



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Marcel V E N C L**
studijní program **M2301 Strojní inženýrství**
obor **2302T010 Konstrukce strojů a zařízení**
zaměření **Pístové spalovací motory**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

VÝPOČTOVÝ MODEL TVOŘENÍ NO VE VÁLCI ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Proveďte kritické posouzení stávajícího výpočtového programu KVM pro koncentraci NO ve výfukových plynech zážehových motorů (popis mechanismu vzniku NO_x při hoření směsi ve válci pístového spalovacího motoru, způsob výpočtu lokálních teplot v programu Tlak.xls z hlediska kalkulace přestupu tepla mezi náplní válce a stěnami, vliv použitého empirického vztahu pro součinitele přestupu tepla na lokální teploty).
2. Doplněte výpočtový program Tlak.xls dvouzónovým modelem směr-spaliny (podle Bargende) pro přestup tepla, propojte takto upravený program Tlak.xls se současným programem KVM pro výpočty lokálních teplot, tvoření NO ve válci motoru a koncentraci NO ve výfukových plynech.
3. Využijte emisních měření a vysokotlaké indikace prováděných na zážehových motorech v laboratoři KVM k ověření výpočtů koncentrace NO ve výfukových plynech pomocí programu, upraveného podle bodu 2 tohoto zadání a proveďte vyhodnocení výsledků.
4. Vypracujte stručnou uživatelskou příručku k upravenému výpočtovému programu KVM/

Forma zpracování diplomové práce:

průvodní zpráva: cca 50-60 stran textu vč. příloh, celá DP vč. nového SW na CD

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

HEYWOOD, J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, Inc., ISBN 0-07-028637-X, 1988.

SHER, E.: Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines. Pollutant Formation and Control. Academic Press, ISBN 0-12-639855-0, 1998.

BROŽ, M.: Výpočtový model zónového vyhořívání směsi v zážehovém motoru. Diplomová práce KSD-402, 64 stran, Technická univerzita v Liberci, 2001.

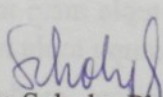
ŠTECHR, V.: Teoretický výpočet produkce NO_x při spalovacím procesu ve válci pístového motoru. Diplomová práce KSD-450, 70 stran, Technická univerzita v Liberci, 2003.

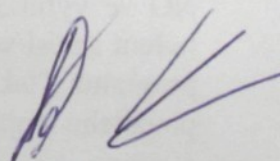
BEROUN, S., ŠTECHR, V.: Oxidy dusíku ve výfukových plynech PSM: mechanismus tvoření, výpočet. Studijní pomůcka, 9 str., KVM FS TU v Liberci, 2005.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Stanislav Beroun, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Josef Blažek




Doc. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.
vedoucí katedry


Prof. Ing. Petr Louda, CSc.
děkan

V Liberci dne 31. 10. 2006

Výpočtový model tvoření NO ve válci zážehového motoru

ANOTACE

Diplomová práce kriticky posuzuje stávající výpočtové programy KVM pro koncentraci NO ve výfukových plynech zážehových motorů. Zahrnuje doplnění výpočtového programu Tlak.xls dvouzónovým modelem směs-spaliny (podle Bargende) pro přestup tepla. S využitím upraveného programu Tlak.xls popisuje diplomová práce výpočet tvoření NO ve válci motoru a koncentraci NO ve výfukových plynech. Porovnává výpočet NO ve výfukových plynech upraveného programu Tlak.xls s emisními měřeními a vysokotlakou indikací prováděných na zážehových motorech v laboratoři KVM. Obsahuje stručnou uživatelskou příručku k upravenému výpočtovému programu.

Klíčová slova: SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA, DVOUZÓNOVÝ MODEL, BARGENDE, PRODUKCE NO

Computing model of production NO in the cylinder of spark ignition engine

ANNOTATION

The graduation theses views existing computerized programs, which The department of transport machines (KVM) uses for calculation concentration of NO in exhaust gases created by spark-ignition engines. It includes fill of computerized program Tlak.xls with using two-zone model mixture-product of combustion (as consistent with Bargende) for heat transfer. The draduation theses uses this program for calculation production of nitrid oxides and for calculation amount of NO in exhaust gases. It compares calculation in program with measured emission values and with high-pressure indication, which were measured on spark-ignition engines in laboratory KVM. And next, the theses consists short user's manual for modified version of computerized program Tlak.xls.

Key words: ^{coef.} FILM CONDUCTANCE, TWO-ZONE MODEL, BARGENDE, PRODUCTION NO

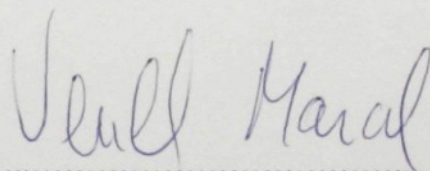
Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji diplomovou práci plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, především § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce. Prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení, apod.).

Uvědomuji si, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci 5. ledna 2007



Marcel Vencel

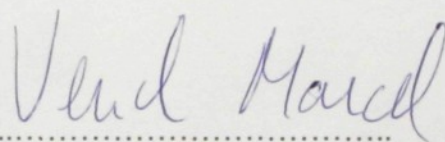
Hřbitovní 1373

Vrchlabí 1

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Liberci 5. ledna 2007

A handwritten signature in blue ink, reading "Vencel Marcel", written over a dotted horizontal line.

Marcel Vencel

Poděkování

Rád bych na úvod poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Stanislavu Berounovi, CSc. za trpělivý dohled, odborné vedení a rady, které mi byly vždy cenným přínosem. Poděkování také patří všem, kdo se nepřímo podíleli svými radami a připomínkami na této práci.

Obsah

Obsah	7
Seznam použitých označení, symbolů a zkratk	8
1. Úvod.....	10
2. Pracovní oběh zážehového spalovacího motoru.....	11
2.1. Termodynamika pracovního oběhu spalovacího motoru.....	11
2.2. Látkové vlastnosti náplně válce	14
2.3. Výměna tepla mezi náplní válce a stěnami.....	17
2.3.1. Součinitel přestupu tepla.....	17
2.3.1.1. Součinitel přestupu tepla podle Eichelberga.....	18
2.3.1.2. Součinitel přestupu tepla podle Woschniho.....	18
2.3.1.3. Součinitel přestupu tepla podle Bargendeho	20
2.4. Přívod tepla do oběhu	27
2.5. Popis programu Tlak.xls.....	30
2.6. Popis programu Tlak-teplota.xls.....	34
2.7. Popis programu Zeldovich.xls	35
3. Emise zážehového spalovacího motoru.....	37
3.1. Vliv výfukových emisí na životní prostředí	37
3.2. Emise oxidů dusíku NO _x zážehových motorů	39
3.3. Rozšířený Zeldovichův mechanismus	41
4. Úpravy a doplnění výpočtového programu Tlak.xls	42
4.1. Výpočet objemů a teplot spalín a směsí.....	42
5. Výpočtový program pro tvorbu NO.....	47
5.1. Nově navržený výpočtový model pro tvorbu NO.....	55
5.2. Výpočet produkce NO s využitím nově navrženého modelu	58
5.3. Porovnání výsledků výpočtu s výsledky měření.....	60
6. Popis programu Tlak-teplota (SM+SP+PL)-NO.xls.....	61
7. Závěr	63
8. Literatura.....	64

Seznam použitých označení, symbolů a zkratk

Platí pokud v textu není uvedeno jinak.

Označení:

Q	Tepelná energie	[J]
U	Vnitřní energie	[J]
W	Mechanická práce	[J]
p	Tlak	[Pa], [MPa]
T	Termodynamická teplota	[K]
V	Objem	[m ³]
η_t	Tepelná účinnost motoru	[-]
Q _{ODV}	Odvedené teplo	[J]
N, n	Látkové množství	[mol]
R	Molární (univerzální) plynová konstanta	[J/(kmol.K)]
R _u	Molární (univerzální) plynová konstanta	[kJ/(kmol.K)]
r	Měrná plynová konstanta	[J/(kg.K)]
$\mathcal{M}$	Molární hmotnost	[kg/kmol]
m, M	Hmotnost, množství	[kg]
c_p	Měrná tepelná kapacita při stálém tlaku	[J/(kg.K)]
c_v	Měrná tepelná kapacita při stálém objemu	[J/(kg.K)]
$\tilde{c}_p$	Molární tepelná kapacita při stálém tlaku	[kJ/(kmol.K)]
$\tilde{c}_v$	Molární tepelná kapacita při stálém objemu	[kJ/(kmol.K)]
κ	Adiabatický exponent	[-]
α_p	Součinitel přestupu tepla	[W/(m ² .K)]
S	Plocha	[m ²]
ε	Kompresní poměr	[-]
c_s	Střední pístová rychlost	[m/s]
d, D	Vrtání válce	[m]
Z	Zdvih pístu	[m]
L	Délka ojnice	[m]
n_m	Otáčky motoru	[1/s]
Nu	Nusseltovo podobnostního číslo	[-]
Re	Reynoldsovo podobnostního číslo	[-]
Pr	Prandtlovo podobnostního číslo	[-]
λ	Součinitel přebytku vzduchu	[-]
L _{vt}	Teoret. mn. vzduchu potřebné ke spálení 1kg paliva	[kg/kg]
λ_v	Součinitel tepelné vodivosti	[J/(m.K)]
ξ	Součinitel zbytkových plynů	[-]
ν	Kinematická viskozita	[m ² /s]
μ	Dynamická viskozita	[Pa.s]
k	Parametr rozvíření náplně ve válci	[-]
c	Rychlost proudění směsi	[m/s]
K ₁	Součinitel rozvíření náplně válce	[J/(m ² .K)]
w	Rychlost proudění	[m/s]
$\bar{k}$	Měrná kinetická energii turbulencí	[m ² /s ²]
Δ	Součinitel vyjadřující postup hoření	[-]
[A]	Faktor vlivu objemu spalín	[-]
[B]	Faktor vlivu objemu směsi	[-]

$x_{hoř}, x$	Podíl vyhořelé směsi v náplni válce	[-]
x_k	Stupeň vyhoření náplně směsi na konci doby hoření τ_k	[-]
N	Počet molekul vstupujících do reakce	[1]
N_a	Počet vytvořených aktivovaných částic	[1]
a, C	Koeficient úměrnosti	[-]
τ, t	Čas	[s]
τ_k	Konec doby hoření	[s]
ρ_a	Poměrná změna hustoty aktivovaných částic	[1/s]
N_o	Celkový počet molekul v reagujícím systému	[1]
m	Parametr hoření	[-]
P_{SPPR}	Zvětšení teplosměnné plochy spalovacím prostorem	[m ²]
n, α	Úhel pootočení klikového hřídele	[°]
k	Polytropický exponent	[-]
c	Molární koncentrace	[mol/cm ³]

Symbols:

PSM	Pístový spalovací motor
KH	Klikový hřídel
ZH	Začátek hoření
H	Délka hoření
DÚ	Dolní úvrat' pístu
HÚ	Horní úvrat' pístu
LPG	Palivo propan-butan
NG	Palivo metan (zemní plyn)
BA	Benzín automobilový
NO	Oxid dusnatý
NO _x	Oxidy dusíku
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
HC	Nespálené uhlovodíky
H	Atomární vodík
O ₂	Molekula kyslíku
N ₂	Molekula dusíku
NH ₃	Čpavek
PAH	Polycyklické aromatické uhlovodíky
EHK	Evropská hospodářská komise
Euro 4	Předpis limitních hodnot emisních škodlivin
MKP	Metoda konečných prvků
CFD	Computational Fluid Dynamics

Indexy:

NV, nv	Náplň válce
SM, sm	Směs paliva a vzduchu
SP, sp	Spaliny
PL, pl	Plamen
V	Vzduch
P	Palivo
ZB	Zbytkové spaliny
n	Výpočtový krok

1. Úvod

Výzkum a vývoj spalovacích motorů probíhá experimentálně (výzkumnými a vývojovými pracemi v laboratořích) a jednak teoretickými výpočtovými modely, které popisují pracovní oběh a jiné děje spalovacího motoru. Výpočtové modely podléhají prakticky vždy určitému stupni zjednodušení vzhledem ke skutečným stavům a parametrům spalovacích motorů. Tato zjednodušující opatření vycházejí z promyšlených inženýrských odhadů, které za pomoci statistických údajů zaručují věrohodnost výpočtových modelů. Rozvoj výpočetní techniky umožňuje výzkumným a vývojovým pracovníkům stále podrobněji popisovat velmi komplikované děje probíhající ve spalovacích motorech, což zpřesňuje dosažené výsledné hodnoty.

Mezi tyto zjednodušené výpočtové modely patří i výpočtový program Tlak.xls vytvořený na KVM (dříve KSD) Technické univerzity v Liberci. Tento program, popisující termodynamiku pracovního oběhu spalovacích motorů, byl později doplněn o podprogram pro výpočet emisní škodliviny NO. K tomu bylo zapotřebí stanovit teplotní rozvrstvení ve válci motoru pomocí programu Tlak-teplota.xls.

Diplomová práce se zabývá tvořením emisní škodliviny NO ve válci motoru s ohledem na přestup tepla mezi náplní válce a stěnami. Stávající program Tlak.xls nabízí stanovení velikosti odvedeného tepla přestupem do stěn podle Eichelberga nebo podle Woschniho. V rámci diplomové práce byl tento program doplněn o nový způsob výpočtu odvedeného tepla. Jedná se o tzv. dvouzónový model směs-spaliny, který publikoval Bargende v roce 1990. Podrobněji o Bargendeho vztahu pojednává literatura [7].

V diplomové práci je stručně popsána termodynamika pracovního oběhu spalovacího motoru (teorie o látkových vlastnostech náplně válce, přívodu tepla do oběhu Víbeho zákonem hoření a přestup tepla z náplně válce do okolních stěn spalovacího prostoru motoru), stávající programy (Tlak.xls, Tlak-teplota.xls, Zeldovich.xls) a vznik emisí zážehového motoru a jejich dopad na životní prostředí.

Cílem DP je navrhnout vhodný výpočtový model pro stanovení koncentrace NO ve výfukových plynech motoru a ověřit jeho vypočtené hodnoty s hodnotami naměřenými na různých typech motorů.

2. Pracovní oběh zážehového spalovacího motoru

Pracovní oběh zážehového spalovacího motoru je složen ze čtyř na sebe navazujících termodynamických procesů (sání, komprese, expanze a výfuk).

Přes otevřený sací ventil dochází nejprve k plnění válce čerstvou homogenní směsí paliva a vzduchu (u motoru s vnějším tvoření směsi) nebo samotným vzduchem (u motoru s vnitřním tvoření směsi). Po uzavření sacího ventilu následuje komprese náplně ve válci, která tímto zvyšuje svůj tlak i teplotu. V blízkosti horní úvrati (HÚ) se připravená stlačená směs zapálí vysokonapětovým výbojem od zapalovací svíčky. Vyhoříváním směsi dochází k dalšímu nárůstu tlaku a teploty náplně ve válci a následně k expanzi. Pracovní cyklus končí otevřením výfukového ventilu a vyprázdněním spalín z válce.

Sání a výfuk se označují jako nízkotlaká část, komprese a expanze jako vysokotlaká část pracovního oběhu. Pro termodynamiku pracovního oběhu spalovacího motoru je významná část vysokotlaká (začíná uzavřením sacího ventilu a končí otevřením ventilu výfukového).

