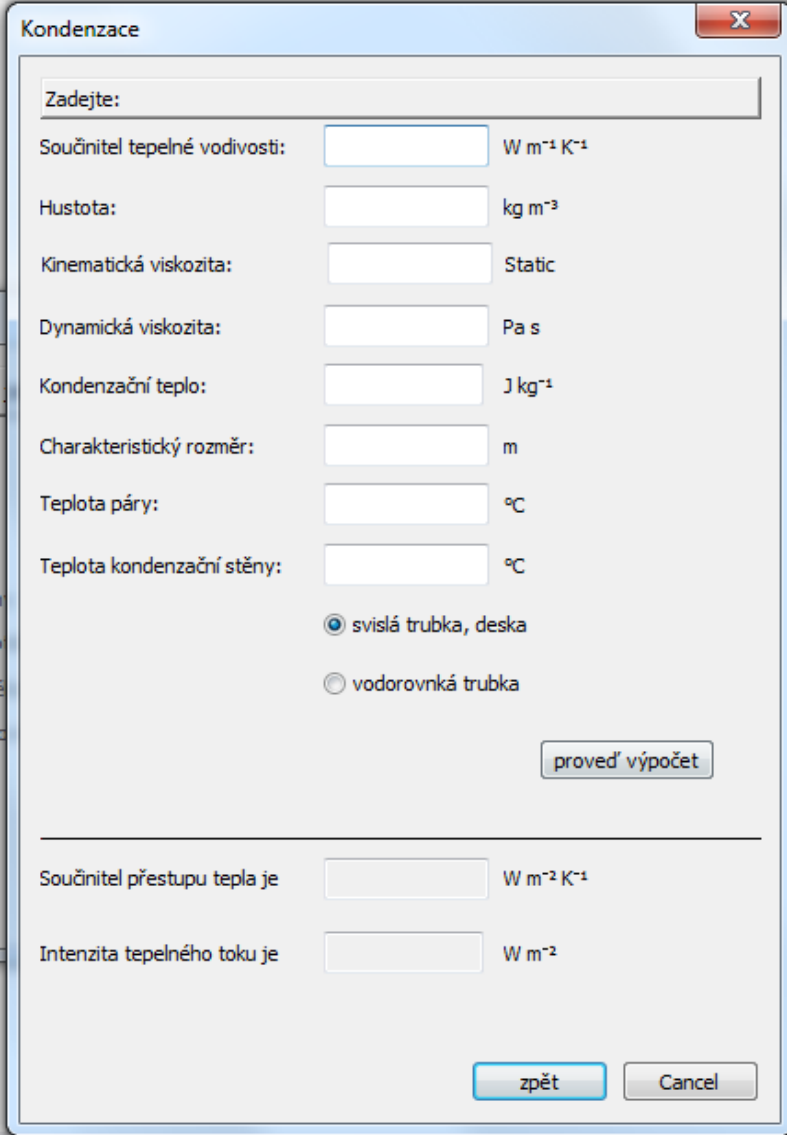
    tx.Format(L"%.2f", alfa);
    tx_nu = L"Nu =0.112 Re\u2070\u2219\u2077\u2075
Pr\u2070\u2219\u2074\u2074 (D/d)\u2070\u2219\u2077\u2074
(h/d)\u2070\u2219\u00B3\u00B3 (\u03B7/\u03B7w)\u2070\u2219\u00B2\u2075";