2.1. Termodynamika pracovního oběhu spalovacího motoru

Hlavním termodynamickým procesem v pístovém spalovacím motoru je přívod tepla do pracovního oběhu hořením směsi paliva a vzduchu ve válci motoru. Přivedená tepelná energie se podle prvního termodynamického zákona (1)

$$dQ = dU + dW, \quad [J] \quad (1)$$

kde značí: Q ... přivedenou tepelnou energii, $[J]$

U ... vnitřní energii látky, $[J]$

W ... mechanickou práci (objemovou) $[J]$

přeměně na mechanickou objemovou práci pístu (2)

$$dW = p \cdot dV, \quad [J] \quad (2)$$

kde značí: p ... tlak, $[Pa]$
 dV ... přírůstek objemu $[m^3]$

a vnitřní energii dU náplně válce.

Klikovým mechanismem se transformovaná energie přivádí k hnanému členu, který ji spotřebovává. Při transformaci tepelné energie na mechanickou práci se musí podle druhého termodynamického zákona určitá část energie (tepla) odvést. Velikost odvedeného tepla určuje tepelnou účinnost motoru η_t vztahem (3)

$$\eta_t = \frac{W}{Q} = \frac{Q - Q_{ODV}}{Q} = 1 - \frac{Q_{ODV}}{Q}, \quad [-] \quad (3)$$

kde značí: Q ... přivedené teplo, $[J]$
 Q_{ODV} ... odvedené teplo, $[J]$
 W ... mechanickou práci. $[J]$

Velikost odvedeného tepla je součet tepel odvedených chlazením motoru (prostupem tepla z náplně válce do chladicího média), výfukem společně se spaliny a mechanickými ztrátami (třením).

Pro výpočty termodynamických veličin pracovního oběhu spalovacího motoru se mnohdy za pracovní látku uvažuje ideální plyn. To představuje jisté zjednodušení vzhledem ke skutečnému plynu, neboť ideální plyn má konstantní látkové vlastnosti nezávislé na teplotě. Program Tlak.xls využívá látkové vlastnosti skutečného plynu k výpočtům termodynamiky pracovního oběhu. Pro ideální plyn platí stavová rovnice, kterou lze zapsat ve více tvarech, např. ve tvaru (4):

$$p \cdot V = N \cdot R \cdot T, \quad (4)$$

kde značí: N ... látkové množství, $[mol]$
 R ... molární (univerzální) plynovou konstantu, $[J \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}]$
 pozn. $R = 8314 \text{ J} \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}$
 T ... termodynamickou teplotu. $[K]$

S využitím vztahu (5) pro měrnou plynovou konstantu r :

$$r = \frac{R}{\mathcal{M}}, \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (5)$$

kde značí: r ... měrnou plynovou konstantu, $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
 $\mathcal{M}$... molární hmotnost $[kg \cdot kmol^{-1}]$

lze zapsat stavovou rovnici ve tvaru (6):

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T, \quad (6)$$

kde značí: m ... hmotnost látky. $[kg]$

Významnými látkovými vlastnostmi jsou měrné tepelné kapacity a plynová konstanta. Vztah mezi nimi udává Mayerova rovnice (7):

$$c_p - c_v = r, \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (7)$$

kde značí: c_p ... měrnou tepelnou kapacitu při stálém tlaku, $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
 c_v ... měrnou tepelnou kapacitu při stálém objemu, $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

Poměr měrných tepelných kapacit je adiabatický exponent (Poissonova konstanta) κ a lze jej vyjádřit těmito vztahy (8):

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1 + \frac{r}{c_v} = \frac{c_p}{c_p - r}. \quad [-] \quad (8)$$

Změnu vnitřní energie plynu lze vyjádřit v závislosti na teplotě vztahem (9):

$$dU = c_v \cdot m \cdot dT = \frac{r}{\kappa - 1} \cdot m \cdot dT. \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (9)$$

2.2. Látkové vlastnosti náplně válce

Náplň válce je skutečný plyn, jehož látkové vlastnosti jsou proměnlivé s teplotou. Látkovými vlastnostmi se uvažuje např. měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku c_p i za konstantního objemu c_v a jejich poměr (adiabatický exponent κ). Během pracovního oběhu prodělává náplň válce kvalitativní změny, protože nespálená hořlavá směs se účinkem hoření mění na produkty spalování. Tyto produkty zvyšují podíl tříatomových plynů v náplni válce. Podíl tříatomových plynů v náplni válce na začátku a na konci pracovního oběhu přibližně ukazuje tab. 1.

Tab. 1: Obsah tříatomových plynů v náplni válce na začátku a na konci pracovního oběhu – podle [8].

Část oběhu	Počet tříatomových plynů v náplni válce [%]
Začátek	1 - 3
Konec	26 - 27

2.2.1. Závislost měrných tepelných kapacit náplně válce na teplotě

Proměnlivost měrné tepelné kapacity za konstantního tlaku c_p se nejčastěji stanovuje pomocí polynomu pro molovou tepelnou kapacitu $\tilde{c}_p$:

$$\tilde{c}_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3, \quad \left[\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right] \quad (10)$$

kde značí: T ... teplotu,

$[K]$

a, b, c, d ... konstanty stanovené pro jednotlivé plyny pomocí odborné literatury (např. [9]).

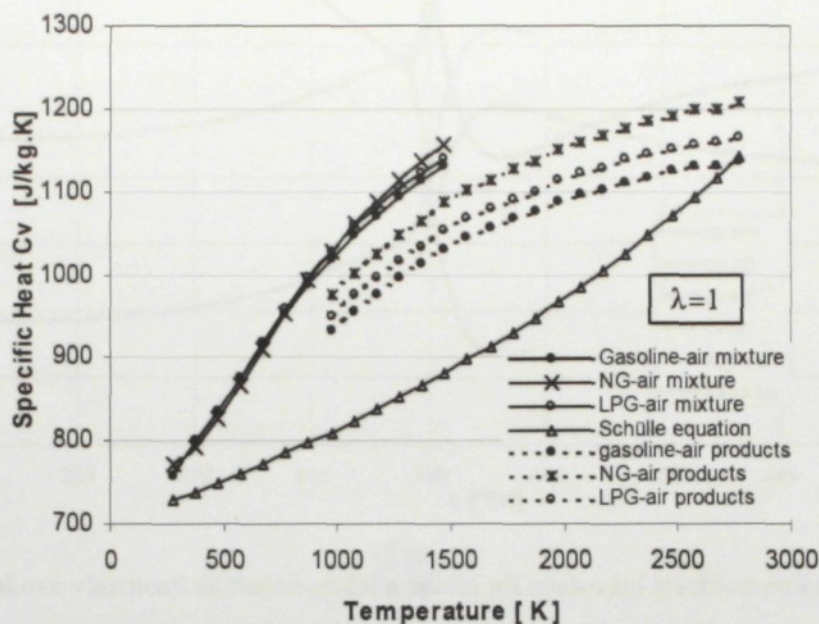
Mayerova rovnice (7) pro molární tepelné kapacity bude mít tvar:

$$\tilde{c}_p - \tilde{c}_v = R_u \quad \left[\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right] \quad (11)$$

Z rovnice (11) se následně určí $\tilde{c}_v$ ($R_u = 8,314 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) v jednotkách $\left[\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right]$.

Vydělením hodnot $\tilde{c}_v$ a $\tilde{c}_p$ molovou hmotností dostaneme měrné tepelné kapacity c_v a c_p v jednotkách $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$.

Na obr. 1 jsou zakresleny průběhy měrných tepelných kapacit pro stechiometrické složení směsi různých paliv a vzduchu a pro spaliny z těchto směsí.



Obr. 1: Průběhy měrných tepelných kapacit pro stechiometrické složení směsi různých paliv a vzduchu a pro spaliny z těchto směsí – podle [9].

V obr. 1 je patrný rozdíl látkových vlastností mezi křivkami představující skutečnou směs a skutečné spaliny a křivkou, která reprezentuje zjednodušující Schülleho vztah. Program Zeldovich.xls pro výpočet NO počítá s látkovými vlastnostmi určenými podle Schülleho vztahu.

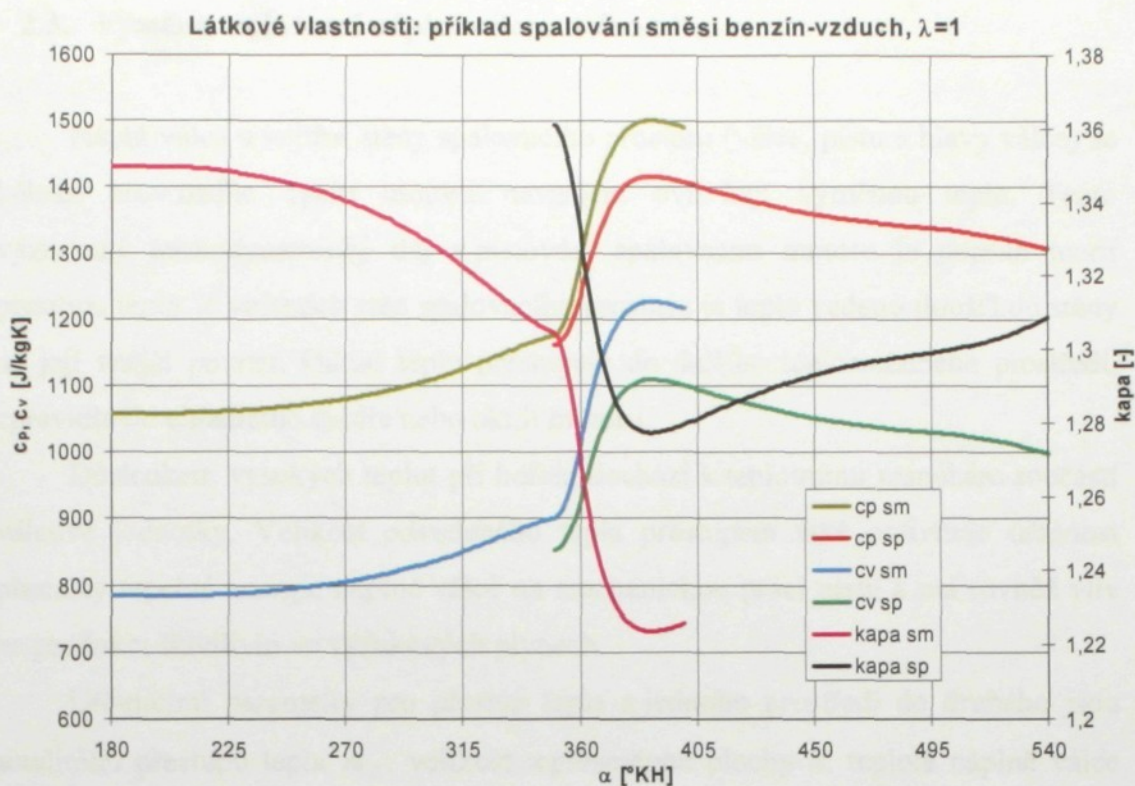
Schülleho vztah se v literatuře uvádí pro dvouatomové plyny: látkové vlastnosti se určují následujícími rovnicemi (12, 13, 14):

$$\kappa_n = 1,41 - 5,72 \cdot 10^{-5} \cdot T_n, \quad (12)$$

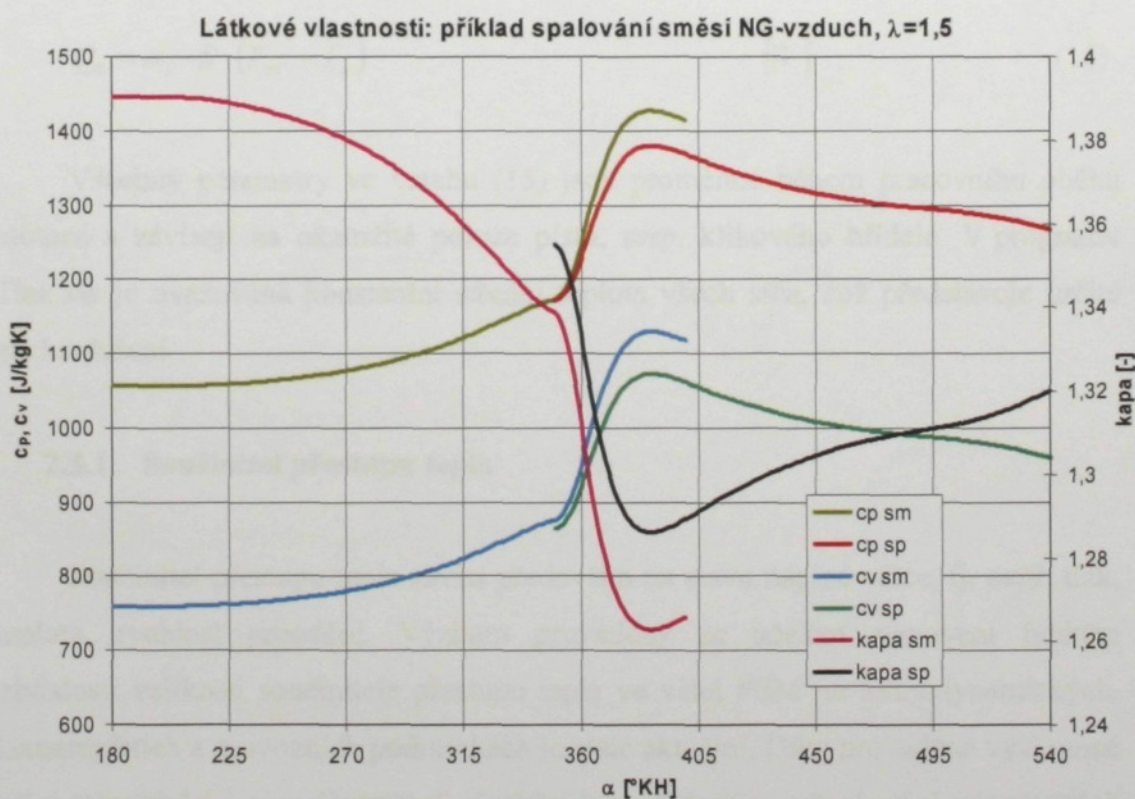
$$c_{v/n} = \frac{r}{\kappa_n - 1}, \quad (13)$$

$$c_{p/n} = r + c_{v/n}. \quad (14)$$

Na obr. 2 a 3 jsou zakresleny průběhy látkových vlastností (měrné tepelné kapacity c_p , c_v a adiabatický exponent κ) skutečné náplně válce odděleně pro směs a pro spaliny v průběhu vysokotlaké části pracovního oběhu. - podle procedury v programu Plab.xls



Obr. 2: Látkové vlastnosti skutečné směsi a spalin při spalování stechiometrického složení směsi benzín-vzduch.



Obr. 3: Látkové vlastnosti skutečné směsi a spalin při spalování chudé směsi NG-vzduch.

2.3. Výměna tepla mezi náplní válce a stěnami

Náplň válce a vnitřní stěny spalovacího prostoru (válce, pístu a hlavy válce) se během provozního cyklu motoru navzájem ovlivňují výměnou tepla. Tento významný termodynamický děj v pístovém spalovacím motoru je popsán teorií přestupu tepla. Z vnitřních stěn spalovacího prostoru je teplo vedeno tloušťkou stěny na její vnější povrch. Odtud teplo přestupuje do dalšího teplosměnného prostředí, zpravidla do chladicího média nebo okolí motoru.

Důsledkem vysokých teplot při hoření dochází k teplotnímu namáhání součástí válcové jednotky. Velikost odvedeného tepla přestupem také ovlivňuje účinnost přeměny tepelné energie náplně válce na mechanickou práci pístu a má rovněž vliv na produkci škodlivin ve výfukových plynech.

Určujícími parametry pro přestup tepla z jednoho prostředí do druhého jsou součinitel přestupu tepla α_p , velikost teplosměnné plochy S , teplota náplně válce T_{NV} a teplota stěny T_{st} . Množství tepla náplně válce předané chlazeným stěnám motoru, tj. odvedený tepelný výkon Q_S je dán dle Newtonovy rovnice:

$$Q_S = \alpha_p \cdot S \cdot (T_{NV} - T_{st}). \quad [W] \quad (15)$$

Všechny parametry ve vztahu (15) jsou proměnné během pracovního oběhu motoru a závisejí na okamžité poloze pístu, resp. klikového hřídele. V programu Tlak.xls je uvažována konstantní střední teplota všech stěn, což představuje určité zjednodušení.

2.3.1. Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla závisí především na stavu náplně válce, tj. např. tlak, teplota, rychlost proudění. Výzkum prováděný za účelem stanovení funkční závislosti velikosti součinitele přestupu tepla ve válci PSM na termodynamických, konstrukčních a provozních podmínkách je stále aktuální. Díky prováděné výzkumné práci (teoretické i experimentální) dochází k postupnému zpřesňování výpočtových vztahů. Následující odstavce ukazují některé funkčních vztahy, které vedou k určení velikosti součinitele přestupu tepla α_p ve válci motoru.

Nusselt položil základ pro stanovení velikosti součinitele přestupu tepla α_p , a to v závislosti na tlaku a teplotě náplně válce bez uvažování jejího rozvíření vztahem (pro tehdejší jednotky):

$$\alpha_p \approx \sqrt[3]{p \cdot T}. \quad (16)$$

Později byla zařazena do Nusseltova vztahu (16) také rychlost rozvíření náplně válce, která je vztažena ke střední pístové rychlosti c_s . Nusseltův součinitel přestupu tepla z náplně válce do stěn přešel po této inovaci na tvar (pro tehdejší jednotky):

$$\alpha_p = 0,99 \cdot (1 + 1,24 \cdot c_s) \cdot \sqrt[3]{p^2 \cdot T}. \quad (17)$$

2.3.1.1. Součinitel přestupu tepla podle Eichelberga

V roce 1939 formuloval Eichelberg vztah pro velikost součinitele přestupu tepla, který má tvar (při přepočtu na dnes běžně užívané jednotky):

$$\alpha_p = 2,485 \cdot \sqrt[3]{Z \cdot n_m} \cdot \sqrt{p \cdot T}, \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (18)$$

kde značí:	Z ... zdvih pístu,	$[m]$
	n_m ... otáčky motoru,	$[\min^{-1}]$
	p ... tlak náplně válce,	$[MPa]$
	T ... teplotu náplně válce.	$[K]$

2.3.1.2. Součinitel přestupu tepla podle Woschniho

V 60. letech minulého století publikovali Pflaum a Woschni součinitel přestupu tepla, který byl stanoven pomocí podobnostních čísel. Řešení vycházelo z popisu přestupu tepla v trubce s turbulentním prouděním. Nusseltovo podobnostní číslo Nu pro přestup tepla (19) má tvar:

$$Nu = \frac{\alpha_p \cdot d}{\lambda_v}, \quad [-] \quad (19)$$

kde značí: d ... vrtání válce, $[m]$
 λ_v ... součinitele tepelné vodivosti $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

bude mít po úpravě Reynoldsovým číslem Re :

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu}, \quad [-] \quad (20)$$

kde značí: c ... rychlost proudění směsi ($c = k \cdot c_s$), $[m \cdot s^{-1}]$
 k ... parametr rozvíření náplně ve válci ($k = 3 \div 5$), $[-]$
 ν ... kinematickou viskozitu $[m^2 \cdot s^{-1}]$

a Prandtlovým číslem Pr :

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda_v}, \quad [-] \quad (21)$$

kde značí: μ ... dynamickou viskozitu, $[Pa \cdot s]$
 c_p ... měrnou tepelnou kapacitu při stálém tlaku $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

tvar:

$$Nu = k \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^q, \quad [-] \quad (22)$$

kde značí: k ... konstantu, $[-]$
 m, n, q ... exponenty, $[-]$
 d, l ... rozměry spalovacího prostoru. $[m]$

Konstanta a exponenty ve vztahu (22) jsou stanoveny experimentálně. Za předpokladu jistých zjednodušení (dvouatomové plyny v náplni válce) je stanovena okamžitá hodnota součinitele přestupu tepla $\alpha_{p(n)}$ ve tvaru:

$$\alpha_{p(n)} = 794 \cdot (K_1 \cdot p_{(n)})^{0,786} \cdot d^{-0,214} \cdot T^{-0,525}, \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (23)$$

kde značí: K_1 ... součinitele rozvíření náplně válce. $[m \cdot s^{-1}]$

Woschni popsal součinitele rozvíření náplně válce pomocí empirického vztahu:

$$K_1 = (2,28 + 0,308 \cdot k) \cdot c_s, \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (24)$$

kde značí: k ... parametr rozvíření náplně ve válci ($k = 3 \div 5$). $[-]$

Velikost součinitele přestupu tepla ve válci PSM se relativně hodně mění. Minimálních hodnot dosahuje během sání (cca $100 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$) a maximálních v oblasti mírně za HÚ při expanzi (cca $2500-3000 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$).

Rozvoj výpočetní techniky, moderní měřicí přístroje a metody umožňují získávat současnému výzkumu a vývoji na PSM podrobnější informace, což zpřesňuje popis velmi komplikovaných dějů probíhajících ve válci PSM. Empirické vztahy pro popis velikosti součinitele přestupu tepla ve válci motoru jsou stále obsáhlejší a přesnější. Vychází se zpravidla z Woschniho vztahu (23), který je dále doplňován dalšími funkčními závislostmi (např. v roce 1985 autory Woschni-Vogel-Bulaty).

2.3.1.3. Součinitel přestupu tepla podle Bargendeho

V roce 1990 publikoval Bargende teorii o velikosti součinitele přestupu tepla. Jeho vztah je rovněž podobný struktuře Woschniho vztahu, ale zahrnuje navíc podmínky, které působí v těsné blízkosti stěn válce PSM během jeho provozu. Popisuje rychlost proudění náplně a využívá tzv. stěnovou funkci, která popisuje teplotní mezní vrstvu u stěn. Stěnová funkce vyžaduje modelování intenzity

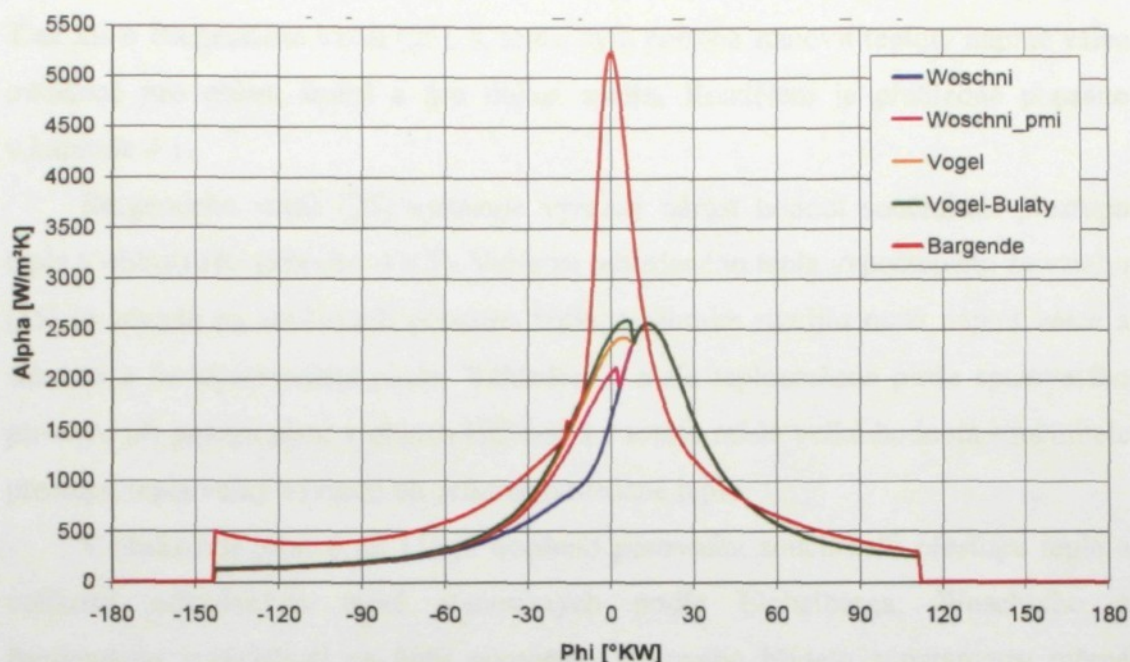
turbulencí ve válci PSM pomocí softwaru, který pracuje s MKP v oblasti dynamiky tekutin (tj. CFD). Takto se určuje měrná kinetická energie turbulencí a rychlost disipace měrné kinetické energie turbulencí. Uvažuje také se dvěma stavy náplně válce: první počítá s nespálenou směsí a druhá se spaliny. Bargendeho vztah (25) má tedy tvar:

$$\alpha_p = 1527,5 \cdot V^{-0,073} \cdot p^{0,78} \cdot \bar{T}^{-0,477} \cdot w^{0,78} \cdot \Delta, \quad (25)$$

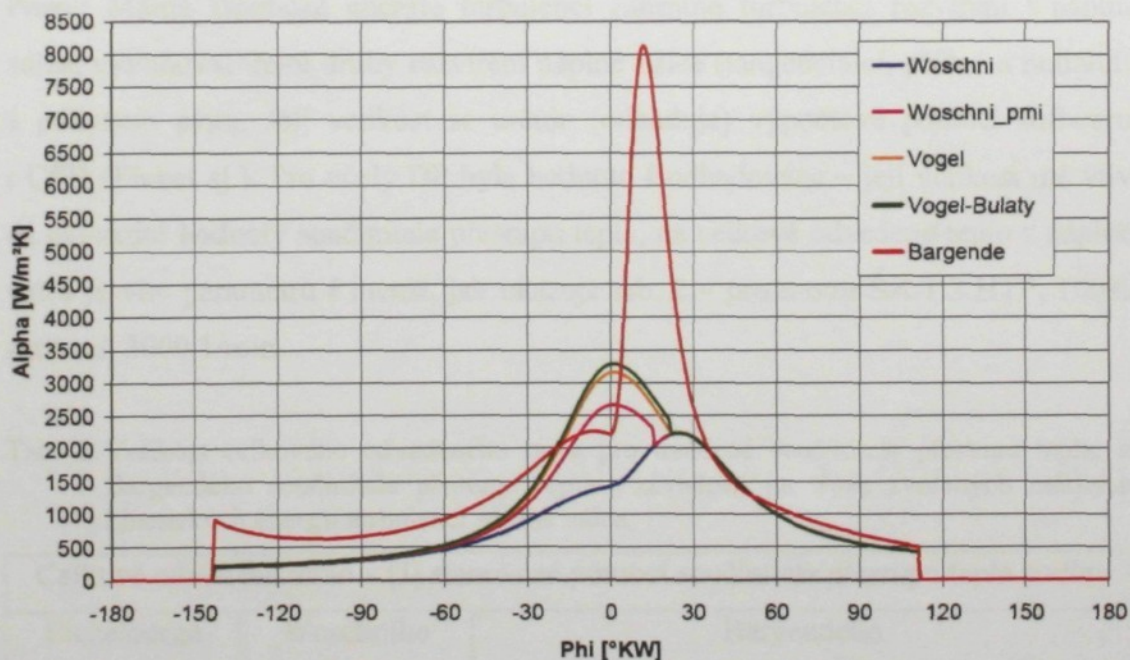
kde značí: V ... okamžitý objem ve válci,	[m ³]
p ... okamžitý tlak ve válci,	[MPa]
$\bar{T} = \frac{T + T_{st}}{2}$... teplotu významnou pro Nu a Re čísla,	[K]
T ... střední teplotu náplně válce,	[K]
T_{st} ... střední teplotu stěn,	[K]
$w = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \bar{k} + c_s^2}$... ekvivalent rychlosti proudění,	[m.s ⁻¹]
$\bar{k}$... měrnou kinetickou energii turbulencí,	[m ² .s ⁻²]
c_s ... střední pístovou rychlost,	[m.s ⁻¹]
$\Delta = ([A] + [B])^2$... součinitele vyjadřující postup hoření,	[-]
$[A] = x_{hoř} \cdot \frac{T_{sp}}{T} \cdot \frac{T_{sp} - T_{st}}{T - T_{st}}$... faktor vlivu objemu spalin,	[-]
$[B] = (1 - x_{hoř}) \cdot \frac{T_{sm}}{T} \cdot \frac{T_{sm} - T_{st}}{T - T_{st}}$... faktor vlivu objemu směsi,	[-]
$x_{hoř}$... podíl vyhořelé směsi v náplni válce,	[-]
T_{sp} ... střední teplotu spalin ve válci,	[K]
T_{sm} ... střední teplotu směsi ve válci.	[K]

Bargendeho vztah (25) poskytuje věrohodnější hodnoty součinitele přestupu tepla především v oblasti za HÚ při hoření směsi, kde dochází k výraznému nárůstu velikosti součinitele přestupu tepla. Toto zvýšení hodnot součinitele přestupu tepla závisí z velké části na teplotě spalin a tlaku ve válci. Podle literatury [7] může velikost součinitele přestupu tepla dosáhnout dvoj- až trojnásobku velikosti součinitele přestupu tepla počítaného jinými empirickými vztahy (Eichelberg,

Woschni). Obr. 4 a 5 ukazují porovnání průběhů hodnot součinitele přestupu tepla vypočítaných pomocí různých vztahů.



Obr. 4: Porovnání průběhů hodnot součinitele přestupu tepla v závislosti na poloze klikového hřídele pro tříválcový nepřepřňovaný motor ($\varepsilon = 10,3$; $n = 3000 \text{ min}^{-1}$) – podle [7].



Obr. 5: Porovnání průběhů hodnot součinitele přestupu tepla v závislosti na poloze klikového hřídele pro tříválcový přepřňovaný motor ($\varepsilon = 9,5$; $n = 3000 \text{ min}^{-1}$) – podle [7].

V programu Tlak.xls je zahrnuta kalkulace přestupu tepla podle Eichelberga (18) a Woschniho (23). Vzhledem k výrazně vyšším hodnotám součinitelů přestupu tepla podle Bargendeho je úkolem předkládané DP doplnit výpočtový program Tlak.xls o Bargendeho vztah (25). K tomu bylo potřeba stanovit teploty náplně válce odděleně pro oblast směsi a pro oblast spalín. Rozdělení je přehledně popsáno v kapitole 4.1.