    SetDlgItemText(IDC_EDIT_alfa, tx);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT_vzorec, tx_nu);
}
```

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_vypocetq,

Volbou tohoto tlačítka se provede výpočet tepelného toku. Jeho obsluha je provedena obdobně jako v předchozích výpočtech q, podrobně viz zdrojový kód Duplikator.cpp.

## Kondenzace



The dialog box titled "Kondenzace" contains the following fields and controls:

- Zadejte:** (Input field)
- Součinitel tepelné vodivosti:** [Input field]  $W m^{-1} K^{-1}$
- Hustota:** [Input field]  $kg m^{-3}$
- Kinematická viskozita:** [Input field] Static
- Dynamická viskozita:** [Input field] Pa s
- Kondenzační teplo:** [Input field]  $J kg^{-1}$
- Charakteristický rozměr:** [Input field] m
- Teplota páry:** [Input field]  $^{\circ}C$
- Teplota kondenzační stěny:** [Input field]  $^{\circ}C$
- svislá trubka, deska
- vodorovná trubka
- proved' výpočet** (Button)

---

- Součinitel přestupu tepla je** [Input field]  $W m^{-2} K^{-1}$
- Intenzita tepelného toku je** [Input field]  $W m^{-2}$
- zpět** (Button) **Cancel** (Button)

Obr. 11 Dialogové okno – Kondenzace

- ID: IDD\_DIALOG\_Kondenzace

Ovládací prvky *Static Text* byly použity pro popis veličin zadávaných do editačních boxů a pro zobrazení jednotek zadávaných veličin podobně jako u dialogového okna pro volnou konvekci, stejně tak i *Edit Control* pro zadání vstupních hodnot, podrobně viz zdrojový kód Kondenzace.cpp.

Button

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_vypocet

Tlačítko „proved' výpočet“ je obslouženo takto:

```
void Kondenzace::OnBnClickedButtonvypocet()
{
    CString tx, tx_nu;
    BOOL chybaPrevodu;
    double eta, delta_t;

    ...načtení lam, ro...

    if (pom_ny == 0) {
        ...načtení eta...
    }
    else {
        ...načtení ny...
        eta = ny * ro;
    }

    ...načtení delta_hg, l, t, tw...

    delta_t = fabs(t - tw);

    int svisla = ((CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO_svisla))->GetCheck();
    double g = 9.80665;
    double alfa, alfa_pom;

    if (svisla == 1){
        alfa_pom = (pow(lam, 3)*pow(ro, 2)*g*delta_hg) /
(1*eta*delta_t);
        alfa = 1.15*pow(alfa_pom, 0.25);
    }
    else{
        alfa_pom = (pow(lam, 3)*pow(ro, 2)*g*delta_hg) /
(1*eta*delta_t);
        alfa = 0.725*pow(alfa_pom, 0.25);
    }
    tx.Format(L "%.2f", alfa);

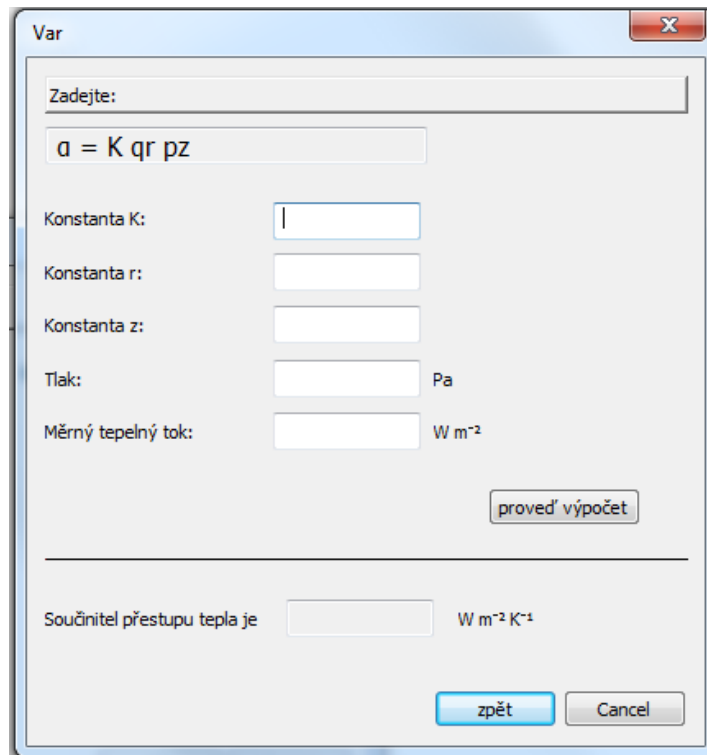
    SetDlgItemText(IDC_EDIT_alfa, tx);