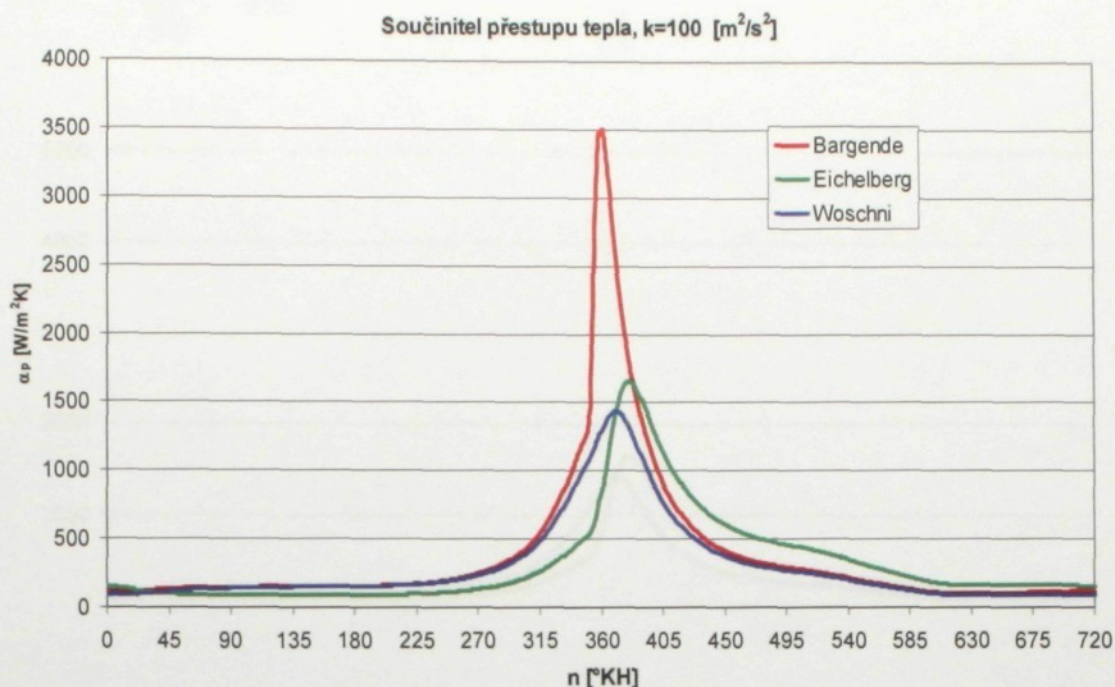
Bargendeho vztah (25) vykazuje výrazný nárůst hodnot součinitele přestupu tepla v oblasti HÚ (viz obr. 4 a 5). Velikost odvedeného tepla vypočteného ze vztahu (15) je závislá na součiniteli přestupu tepla, teplotním rozdílu mezi náplní válce a stěnami a na teplosměnné ploše. Vzhledem k malé teplosměnné ploše spalovacího prostoru při poloze pístu v oblasti HÚ nemá v tomto místě velká hodnota součinitele přestupu tepla velký význam na celkové odvedené teplo.

V obrázcích (obr. 6 až 11) je uvedeno porovnání součinitelů přestupu tepla a velikosti odvedených tepel stanovených podle Eichelberga, Woschniho a Bargendeho v závislosti na úhlu pootočení klikového hřídele a parametru měrné kinetické energie turbulentí (parametru rozvíření) $\bar{k}$: pro hodnoty $\bar{k} = 100 \text{ m}^2 / \text{s}^2$, $\bar{k} = 300 \text{ m}^2 / \text{s}^2$ a $\bar{k} = 500 \text{ m}^2 / \text{s}^2$.

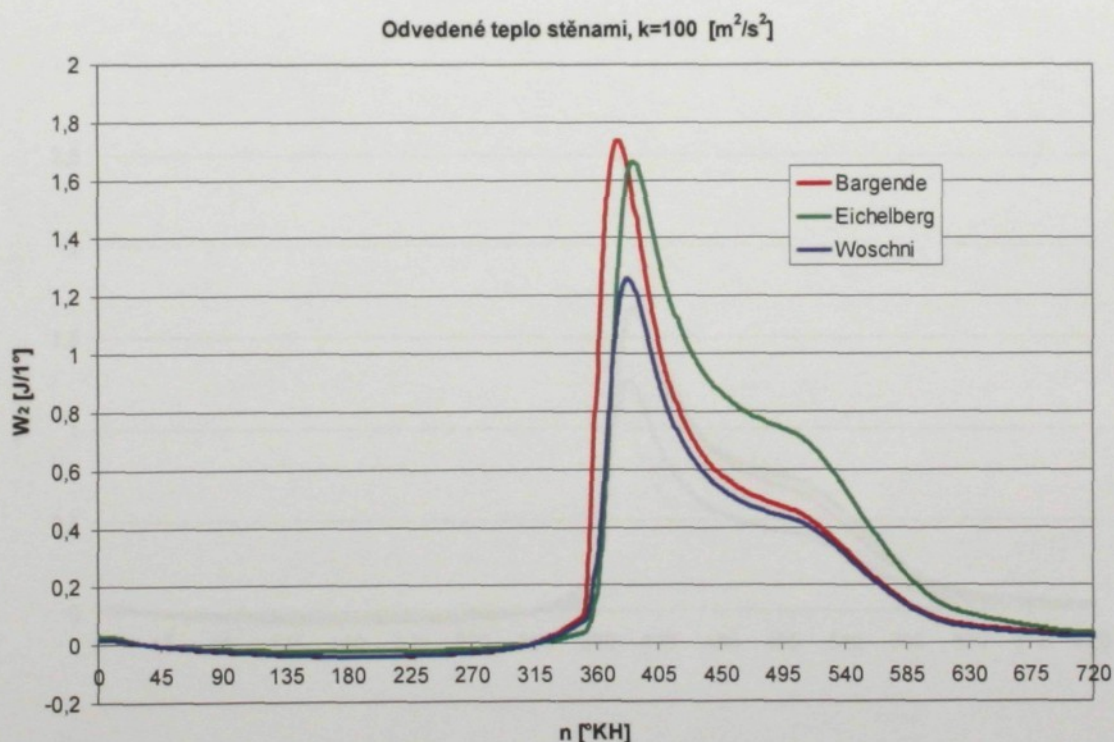
Pozn.: Měrná kinetická energie turbulentí zahrnuje turbulenci rozvíření v náplni válce, vyvolanou třemi druhy rozvíření náplně válce (tangenciální, příčné a radiální) a pohybem pístu. Její velikost se určuje (odhaduje) výpočtově pomocí softwaru s CFD (Fluent aj.). Pro účely DP byla hodnota k odhadována – její velikost má vliv na okamžité hodnoty součinitele přestupu tepla, na celkově odvedené teplo z náplně válce je vliv parametru k menší, jak ukazuje tab. 2 – pro motor ŠA 1.2 HTP, 100% zatížení, 3000 1/min.

Tab. 2: Velikost celkového odvedeného tepla pro uvedené součinitele přestupu tepla; u Bargendeho součinitele přestupu tepla v závislosti na třech zvolených měrných kinetických energiích turbulentí náplně válce.

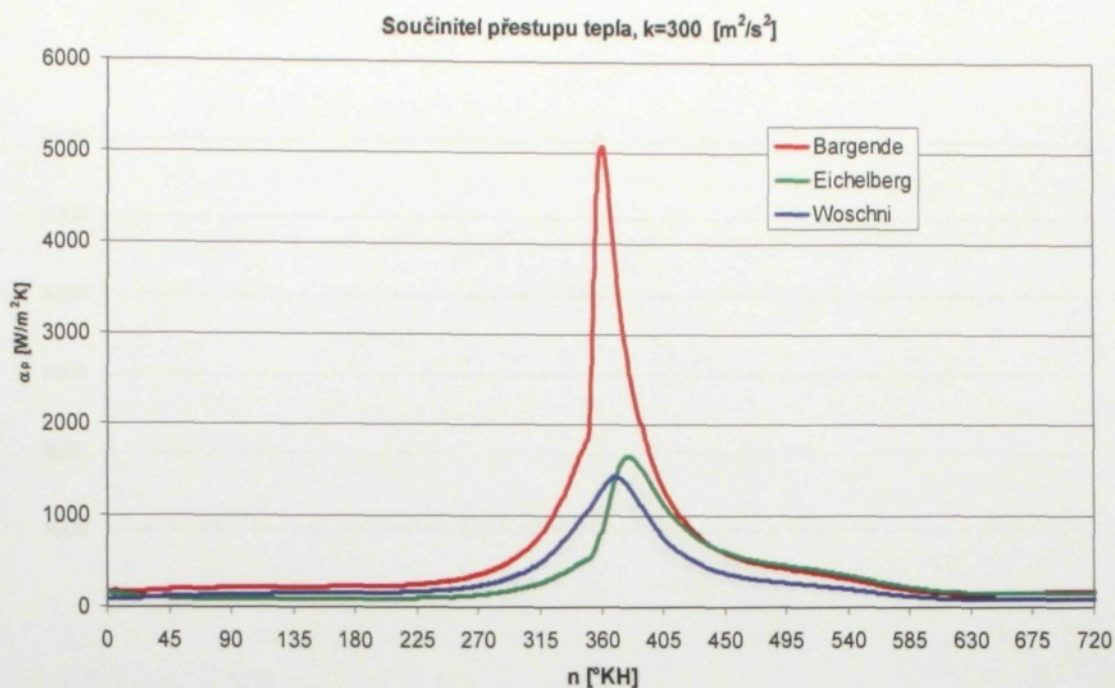
Celkové odvedené teplo v [J] stanovené pomocí součinitele přestupu tepla podle:				
Eichelberga	Woschniho	Bargendeho		
194,4	125,5	Měrná kinetická energie turbulentí [m ² /s ²]	100	156,0
			300	225
			500	270,9



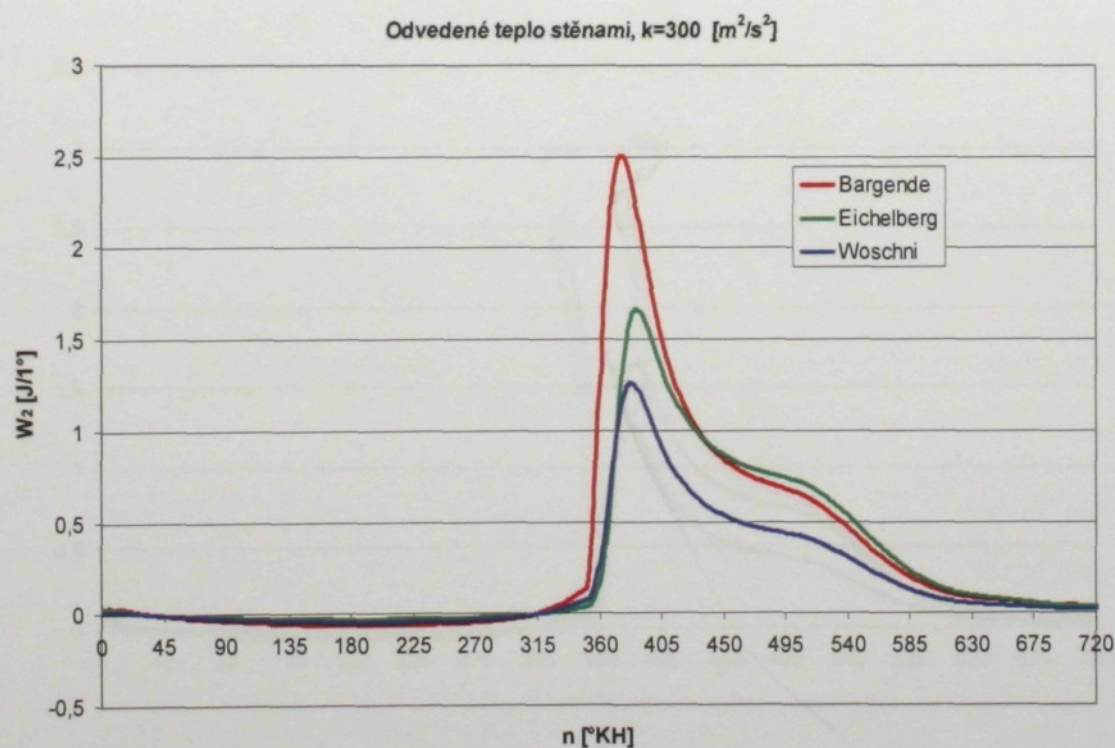
Obr. 6: Průběhy součinitelů přestupu tepla stanovených podle různých empirických vztahů (viz legenda v grafu) pro parametr rozvíření náplně válce $\bar{k}=100 \text{ m}^2/\text{s}^2$.



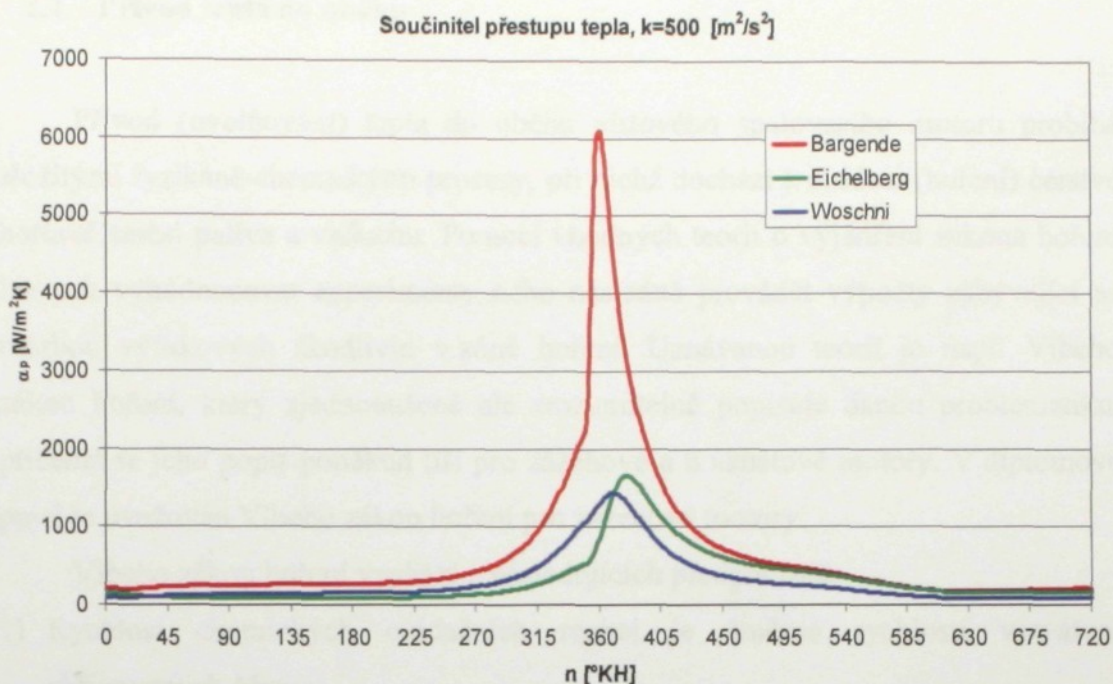
Obr. 7: Průběhy odvedeného tepla stanovených podle různých empirických vztahů (viz legenda v grafu) pro parametr rozvíření náplně válce $\bar{k}=100 \text{ m}^2/\text{s}^2$.



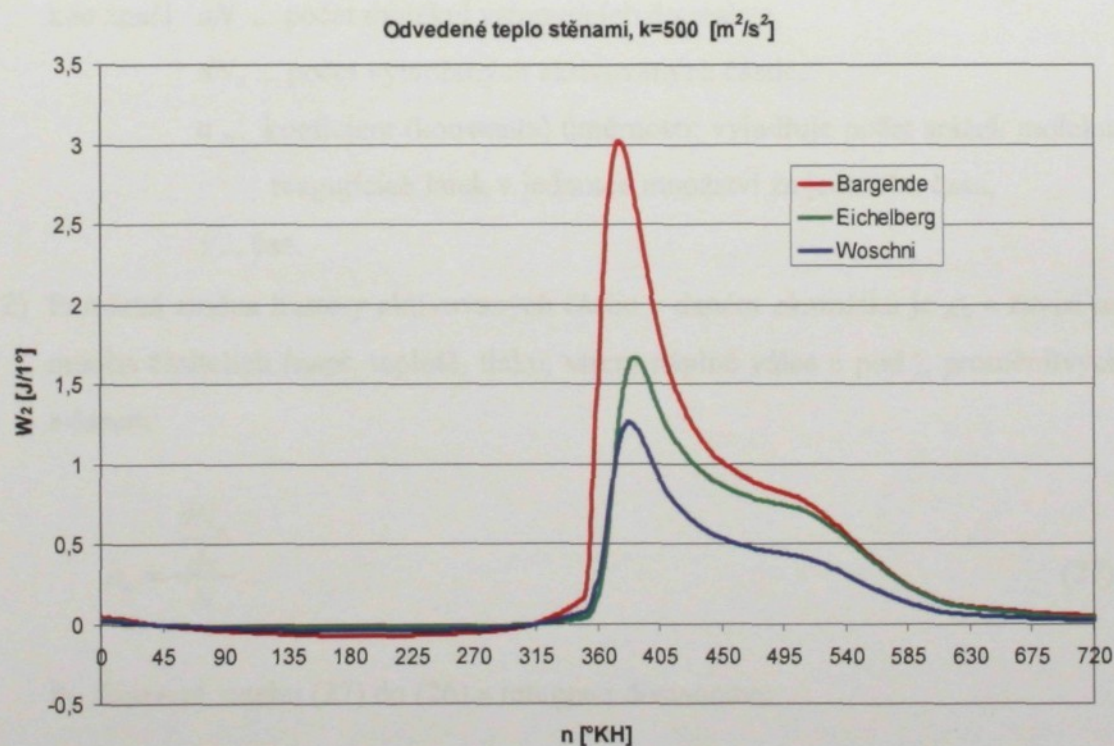
Obr. 8: Průběhy součinitelů přestupu tepla stanovených podle různých empirických vztahů (viz legenda v grafu) pro parametr rozvíření náplně válce $\bar{k}=300 \text{ m}^2/\text{s}^2$.



Obr. 9: Průběhy odvedeného tepla stanovených podle různých empirických vztahů (viz legenda v grafu) pro parametr rozvíření náplně válce $\bar{k}=300 \text{ m}^2/\text{s}^2$.



Obr. 10: Průběhy součinitelů přestupu tepla stanovených podle různých empirických vztahů (viz legenda v grafu) pro parametr rozvíření náplně válce $\bar{k}=500 \text{ m}^2/\text{s}^2$. ✕



Obr. 11: Průběhy odvedeného tepla stanovených podle různých empirických vztahů (viz legenda v grafu) pro parametr rozvíření náplně válce $\bar{k}=500 \text{ m}^2/\text{s}^2$. ✕

2.4. Přívod tepla do oběhu

Přívod (uvolňování) tepla do oběhu pístového spalovacího motoru probíhá složitými fyzikálně-chemickými procesy, při nichž dochází k oxidaci (hoření) čerstvé hořlavé směsi paliva a vzduchu. Pomocí vhodných teorií o vyjádření zákona hoření lze pak vyhodnocovat experimenty nebo následně provádět výpočty zabývající se tvorbou výfukových škodlivin v zóně hoření. Uznávanou teorií je např. Víbeho zákon hoření, který zjednodušeně ale srozumitelně popisuje danou problematiku, přičemž se jeho popis poněkud liší pro zážehové a u vznětové motory. V diplomové práci je uvažován Víbeho zákon hoření pro zážehové motory.

Víbeho zákon hoření vychází z následujících předpokladů:

- 1) Rychlost chemických oxidačních reakcí je úměrná rychlosti vytváření aktivovaných částic:

$$-\frac{dN}{d\tau} = a \cdot \frac{dN_a}{d\tau}, \quad (26)$$

kde značí: dN ... počet molekul vstupujících do reakce,

dN_a ... počet vytvořených aktivovaných částic,

a ... koeficient (konstanta) úměrnosti; vyjadřuje počet srážek molekul reagujících látek v jednotce množství za jednotku času,

τ ... čas.

- 2) Poměrná změna hustoty aktivovaných částic v daném okamžiku je ρ_a a závisí na mnoha činitelích (např. teplotě, tlaku, víření náplně válce a pod.), proměnlivých s časem:

$$\rho_a = \frac{\frac{dN_a}{d\tau}}{N}. \quad (27)$$

Po dosazení vztahu (27) do (26) a integraci dostaneme:

$$N = N_o \cdot e^{-\int_0^{\tau} a \cdot \rho_a \cdot d\tau}, \quad (28)$$

kde značí: N_o ... celkový počet molekul v reagujícím systému na počátku reakce.

3) Část paliva, která prošla reakcí do doby τ je x . Zbytek paliva je:

$$1 - x = \frac{N}{N_o} \quad (29)$$

Dosazením vztahu (29) do rovnice (28) dostaneme:

$$x = 1 - e^{-\int_0^{\tau} a \cdot \rho_a \cdot d\tau} \quad (30)$$

Rychlost reakce v době τ potom bude:

$$w = \frac{dx}{d\tau} = a \cdot \rho_a \cdot e^{-\int_0^{\tau} a \cdot \rho_a \cdot d\tau} \quad (31)$$

Víbe vyjádřil ρ_a jako funkci času ve tvaru:

$$a \cdot \rho_a = C \cdot \tau^m, \quad (32)$$

kde značí: C ... koeficient úměrnosti,

m ... parametr hoření.

Pokud dosadíme vztah (32) do rovnic (30) a (31), získáme Víbeho charakteristickou rovnici hoření směsi v pístovém spalovacím motoru pro podíl spálené směsi (33) a pro měrnou rychlost hoření (34):

$$x = 1 - e^{-\frac{C}{m+1} \tau^{m+1}} \quad (33)$$

$$w = C \cdot \tau^m \cdot e^{-\frac{C}{m+1} \tau^{m+1}} \quad (34)$$

4) Zavedením hodnoty podílu x_k , udávajícího stupeň vyhoření náplně směsi na konci doby hoření τ_k a po úpravě předcházejících rovnic dostaneme měrné velikosti vyhořelého podílu směsi (35) a rychlosti hoření (36) ve tvaru:

$$x = 1 - e^{-C_1 \left(\frac{\tau}{\tau_k} \right)^{m+1}} \quad (35)$$

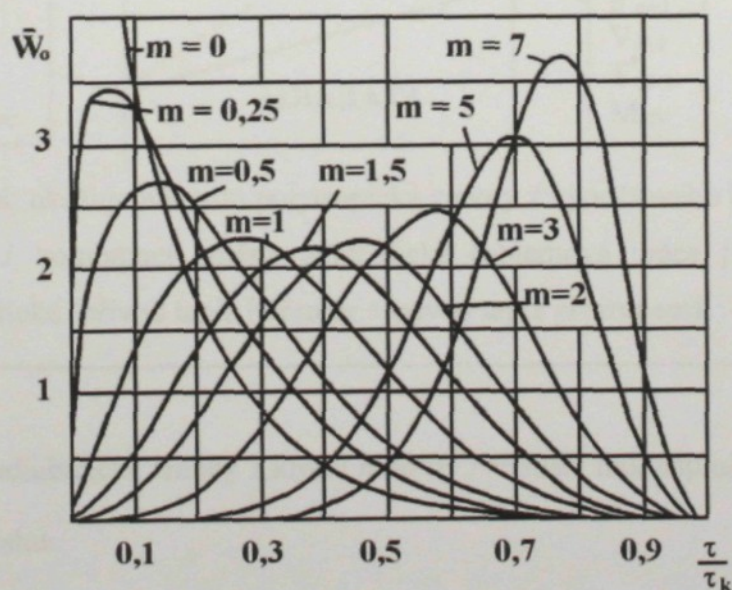
$$w = \frac{dx}{d\tau} = \frac{C_1}{\tau_k^{m+1}} \cdot (m+1) \cdot \tau^m \cdot e^{-C_1 \left(\frac{\tau}{\tau_k} \right)^{m+1}} \quad (36)$$

Celková doba hoření τ_k a parametr hoření m jsou kinetickými ukazateli spalovacího procesu. Fyzikální smysl doby hoření τ_k je definován jako doba, za kterou dojde ke spálení podílu x_k množství paliva. Konstanta C_1 je určena z podmínky pro $\tau = \tau_k$ je $x = x_k$ vztahem:

$$C_1 = -\ln(1 - x_k) \quad (37)$$

a nabývá pro $x_k = 0,99$ hodnoty $C_1 = 4,6$.

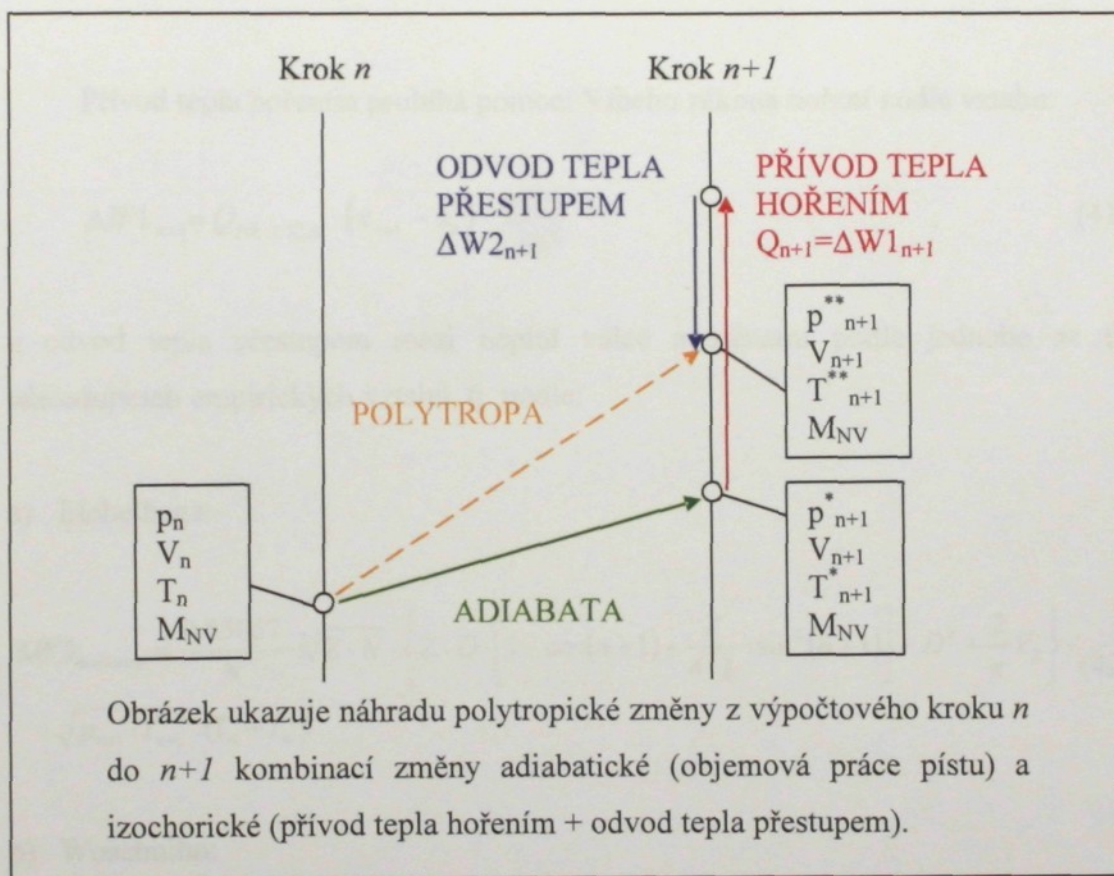
Parametr spalovacího procesu m charakterizuje polohu maximální rychlosti uvolňování tepla - s rostoucím m se maximální rychlost hoření posouvá dále od počátku spalovacího procesu, jak ukazuje obr. 12. Podle Víbeho se parametr spalovacího procesu m u zážehových motorů pohybuje od 0,8 až 2,6 (pro $\lambda = 1$).



Obr. 12: Zákon hoření podle Víbeho charakteristické rovnice.

2.5. Popis programu Tlak.xls

Program Tlak.xls (vytvořený na KVM FS Technické univerzitě v Liberci) poskytuje základní termodynamický výpočet pracovního oběhu čtyřdobých PSM s krokem výpočtu po 1° pootočení klikového hřídele. Program v každém výpočtovém kroku nahrazuje polytropický průběh kombinací adiabatické a izochorické změny. Adiabatickou změnou se určuje objemová práce pístu v daném výpočtovém kroku, izochorickou pak děje spojené s přívodem tepla hořením (podle Víbeho zákona hoření) a přestupem tepla mezi náplní válce a stěnami (podle empirických vztahů pro součinitele přestupu tepla), jak ukazuje následující obrázek:



Vlivem adiabatické změny z kroku n do $n+1$ vzroste tlak náplně válce z p_n na p_{n+1}^* podle vztahu:

$$p_{n+1}^* = p_n \cdot \left(\frac{V_n}{V_{n+1}} \right)^{\kappa_n} \quad (38)$$

Teplota náplně válce po adiabatické změně v kroku $n+1$ se vypočítá ze stavové rovnice:

$$T_{n+1}^* = \frac{p_{n+1}^* \cdot V_{n+1}}{M_{NV} \cdot r_{n+1}}, \quad (39)$$

přičemž měrná plynová konstanta r_{n+1} se bude měnit podle složení náplně válce podle vztahu:

$$r_{n+1} = \frac{M_{SM/n+1}}{M_{NV}} \cdot r_{SM} + \frac{M_{SP/n+1}}{M_{NV}} \cdot r_{SP}. \quad (40)$$

Přívod tepla hořením probíhá pomocí Víbeho zákona hoření podle vztahu:

$$\Delta W1_{n+1} = Q_{PR-CEK} \cdot (x_{n+1} - x_n) \quad (41)$$

a odvod tepla přestupem mezi náplní válce a stěnami podle jednoho ze tří následujících empirických vztahů, tj. podle:

a) Eichelbega:

$$\Delta W2_{n+1/eich} = \frac{0,65057}{N} \cdot \sqrt[3]{Z \cdot N} \cdot \left\{ Z \cdot D \cdot \left[1 - \cos(n+1) + \frac{Z}{4 \cdot L} \cdot \sin^2(n+1) \right] + D^2 + \frac{2}{\pi} V_z \right\} \cdot \sqrt{p_{n+1} \cdot T_{n+1}} \cdot (T_n - T_{st}) \quad (42)$$

b) Woschniho:

$$\Delta W2_{n+1/wos} = \frac{207,868}{N} \cdot \left[p_{n+1} \cdot (2,28 + 0,308 \cdot K) \cdot \frac{N \cdot Z}{30} \right]^{0,786} \cdot \frac{1}{D^{0,214} \cdot T^{0,525}} \cdot \left\{ Z \cdot D \cdot \left[1 - \cos(n+1) + \frac{Z}{4 \cdot L} \cdot \sin^2(n+1) \right] + D^2 + \frac{2}{\pi} P_{SPPR} \right\} \cdot (T_n - T_{st}) \quad (43)$$

c) Bargendeho (doplněn do stávajícího programu Tlak.xls v rámci DP):

$$\Delta W_{2_{n+1/barg}} = \frac{399,898}{N} \cdot \frac{\Delta \cdot (p_{n+1} \cdot w)^{0,78}}{V_{n+1}^{0,073} \cdot T_{n+1}^{0,477}} \cdot \left\{ Z \cdot D \cdot \left[1 - \cos(n+1) + \frac{Z}{4 \cdot L} \cdot \sin^2(n+1) \right] + D^2 + \frac{2}{\pi} P_{SPPR} \right\} \cdot (T_n - T_{st}) \quad (44)$$

Teplota po obou izochorických změnách (přívod a odvod tepla) pak bude:

$$T_{n+1}^{**} = \frac{\Delta W_{1_{n+1}} + \Delta W_{2_{n+1}}}{M_{NV} \cdot c_{v/T_{n+1}}} + T_{n+1}^* \quad (45)$$

a tlak ve stejném místě:

$$p_{n+1}^{**} = p_{n+1}^* \cdot \frac{T_{n+1}^{**}}{T_{n+1}^*} \quad (46)$$

Střední polytropický exponent v kroku $n+1$ lze vypočítat ze vztahu:

$$\bar{k}_{n+1} = \frac{\ln p_n - \ln p_{n+1}}{\ln V_{n+1} - \ln V_n} \quad (47)$$

Polytropická práce pístu v daném kroku $n+1$ pak bude:

$$W_{IND/n+1} = \frac{p_n \cdot V_n}{\bar{k}_{n+1} - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{V_n}{V_{n+1}} \right)^{\bar{k}_{n+1} - 1} \right], \quad (48)$$

kteřá se využije pro zpřesnění výpočtu objemové změny v kroku $n+1$.