    double q = alfa*delta_t;

    tx.Format(L "%.2f", q);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT_q, tx);
}
```



## Var



Obr. 12 Dialogové okno – Var

- ID: IDD\_DIALOG\_Var

Ovládací prvky *Static Text* byly použity pro popis veličin zadávaných do editačních boxů a pro zobrazení jednotek zadávaných veličin podobně jako u dialogového okna pro volnou konvekci, stejně tak i *Edit Control* pro zadání vstupních hodnot, podrobně viz zdrojový kód Var.cpp.

Button

- proved' výpočet, ID: IDC\_BUTTON\_vypocet

Tlačítko „proved' výpočet“ je obslouženo takto:

```
void Var::OnBnClickedButtonvypocet()
{
    CString tx;
    BOOL chybaPrevodu;

    ...načtení k, r, z, p, q...

    double alfa = k*pow(q, r)*pow(p, z);

    tx.Format(L"% .2f", alfa);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT_alfa, tx);
}
```

*Dialogová okna pro pomocné výpočty***Tepelný součinitel objemové roztažnosti**

- ID: IDD\_DIALOG\_Beta (viz zdrojový kód Beta.cpp)

**Ekvivalentní průměr**

- ID: IDD\_DIALOG\_D\_ek (viz zdrojový kód D\_ek.cpp)

**Teplosměnná plocha**

- ID: IDD\_DIALOG\_Plocha (viz příloha – zdrojový kód Plocha.cpp)

## 5 PŘÍKLADY VÝPOČTU

1. Určete ztráty tepla pláštěm zařízení, která má vnější průměr 800 mm, tloušťku ocelové stěny 10 mm a výšku 3 m. Teplota vnějšího povrchu stěny je 80° C, teplota okolního vzduchu je 18° C. Ztráty tepla dnem i víkem neuvažujte.

Volná konvekce ( $\dot{Q} = \alpha |t_o - t_p| A$ ;  $Nu = C(GrPr)^n$ )

$$l = 3 \text{ m}$$

$$g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$$

$$Pr(50^\circ) = 0,73$$

$$\nu = 18,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$\lambda = 2,72 \cdot 10^{-2} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$t_o = 18^\circ$$

$$t_p = 80^\circ$$

$$\beta = \frac{1}{T_s} \Rightarrow \frac{1}{\left(\frac{80 + 18}{2}\right) + 273,16} = \frac{1}{322,16} = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t \Rightarrow \frac{9,81 \cdot 3^3}{(18,6 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot 62 = 1,47 \cdot 10^{11}$$

$$Gr \cdot Pr \Rightarrow 1,47 \cdot 10^{11} \cdot 0,73 = 1,073 \cdot 10^{11} \Rightarrow C = 0,135, n = 1/3$$

$$Nu = 0,135(GrPr)^{1/3} \Rightarrow 0,135(1,073 \cdot 10^{11})^{1/3} = 641,7$$

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{l} \Rightarrow \frac{641,7 \cdot 2,72 \cdot 10^{-2}}{3} = 5,81 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$A = \pi dl \Rightarrow 3,14 \cdot 0,8 \cdot 3 = 7,54 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q} = \alpha |t_o - t_p| A \Rightarrow 5,81 \cdot 62 \cdot 7,54 = \mathbf{2716 \text{ W}}$$

Volná konvekce

Zadejte:

Prandtlovo kritérium: 0,73

Měrná tepelná kapacita: J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Kinematická viskozita: 0,0000186 m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

Dynamická viskozita: Pa s

Hustota: kg m<sup>-3</sup>

Součinitel tepelné vodivosti: 0,0272 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Teplota tekutiny: 18 °C

Teplota povrchu stěny: 80 °C

Teplotní součinitel objemové roztažnosti: 0,0031 K<sup>-1</sup> >

Charakteristický rozměr: 3 m

proved' výpočet

---

Součinitel přestupu tepla je 5.82 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

$$Nu = 0.135(GrPr)^{0.333}$$