Energetická bilance v kroku $n+1$ podle prvního termodynamického zákona (1) bude mít po dosazení tvar:

$$\Delta W_{1_{n+1}} + \Delta W_{2_{n+1}} = M_{NV} \cdot c_{v-NV/T_{n+1}^{**}} \cdot T_{n+1} - M_{NV} \cdot c_{v-NV/T_n} \cdot T_n + W_{IND/n+1}, \quad (49)$$

kde je jedinou neznámou teplota T_{n+1} , která po úpravě bude mít tvar:

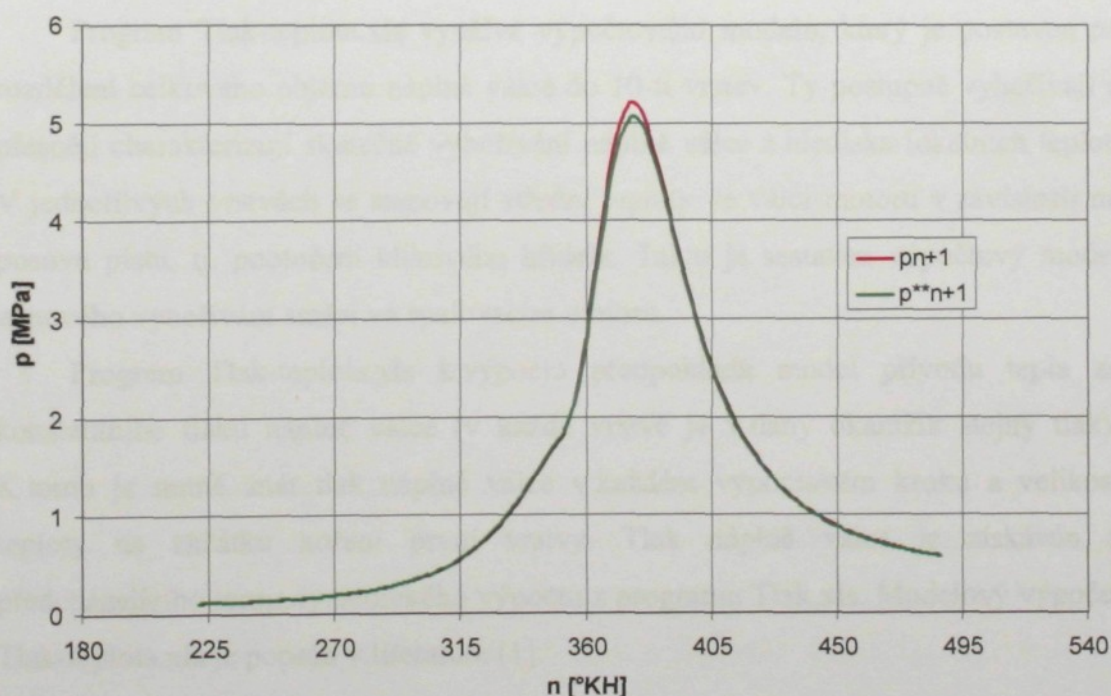
$$T_{n+1} = \frac{\Delta W1_{n+1} + \Delta W2_{n+1} - W_{IND/n+1} + M_{NV} \cdot c_{v-NV/T_n} \cdot T_n}{M_{NV} \cdot c_{v-NV/T_{n+1}}}. \quad (50)$$

Tlak v kroku $n+1$ se vypočte opět ze stavové rovnice:

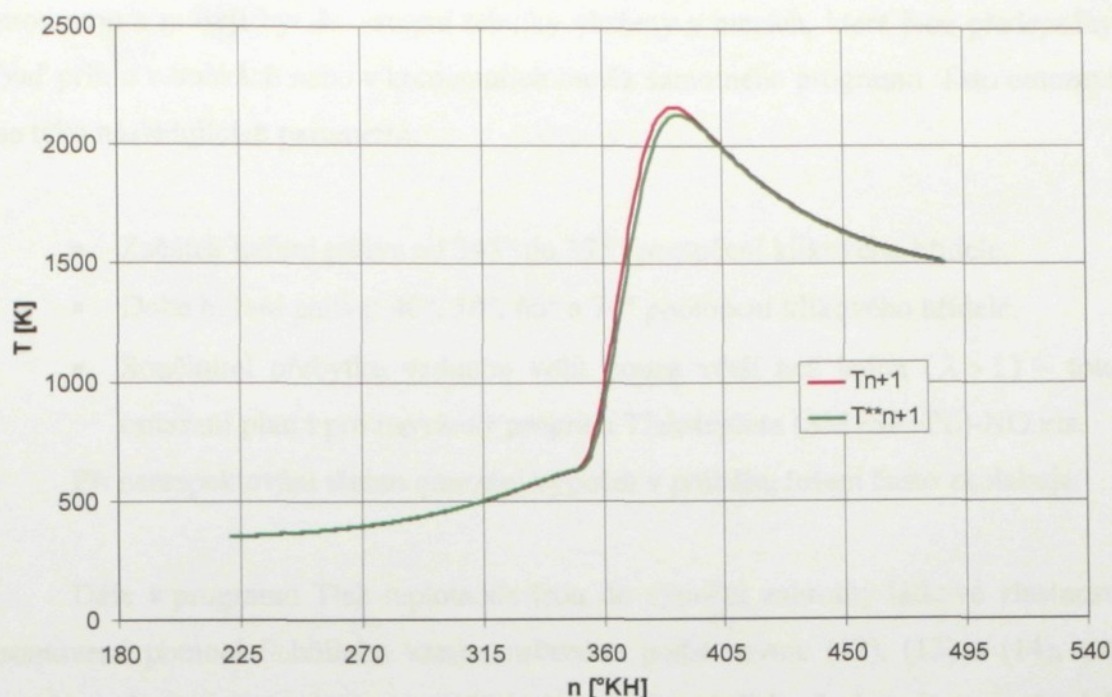
$$p_{n+1} = \frac{M_{NV} \cdot r_{NV/n+1} \cdot T_{n+1}}{V_{n+1}}. \quad (51)$$

Energetická bilance podle prvního termodynamického zákona zpřesňuje výpočet objemové změny v kroku $n+1$: hodnoty T_{n+1} a p_{n+1} se od hodnot T_{n+1}^{**} a p_{n+1}^{**} odlišují jen velmi málo, ale výpočet však více odpovídá zákonům termodynamiky.

Následující obrázky (obr. 13 a 14) ukazují porovnání tlaků a teplot ve válci motoru počítaných podle programu Tlak.xls (fialová křivka) a podle zpřesněného výpočtu (zelená křivka).



Obr. 13: Porovnání tlaků ve válci motoru: Tlak.xls (fialová křivka), zpřesněný výpočet (zelená křivka).



Obr. 14: Porovnání teplot ve válci motoru: Tlak.xls (fialová křivka), zpřesněný výpočet (zelená křivka).

2.6. Popis programu Tlak-teplota.xls

Program Tlak-teplota.xls využívá výpočtového modelu, který je postaven na rozdělení celkového objemu náplně válce do 10-ti vrstev. Ty postupně vyhořívají a přesněji charakterizují skutečné vyhořívání náplně válce z hlediska lokálních teplot. V jednotlivých vrstvách se stanovují střední teploty ve válci motoru v závislosti na posuvu pístu, tj. pootočení klikového hřídele. Takto je sestaven výpočtový model zónového vyhořívání směsi ve spalovacím motoru.

Program Tlak-teplota.xls k výpočtu předpokládá model přívodu tepla za konstantního tlaku náplně válce (v každé vrstvě je v daný okamžik stejný tlak). K tomu je nutné znát tlak náplně válce v každém výpočtovém kroku a velikost teploty na začátku hoření první vrstvy. Tlak náplně válce je získáván z předcházejícího termodynamického výpočtu z programu Tlak.xls. Modelový výpočet Tlak-teplota.xls je popsán v literatuře [1].

Správný chod programu Tlak-teplota.xls je omezen zadávanými velikostmi vstupních hodnot určitých parametrů. Zadávané vstupní hodnoty představují omezení

programu a musejí být do vstupní tabulky vloženy v mezích, které jsou předepsány buď přímo v buňkách nebo v komentářích buněk samotného programu. Tato omezení se týká následujících parametrů:

- Začátek hoření paliva od 345° do 375° pootočení klikového hřídele.
- Doba hoření paliva: 40° , 50° , 60° a 70° pootočení klikového hřídele.
- Součinitel přebytku vzduchu volit pouze větší než jedna ($\lambda > 1$) – toto omezení platí i pro navržený program Tlak-teplota (SM+SP+PL)-NO.xls.

Při nerespektování těchto omezení výpočet v průběhu řešení často zkolabuje.

Dále v programu Tlak-teplota.xls jsou do výpočtů zahrnuty látkové vlastnosti stanovené pomocí Schülleho vztahu určeného podle rovnic (12), (13) a (14), což neodpovídá skutečným hodnotám látkových vlastností. Tab. 3 ukazuje na zvolených příkladech rozdíl mezi látkovými vlastnostmi určenými podle skutečné náplně válce (LPG, NG, BA) a podle Schülleho teorie s parametry příslušného paliva.

Tab. 3: Porovnání hlavních hodnot motoru při použití látkových vlastností skutečné náplně válce a podle Schülleho: motor ŠA 1.2 HTP, $n = 3000$ 1/min, 100% zatížení, $\lambda = 1$).

	LPG	LPG - Schülle	NG	LPG - Schülle	BA	BA - Schülle
$p_{\max}$ [Mpa]	5,40	6,29	5,28	6,02	5,62	6,04
$T_{\max}$ [K]	2147	2574	2147	2451	2187	2597
p_i [Mpa]	1,248	1,407	1,164	1,315	1,190	1,335

2.7. Popis programu Zeldovich.xls

Program Zeldovich.xls využívá převzatých hodnot počítaných v programech Tlak.xls a Tlak-teplota.xls. Konkrétně byla převzata střední teplota a objem jednotlivých vrstev. Program Zeldovich.xls vypočítává koncentraci NO ve výfukových plynech motoru v jednotkách ppm a dále také koncentraci zbytkového kyslíku ve spalínách při výfuku z válce v procentech.

Ke stanovení koncentrace NO ve výfukových plynech je využita rovnice (52), která představuje základní rovnici programu Zeldovich.xls. Vztah pro tvorbu NO je vyjádřen v závislosti na čase, která má tuto podobu:

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{6 \cdot 10^{16}}{T^{0,5}} \cdot e^{\frac{-69090}{T}} \cdot [O_2]_e^{0,5} \cdot [N_2]_e, \quad [mol \cdot cm^{-3} \cdot s^{-1}] \quad (52)$$

kde značí: T ... střední teplotu spalin v příslušné vrstvě, $[K]$
 $[O_2]_e$... rovnovážnou koncentraci O_2 ve spalinách, $[mol \cdot cm^{-3}]$
 $[N_2]_e$... rovnovážnou koncentraci N_2 ve spalinách, $[mol \cdot cm^{-3}]$
 t ... časový úsek vztažený k velikosti příslušné vrstvy. $[s]$

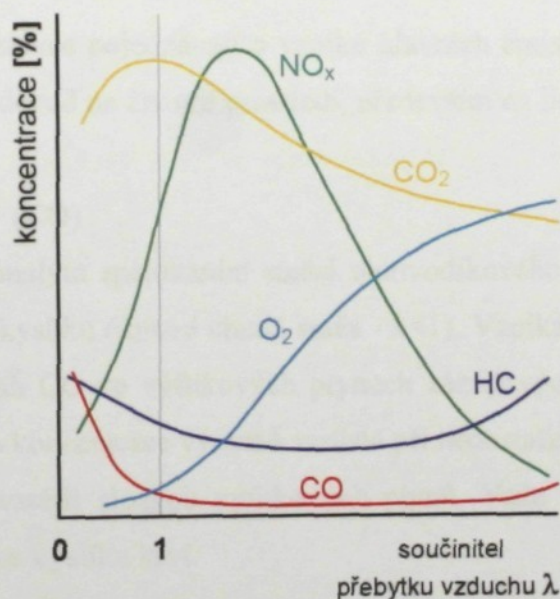
Rovnice (52) je závislá na teplotě (lokální teplotě v post-zóně plamene) a na koncentraci kyslíku. Vysoká teplota a zvýšená koncentrace kyslíku ($\lambda > 1$) zvyšují produkci NO.

Vztah (52) vychází ze znalosti kinetického modelu, který je sestaven z chemických rovnic rozšířeného Zeldovichova mechanismu (viz kapitola 3.3). Odvození kinetického modelu pro vznik NO je podrobně zpracováno v literatuře [2] v kapitole 4.2.

Program Zeldovich.xls zahrnuje stejná omezení jako v případě programu Tlak-teplota.xls, protože využívá převzatých hodnot právě z programu Tlak-teplota.xls.

3. Emise zážehového spalovacího motoru

Současný rozsáhlý provoz pístových spalovacích motorů přináší kromě užitečné práce také negativní účinky na životní prostředí a na lidský organismus. Vlivem chemických dějů ve válci motoru během procesu oxidace (hoření) směsi paliva a vzduchu dochází k tvorbě škodlivých látek (emisí), které se výfukovou soustavou vypouštějí do ovzduší (princip otevřeného systému spalování motoru). Mezi hlavní emise zážehových spalovacích motorů patří oxid uhličitý (CO_2) (je to produkt dokonalé oxidace uhlíku – nejsou to tedy emise v pravém smyslu), oxid uhelnatý (CO), nespálené uhlovodíky (HC) a oxidy dusíku (NO_x). Produkce zmíněných výfukových škodlivin ve válci motoru závisí především na bohatosti spalované směsi. Obr. 15 proto zachycuje závislost koncentrace těchto škodlivin a zbytkového kyslíku (O_2) na součiniteli přebytku vzduchu λ .



Obr. 15: Závislost koncentrace škodlivých emisí a zbytkového kyslíku na součiniteli přebytku vzduchu – podle [11].

3.1. Vliv výfukových emisí na životní prostředí

Každým rokem dochází ke zvyšování počtu vyráběných spalovacích motorů v automobilovém průmyslu. Jejich provozem se do ovzduší vypouští velké množství výfukových plynů. Legislativa předepisuje pro každou kategorii motorových vozidel emisní limity zvláště pro každou emisní škodlivinu (např. emisní předpis Euro 4, jak uvádí tab. 4).

Tab. 4: Emisní limity výfukových škodlivin pro motorová vozidla kategorie M1, N1 se zážehovým motorem – podle [11].

Předpis	Platný od	Typ testu	Limity měrných emisí [g/km]		
			CO	HC	NO _x
Euro 4	2005	EHK 83	1,0	0,1	0,08

Dnes se velmi často používá pasivního snižování emisí ve výfukových plynech pomocí katalyzátorů. U zážehových motorů pracujících v oblasti stechiometrického složení směsi to zpravidla bývá třicestný (redukční) katalyzátor, při provozu v oblasti chudé směsi ($\lambda > 1$) pak katalyzátor dvoucestný (oxidační). Do výfukové soustavy se také často zařazuje selektivní katalyzátor, který snižuje koncentraci NO_x katalytickou redukcí pomocí vstřikování vodního roztoku čpavku (NH₃) do výfukových plynů.

Následující odstavce pojednávají o vzniku hlavních emisí výfukových plynů a charakterizují jejich dopad na životní prostředí, především na lidský organismus.

Oxid uhelnatý (CO)

Vzniká nedokonalým spalováním směsi uhlovodíkového paliva a vzduchu při místním nedostatku kyslíku (místní chudá směs - $\lambda < 1$). Vzniká také při spalování za nízkých teplot. Obsah CO ve výfukových plynech zážehových motorů je poměrně vysoký, protože jeho koncentrace výrazně vzrůstá při nedostatku kyslíku.

CO je nejjedovatější složkou výfukových plynů. Váže se na krevní barvivo, čímž zabraňuje přenos kyslíku krví.

Nespálené uhlovodíky (HC)

Vzniká jako výsledek předčasně zastavených oxidačních reakcí v určitých zónách spalovacího prostoru, v nichž nedochází k šíření plamene. Ve spojení s pevnými částicemi dochází k zesilování účinku uhlovodíků.

Nespálené uhlovodíky HC působí v lidském organismu škodlivě na sliznice, vyvolávají poruchy podmíněných reflexů a poškozují dýchací cesty. Některé druhy uhlovodíků (např. polycyklické aromatické uhlovodíky – PAH) jsou navíc rakovinotvorné a mutagenní.

Oxidy dusíku (NO_x)

Vznikají složitými chemickými reakcemi při vysokých teplotách (nad 1000°C , jak uvádí literatura [5]) ve válci při přítomnosti kyslíku a dusíku: z 95% jsou tvořeny oxidem dusnatým NO.

Oxidy dusíku poškozují v lidském organismu sliznice, nepříznivě působí na odolnost proti infekcím a způsobují dušnost. Oxidy dusíku jsou převážně nebezpečné z dlouhodobého hlediska svým chronickým působením. Při vzájemném výskytu oxidu dusíku, nespálených uhlovodíků a pevných částic či dalších mechanických nečistot ze vzduchu vzniká tzv. smog. Smog dráždí sliznice dýchacích cest, způsobuje slzení očí a poškozují vegetaci.

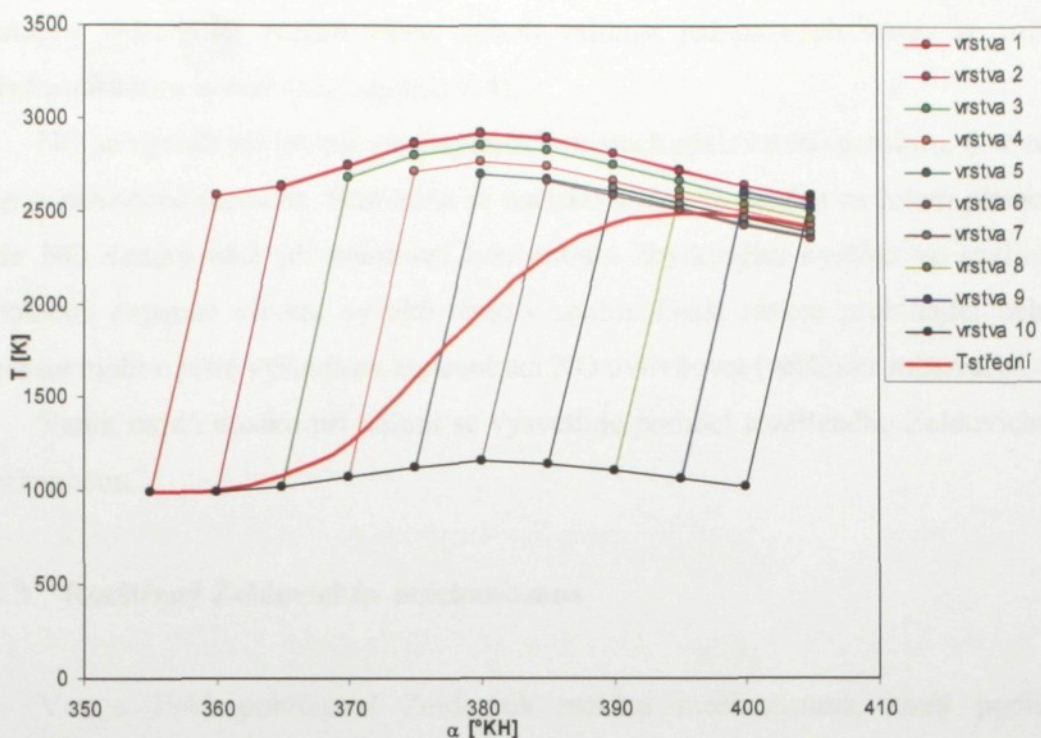
Oxid uhličitý (CO_2)

Je produkt dokonalé oxidace uhlíku, není to tedy emise v pravém smyslu. Není omezen legislativou, ale patří však mezi plyny, které vyvolávají tzv. skleníkový jev a přispívá tak k oteplování Země.

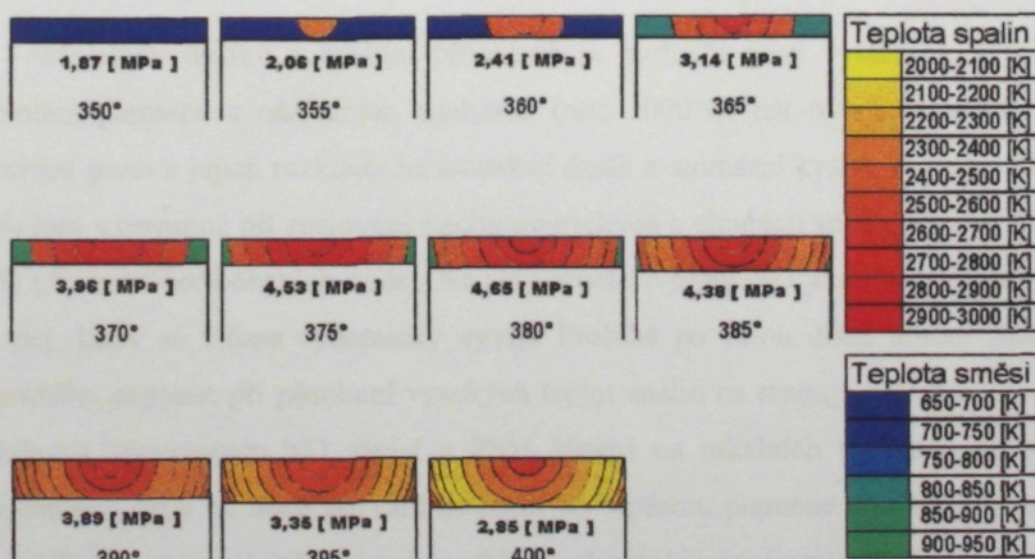
3.2. Emise oxidů dusíku NO_x zážehových motorů

Oxidy dusíku NO_x tvoří podstatnou část z celkového množství škodlivých látek produkovaných zážehovým spalovacím motorem spalující směs paliva a vzduchu v blízké oblasti stechiometrického složení ($\lambda=1$). NO_x vzniká jako vedlejší produkt hoření vlivem chemických reakcí mezi kyslíkem a dusíkem přivedených nasávaným vzduchem. Při spalovacím procesu je nejprve tvořen netoxický oxid dusný (N_2O) a dále pak toxický oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2), který je také toxický. NO_x obecně označuje společnou koncentraci složky NO a NO_2 ve výfukových plynech, přičemž složka NO je zastoupena přibližně z 95%. Oxid dusnatý v ovzduší oxiduje na relativně stabilní oxid dusičitý NO_2 .

Zjišťování emisí NO_x se provádí experimentálně, měřením jeho koncentrace ve výfukových plynech. Množství NO je nejdůležitější pro určení celkového množství NO_x . Koncentraci NO ve výfukových plynech lze rovněž odhadnout výpočtem, založeným na znalosti teplot a koncentraci O_2 a N_2 ve válci motoru. Ke stanovení koncentrace NO však není možné použít homogenní teplotní pole, s kterými uvažují běžné výpočtové modely. Do výpočtových modelů je nutné zahrnout teplotní rozvrstvení (lokální teploty) náplně válce s jejím postupným vyhoříváním: příklad takového modelu názorně ukazují následující dva obrázky (obr. 16 a 17).



Obr. 16: Průběh střední teploty náplně válce (červená křivka - silnější) a teploty čerstvé směsi a spalin v pomyslných 10-ti vrstvách objemu válce. Vyhořením vrstvy 1 vzroste její teplota i tlak, čímž dojde k prakticky adiabatickému stlačení vrstvy 2. Tím se zvýší teplota i tlak vrstvy 2, která po vyhoření dále zvyšuje svoji teplotu i tlak a adiabaticky stlačuje vrstvu 3 a také vrstvu 1, ve které jsou již spaliny. Tento mechanismus se opakuje až do vyhoření poslední vrstvy 10. Střední teplota náplně válce je v každém místě určena jako průměrná hodnota množství a teplot směsi a spalin. Průběh hoření náplně je popsán Víbeho charakteristickou rovnicí hoření vztahem (33).



Obr. 17: Příklad grafického teplotního rozvrstvení náplně válce [2].

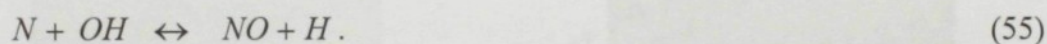
Postupné vyhořívání náplně válce, neboli velikost jednotlivých vrstev se určuje Víbeho zákonem hoření (viz kapitola 2.4).

NO se vytváří při hoření v nejteplejších místech spalovacího prostoru, tj. v zóně resp. v post-zóně plamene. Post-zóna se nachází v těsném závěsu za čelem plamene. Dále NO vzniká také při nenulové koncentraci zbytkového kyslíku ve spalinách v průběhu expanze vlivem vysoké teploty spalin. Další reakce probíhající během expanze mohou ještě výslednou koncentraci NO ovlivňovat (většinou snižovat).

Vznik oxidů dusíku při hoření se vysvětluje pomocí rozšířeného Zeldovichova mechanismu.

3.3. Rozšířený Zeldovichův mechanismus

V roce 1946 publikoval Zeldovich reakční mechanismus, který popisuje termický proces vzniku oxidu dusnatého. Po jeho rozšíření v roce 1975 Browmanem o rovnici (55) dostáváme rozšířený Zeldovichův mechanismus, který lze zapsat následujícími chemickými rovnicemi:



Molekuly dusíku a kyslíku přivedené ze vzduchu jsou vystaveny vysokým teplotám plamene a následným spalinám (nad 1000°C, jak uvádí literatura [5]). Dochází proto k jejich rozkladu na atomární dusík a atomární kyslík. Rovnice (53) a (54) jsou významné při spalování stechiometrických a chudých směsí, rovnice (53) a (55) při spalování bohatých směsí. Na celý proces tvoření NO je nutné nahlížet jako na děj, který se v čase dynamicky vyvíjí. Probíhá po celou dobu hoření směsi a v průběhu expanze při působení vysokých teplot spalin na reagující složky N_2 a O_2 . Výsledná koncentrace NO závisí u PSM hlavně na lokálních teplotách ve válci, koncentraci O_2 a na době setrvání molekul N_2 v pásmu plamene a vysokých teplot. Největší vliv na vznik NO má tedy rychlost vyhoření čerstvé směsi (určuje rozložení teploty ve válci motoru), již zmíněná doba setrvání N_2 a O_2 v nejteplejších místech a jejich koncentrace.

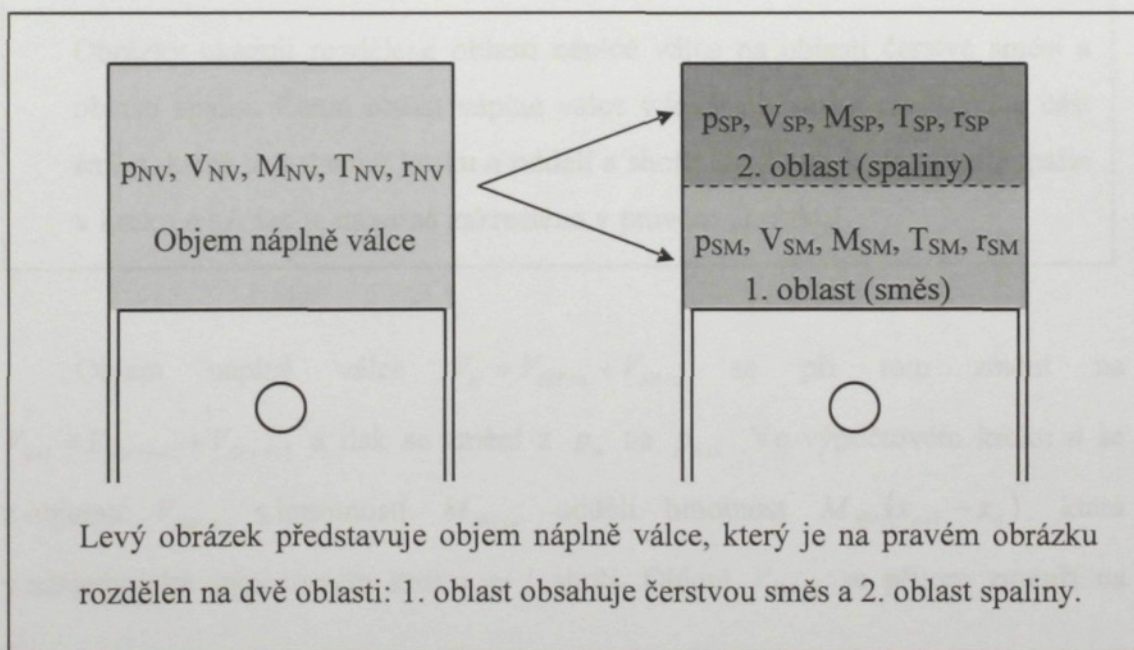
4. Úpravy a doplnění výpočtového programu Tlak.xls

Program Tlak.xls rozšířený o teplotní rozvrstvení objemu válce motoru a tvorbu NO_x byl v rámci diplomové práce doplněn o nový způsob výpočtu odvedeného tepla podle Bargendeho (viz. kap. 2.3.1.3.), který je určen vztahem (25). Vzhledem k tomu, že tento postup uvažuje pro výpočet součinitele přestupu tepla dvouzónový model směr-spaliny bylo nutné stanovit stavové veličiny zvlášť pro spaliny a zvlášť pro nespálenou směs.