Zadejte:

Teplosměnná plocha: 7,54 m<sup>2</sup> >

proved' výpočet

---

Teplený tok je 2719.69 W

zpět Cancel

Obr. 13 Výpočet příkladu 1 pomocí aplikace

2. Potrubím o vnitřním průměru 80 mm a délce 8 m proudí rychlostí  $6 \text{ ms}^{-1}$  vzduch dodávaný ventilátorem. Určete množství tepla předaného za hodinu ze vzduchu o teplotě  $160^\circ \text{C}$  na stěnu potrubí o teplotě  $120^\circ \text{C}$ .

Nucená konvekce, podélné obtékání ( $\dot{Q} = \alpha | \langle t_o \rangle - t_p | A$ )

$$d = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$$

$$l = 8 \text{ m}$$

$$v = 6 \text{ ms}^{-1}$$

$$\nu = 30,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\nu_w = 26,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda = 3,44 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\lambda_w = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$c_p = 1,03 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$c_{pw} = 1,03 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\rho = 0,789 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho_w = 0,87 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$t_{vz} = 160^\circ$$

$$t_{tr} = 120^\circ$$

$$Re = \frac{vl}{\nu} \Rightarrow \frac{6 \cdot 0,08}{30,6 \cdot 10^{-6}} = 15686,3 \Rightarrow \textit{turbulentní proudění}$$

$$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda} \Rightarrow \frac{1030 \cdot 30,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,789}{3,44 \cdot 10^{-2}} = 0,72$$

$$Pr_w = \frac{1030 \cdot 26,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,87}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 0,73$$

$$Nu(1) = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \Rightarrow 0,023 \cdot 15686,3^{0,8} \cdot 0,72^{0,4} = 45,82$$

$$Nu(2) = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25} \Rightarrow 0,021 \cdot 15686,3^{0,8} \cdot 0,72^{0,43} \cdot \left( \frac{0,72}{0,73} \right)^{0,25} \\ = 41,285$$

$$\alpha(1) = \frac{Nu \lambda}{l} \Rightarrow \frac{45,82 \cdot 3,44 \cdot 10^{-2}}{0,08} = 19,7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha(2) = \frac{Nu \lambda}{l} \Rightarrow \frac{41,285 \cdot 3,44 \cdot 10^{-2}}{0,08} = 17,75 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$A = \pi dl \Rightarrow 3,14 \cdot 0,08 \cdot 8 = 2,01 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}(1) = \alpha | \langle t_o \rangle - t_p | A \Rightarrow 19,7 \cdot 40 \cdot 2,01 = \mathbf{1583,88 \text{ W}}$$

$$\dot{Q}(2) = \alpha | \langle t_o \rangle - t_p | A \Rightarrow 17,75 \cdot 40 \cdot 2,01 = \mathbf{1427,1 \text{ W}}$$

$$\dot{Q}(1) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta Q = 1583,88 \cdot 3600 = 5,7 \text{ MJ}$$

$$\dot{Q}(2) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta Q = 1427,1 \cdot 3600 = 5,14 \text{ MJ}$$

Turbulentní oblast (10 000 < Re < 5 000 000)

Zadejte:

Rychlost proudění:	6	m s <sup>-1</sup>	(2) Nu = 0,021 Re <sup>0,8</sup> Pr <sup>0,43</sup> (Pr / Pr <sub>w</sub> ) <sup>0,25</sup>		
Charakteristický rozměr:	0,08	m	(0,6 < Pr < 2 500; L/d < 50)		
Kinematická viskozita:	0,0000306	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	Zadejte:		
Dynamická viskozita:		Pa s	Kinematická viskozita_w:		
Hustota:	0,789	kg m <sup>-3</sup>	0,0000262	Static	
Měrná tepelná kapacita:	1030	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Dynamická viskozita_w:		Pa s
Součinitel tepelné vodivosti:	0,0344	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Hustota_w:	0,87	kg m <sup>-3</sup>
			Měrná tepelná kapacita_w:	1030	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
			Součinitel tepelné vodivosti_w:	0,032	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

(1) Nu = 0,023 Re<sup>0,8</sup> Pr<sup>0,4</sup>

Static

proved' výpočet (1)

Součinitel přestupu tepla je 19.74 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

proved' výpočet (2)

Součinitel přestupu tepla je 17.78 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

---

Zadejte:

Teplota tekutiny:	160	°C	Tepelný tok je	1586.72	W	výpočet (1)
Teplota stěny trubky:	120	°C	Tepelný tok je	1429.40	W	výpočet (2)
Teplosměnná plocha:	2,01	m <sup>2</sup>				

zpět Cancel

Obr. 14 Výpočet příkladu 2 pomocí aplikace

3. Na horizontální trubce o vnějším průměru 20 mm a délce 1 m kondenzuje nasycená vodní pára o tlaku 1 bar. Teplota stěny trubky je 90,4°C. Vypočtete koeficient přestupu tepla a hmotnost kondenzátu vzniklého na trubce za 1 hod.

$$d = 20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m}; l = 1 \text{ m}$$

$$p = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$t_v = 100 \text{ °C}; t_w = 90,4 \text{ °C} \Rightarrow t_s = 95,2 \text{ °C}$$

$$\rho = 958,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$c_p = 2,017 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\lambda = 23,5 \cdot 10^{-3} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\eta = 115 \cdot 10^{-7} \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$$

$$Pr = 0,97$$

$$\Delta h_k = 2,257 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$$

$$C = 1,15$$

$$g = 9,81 \text{ ms}^{-1}$$

$$\alpha = C \left[ \frac{\lambda^3 g^2 \Delta h_k}{l \eta (t_v - t_w)} \right]^{0,25} \Rightarrow 1,15 \left[ \frac{(23,5 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 958,3^2 \cdot 9,81 \cdot 2,257 \cdot 10^6}{1 \cdot 115 \cdot 10^{-7} \cdot (100 - 90,4)} \right]^{0,25}$$

$$= 1429,9 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$q = \alpha(t_v - t_w) \Rightarrow 1429,9 \cdot (100 - 90,4) = 13727,04 \text{ Wm}^{-2}$$

$$\dot{Q} = q \cdot A \Rightarrow 13727,04 \cdot 3,14 \cdot 0,02 \cdot 1 = 862,06 \text{ W}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h_k} \Rightarrow \frac{862,06}{2,257 \cdot 10^6} = 3,82 \cdot 10^{-4} \text{ kg h}^{-1}$$

The screenshot shows a software window titled "Kondenzace" with a close button (X) in the top right corner. The window contains a form with the following fields and values:

- Zadejte:** (empty text box)
- Součinitel tepelné vodivosti:** 0,0235  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
- Hustota:** 958,3  $\text{kg m}^{-3}$
- Kinematická viskozita:** (empty text box) Static
- Dynamická viskozita:** 0,0000115 Pa s
- Kondenzační teplo:** 2257000  $\text{J kg}^{-1}$
- Charakteristický rozměr:** 1 m
- Teplota páry:** 100  $^{\circ}\text{C}$
- Teplota kondenzační stěny:** 90,4  $^{\circ}\text{C}$
- Geometry:**  svislá trubka, deska;  vodorovná trubka

A button labeled "proved' výpočet" is located below the input fields. Below a horizontal line, the calculated results are displayed:

- Součinitel přestupu tepla je:** 1429.78  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
- Intenzita tepelného toku je:** 13725.92  $\text{W m}^{-2}$

At the bottom right, there are two buttons: "zpět" and "Cancel".

Obr. 15 Výpočet příkladu 3 pomocí aplikace



## ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem se zaměřila na problematiku sdílení tepla. Popsala jsem základní mechanismy přenosu tepla, podle kterých rozlišujeme sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním. Cílem práce bylo vytvoření programové aplikace pro řešení sdílení tepla prouděním.

V teoretické části jsem proto rozebrala jednotlivé typy sdílení tepla konvekcí se zaměřením na stanovení součinitele přestupu tepla, koeficientu charakterizující danou látku a daný typ proudění, jehož hodnotu je nutno stanovit pro výpočet tepelného toku. To v praxi znamená určit žádoucí účinek či nežádoucí ztrátu tepla. Popsala jsem základní znaky programovacího jazyka C a C++, ve kterém jsem aplikaci vytvořila.

V praktické části jsem pro všechny dané případy sdílení tepla konvekcí stanovila postup výpočtu požadovaných veličin, sloužící jako algoritmus výpočtu při psaní programu. Popsala jsem způsob tvorby aplikace, použité ovládací prvky grafického uživatelského rozhraní a uvedla zejména pro výpočty zásadní ukázky zdrojového kódu. V závěru jsem pro srovnání a ověření funkčnosti aplikace uvedla několik příkladů výpočtu.

Zadání bakalářské práce bylo pro mě v podstatě výzvou. S problematikou sdílení tepla, zejména s její podstatou a matematickým popisem problému, jsem se blíže potkala až při studiu. No a s programováním je to podobné. Přesto mě vypsání téma zaujalo a pustila jsem se do práce, jejímž výsledkem je programová aplikace pro řešení sdílení tepla konvekcí napsaná v programovacím jazyce C, resp. C++, který je pro mě ze všech dosud poznaných programovacích jazyků nejčitelnější.

Z několika uvedených příkladů je zřejmé, že aplikace funguje správně, drobné odchylky ve výsledcích jsou pravděpodobně způsobeny zaokrouhlováním při výpočtech.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Kolat, P.: Přenos tepla a hmoty, FS, VŠB-TU Ostrava, 2001
- [2] Neužil, L., Míka, V.: Chemické inženýrství IB, VŠCHT Praha, 1992, ISBN 80-7080-164-6
- [3] Kuneš, J.: Modelování tepelných procesů, SNTL Praha1, 1989, ISBN 04-248-89
- [4] Janáčková, D.: Kurz Procesní inženýrství PI-AŘT, Sdílení tepla (přestup. prostup tepla) – přílohy, PDF dokument dostupný na <http://vyuka.fai.utb.cz/mod/resource/view.php?id=3747>
- [5] Janáčková, D.: Kurz Procesní inženýrství PI-AŘT, Sdílení tepla (část 1): vedení, proudění, prostup, FAI UTB Zlín, verze ze dne 24. 9. 2015, PDF dokument dostupný na <http://vyuka.fai.utb.cz/course/view.php?id=85>
- [6] Kernighan, B. W., Ritchie, D. M.: Programovací jazyk C, Computer Press Brno, 2013, ISBN 978-80-251-0897-0
- [7] Herout, P.: Učebnice jazyka C, KOPP nakladatelství, 2014, ISBN 978-80-7232-383-text
- [8] Dvořák, Z.: Sdílení tepla a výměníky, ČVUT Praha, FS, 1992
- [9] Kolomazník, K.: Teorie technologických procesů III, VUT Brno, FT Zlín, 1978
- [10] Jahoda, M.: Sdílení tepla, VŠCHT Praha, UCHI, 2003
- [11] Michejev, M. A.: Základy sdílení tepla, Praha, Průmyslové vydavatelství, 1952
- [12] Himmelblau, D. M. Riggs, J. B.: Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering, Prentice Hall Professional Technical Reference, 2004, ISBN 0-13-140634-5
- [13] C++ – Wikipedie [online], 21.5.2018. Dostupné z <https://cs.wikipedia.org/wiki/C%2B%2B>
- [14] C/C++ - Linuxsoft [online]. 20.5.2018 cit. [2006-01-09]. Dostupné z [http://www.linuxsoft.cz/article.php?id\\_article=1058](http://www.linuxsoft.cz/article.php?id_article=1058)
- [15] Visual Studio – Živě.cz [online]. 21.5.2018 cit. [2018-04-09]. Dostupné z <https://www.zive.cz/visual-studio/sc-750/default.aspx>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$A, dA$	teplosměnná plocha [ $m^2$ ]
$a$	teplotní součinitel vodivosti [ $m^2 s^{-1}$ ]
$c_p$	měrná tepelná kapacita [ $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ]
$d, D$	průměr [m]
$Fo$	Fourierovo kritérium [1]
$l$	charakteristický rozměr [m]
$L$	délka [m]
$m$	hmotnost [kg]
$\dot{m}$	hmotnostní průtok [ $kg s^{-1}$ ]
$Nu$	Nuseltovo kritérium [1]
$p$	tlak [Pa]
$Pe$	Pécletovo kritérium [1]
$Pr, Pr_w$	Prandtlovo kritérium [1]
$Q$	teplo [J]
$\dot{Q}$	tepelný tok [W]
$q$	intenzita tepelného toku [ $W m^{-2}$ ]
$Re$	Reynoldsovo kritérium [1]
$Re_M$	Reynoldsovo kritérium modifikované pro míchání [1]
$T$	termodynamická teplota [K]
$\langle t_o \rangle$	průměrná teplota tekutiny [ $^{\circ}C$ ]
$t_p$	teplota povrchu stěny u tekutiny [ $^{\circ}C$ ]
$t_1, t_2, t_v, t_w$	teplota [ $^{\circ}C$ ]
$v, f$	charakteristická rychlost proudění tekutiny [ $m s^{-1}$ ]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]

---

$\beta$	teplotní součinitel objemové roztažnosti [ $\text{K}^{-1}$ ]
$\delta$	tloušťka izolační stěny [m]
$\eta$	dynamická viskozita [Pa s]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$\nu$	kinematická viskozita [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$\rho$	hustota [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\tau$	čas [s]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Případy sdílení tepla konvekcí – prouděním .....	18
Obr. 2 Dialogové okno – Sdílení tepla konvekcí .....	34
Obr. 3 Dialogové okno – Volná konvekce .....	37
Obr. 4 Dialogové okno – Nucená konvekce – trubkové systémy – podélné obtékání .....	44
Obr. 5 Dialogové okno – Laminární oblast .....	46
Obr. 6 Dialogové okno – Přejíhodová oblast .....	50
Obr. 7 Dialogové okno – Turbulentní oblast .....	52
Obr. 8 Dialogové okno – Nucená konvekce – trubkové systémy – příčné obtékání ..	55
Obr. 9 Dialogové okno – Nucená konvekce – obtékání podél rovinné stěny.....	59
Obr. 10 Dialogové okno – Duplikátory .....	61
Obr. 11 Dialogové okno – Kondenzace .....	63
Obr. 12 Dialogové okno – Var.....	65
Obr. 13 Výpočet příkladu 1 pomocí aplikace .....	68
Obr. 14 Výpočet příkladu 2 pomocí aplikace .....	70
Obr. 15 Výpočet příkladu 3 pomocí aplikace .....	72

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Hodnoty konstanty $C$ a exponentu $n$ v závislosti na hodnotách $GrPr$ .....	20
Tab. 2 Hodnoty součinitele $\epsilon f$ v závislosti na $L/d$ .....	22
Tab. 3 Hodnoty exponentů $K, m, n$ v závislosti na hodnotě $Re$ a uspořádání trubek ...	23

## SEZNAM PŘÍLOH

prilohy.zip zdrojové soubory k programu