4.1. Výpočet objemů a teplot spalin a směsi

Výpočet objemů a teplot spalin a směsi vychází z představy dvouzónového modelu náplně válce, která je rozdělena na směs a spaliny. Následující odstavce podrobně vysvětlují postup tohoto rozdělení s následným výkladem výpočtu stavových veličin v rozdělených zónách náplně válce.

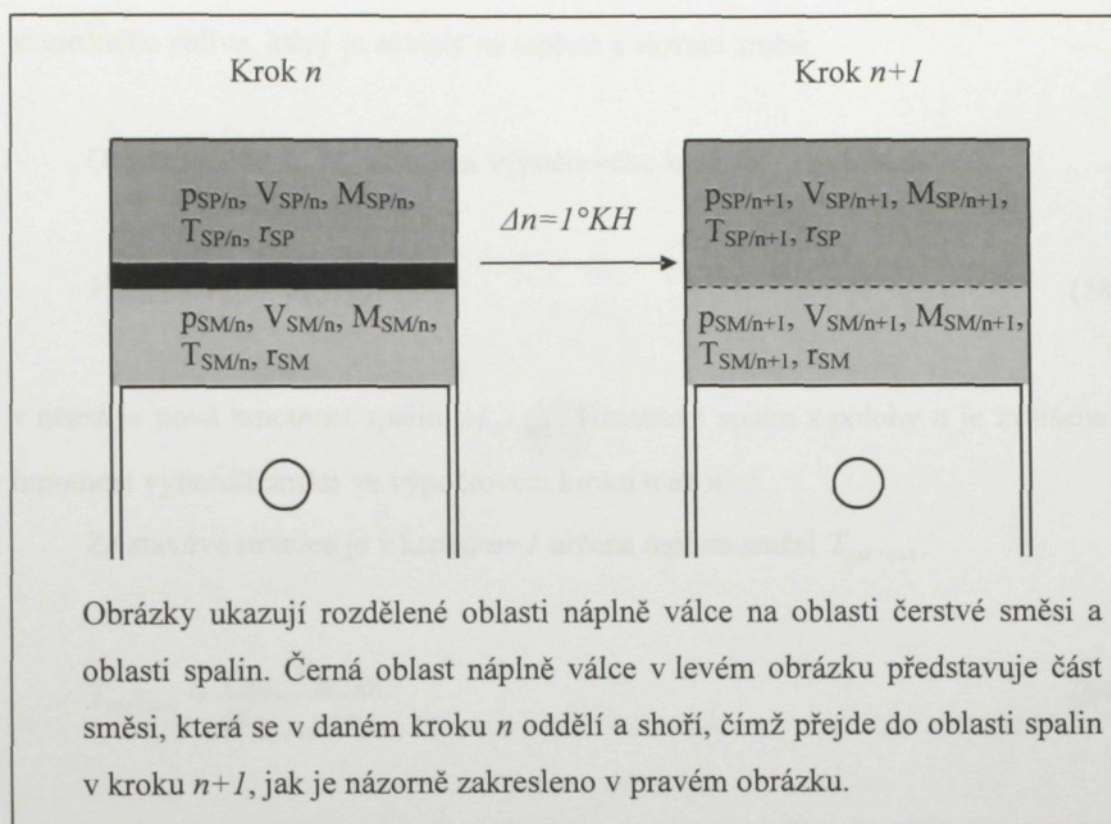
Objem náplně válce V_{NV} lze rozdělit po dobu hoření na dvě oblasti (zóny), jak názorně ukazuje následující obrázek.



První oblast je tvořena nespálenou směsí a druhá spalinami (vyhořelou směsí). Výpočtový model je založen na představě, že v obou oblastech je shodný tlak ($p_{SM} = p_{SP} = p_{NV}$). Okamžitá velikost (objem) těchto oblastí (V_{SM} a V_{SP}) je určena

stupněm vyhoření náplně válce. V každé oblasti je jiná teplota (T_{SM} a T_{SP}), která je stanovena okamžitými hodnotami tlaku (p_{SM} a p_{SP}), objemu (V_{SM} a V_{SP}), hmotností (M_{SM} a M_{SP}) a látkovými vlastnostmi (r_{SM} a r_{SP}) v objemu.

Výpočtový odhad teplot v zóně nespálené směsi a spalin vychází z teoretického výpočtu pracovního oběhu programem Tlak.xls. Kalkulace stavových veličin probíhá během každého výpočtového kroku (z polohy n do polohy $n+1$), přičemž jeden krok má velikost $1^\circ KH$, jak zobrazuje následující obrázek.



Objem náplně válce $V_n = V_{SM/n} + V_{SP/n}$ se při tom změní na $V_{n+1} = V_{SM/n+1} + V_{SP/n+1}$ a tlak se změní z p_n na p_{n+1} . Ve výpočtovém kroku n se z objemu $V_{SM/n}$ s hmotností $M_{SM/n}$ oddělí hmotnost $M_{NV}(x_{n+1} - x_n)$, která v následujícím výpočtovém kroku $n+1$ shoří. Objem $V_{SM/n}$ se přitom zmenší na $V_{SM/n}^*$:

$$V_{SM/n}^* = V_{SM/n} \cdot \frac{M_{SM/n} - M_{NV}(x_{n+1} - x_n)}{M_{SM/n}} \quad (56)$$

Zbytek objemu nespálené směsi $V_{SM/n}^*$ projde při změně tlaku z p_n na p_{n+1} adiabatickou změnou, čímž vznikne v poloze $n+1$ nový objem směsi $V_{SM/n+1}$:

$$V_{SM/n+1} = V_{SM/n}^* \cdot \left(\frac{p_n}{p_{n+1}} \right)^{\frac{1}{\kappa_{SM/n}}} \quad (57)$$

Adiabatický exponent pro směs $\kappa_{SM/n}$ je stanoven pomocí látkových vlastností skutečného paliva, který je závislý na teplotě a složení směsi.

Objem spalin $V_{SP/n+1}$ na konci výpočtového kroku $n+1$ pak bude:

$$V_{SP/n+1} = V_{n+1} - V_{SM/n+1}, \quad (58)$$

v němž je nová hmotnost spalin $M_{SP/n+1}$. Hmotnost spalin z polohy n je zvětšena o hmotnost vyhořelé směsi ve výpočtovém kroku n až $n+1$.

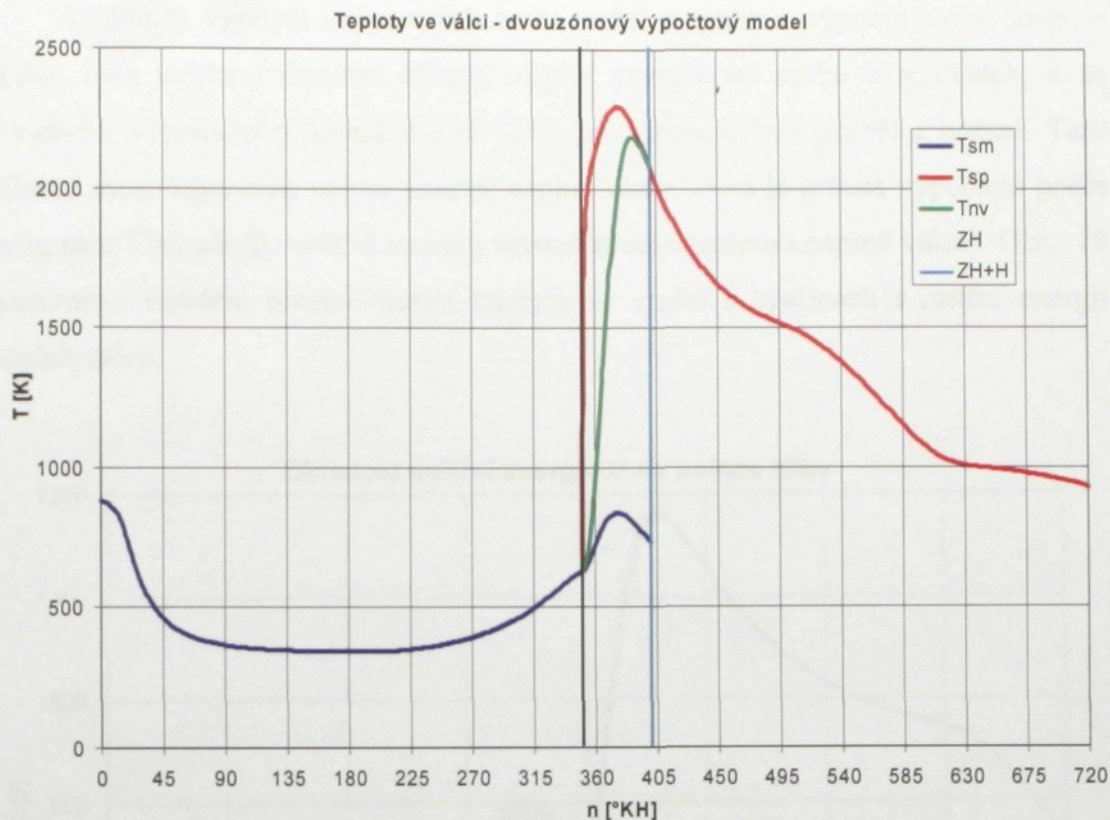
Ze stavové rovnice je v kroku $n+1$ určena teplota směsi $T_{SM/n+1}$:

$$T_{SM/n+1} = \frac{p_{n+1} \cdot V_{SM/n+1}}{M_{SM/n+1} \cdot r_{SM}} \quad (59)$$

a podobně i teplota spalin $T_{SP/n+1}$:

$$T_{SP/n+1} = \frac{p_{n+1} \cdot V_{SP/n+1}}{M_{SP/n+1} \cdot r_{SP}} \quad (60)$$

Obr. 18 ukazuje průběh teplot ve válci motoru, přičemž T_{nv} je teplota náplně válce, T_{sm} teplota směsi a T_{sp} teplota spalin.

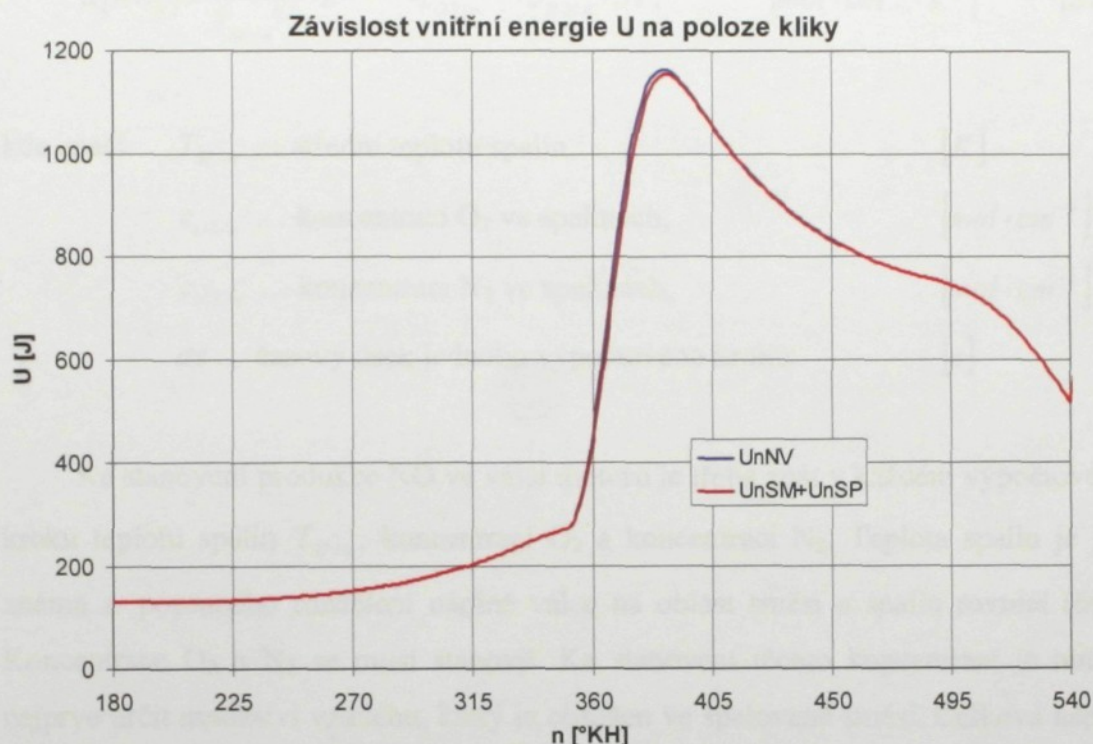


Obr. 18: Průběh střední teploty T_{nv} (zelená křivka), teploty směsi T_{sm} (modrá křivka) a teploty spalin T_{sp} (červená křivka) v závislosti na úhlu pootočení KH.

Skutečnost se však od zidealizované představy mírně odlišuje. Je to způsobeno tím, že změny objemů směsi $V_{SM/n}$ a spalin $V_{SP/n}$ při změně tlaku z p_n na p_{n+1} nejsou adiabatické, ale polytropické. Změna objemu $V_{SM/n}$ probíhá pravděpodobně polytropicky s přívodem tepla od vrstvy spalin, objemová změna spalin $V_{SP/n}$ je potom pravděpodobně polytropická změna, při které se teplo odvádí do nespálené směsi. Vzhledem k tomu, že hodnoty polytropického exponentu pro objemové změny nespálené směsi a spalin nelze jednoduše stanovit, byla objemová změna části náplně válce, tvořená směsí, uvažována jako adiabatická. Hodnoty adiabatického exponentu pro směs byly určeny v závislosti na teplotě s využitím empirických vztahů pro látkové vlastnosti směsi.

Pozn.: Odvod tepla z náplně válce do stěn není v takto postaveném výpočtovém modelu již uvažován, jeho ovlivnění stavu náplně válce je zahrnuto již do výpočtu pracovního oběhu v programu Tlak.xls (tj. do určení hodnot tlaku a střední teploty náplně válce).

Správnost výpočtu objemových změn směsi a spalin a výpočtu teplot směsi a spalin byla ověřena sumární bilancí vnitřní energie ve směsi a spalinách, a to v každém výpočtovém kroku z n do $n+1$ pro celou oblast průběhu hoření. Tato bilance musí odpovídat vnitřní energii náplně válce, která je určena výpočtem podle programu Tlak.xls (tj. vnitřní energii, určené střední teplotou náplně válce). Obr. 19 porovnává sumární bilanci vnitřní energie ve směsi a spalinách s vnitřní energií náplně válce.



Obr. 19: Porovnání sumární bilance vnitřní energie ve směsi a spalinách (červená křivka) s vnitřní energií náplně válce (modrá křivka) z programu Tlak.xls.

Provedená kontrola v programu TLAK.xls prokázala, že výše uvedeným postupem stanovené teploty směsi a spalin v celém průběhu hoření vykazují v bilanci vnitřní energie náplně válce (směsi + spalin) prakticky shodu s vnitřní energií náplně válce v termodynamickém výpočtu pracovního oběhu. To ukazuje, že modelový výpočet teploty směsi a teploty spalin lze použít pro kalkulaci Bargendeho součinitele přestupu tepla ve válci motoru.

5. Výpočtový program pro tvorbu NO

Dvouzónový model (popsaný v kapitole 4.1) byl použitý i pro výpočet tvorby NO při vyhořívání náplně ve válci motoru.

Hlavní rovnicí tvorby NO ve válci motoru je rovnice (52), která se v navrženém programu liší pouze jiným označením:

$$d[NO_n] = \frac{6 \cdot 10^{16}}{T_{SP/n}^{0,5}} \cdot e^{\frac{-69090}{T_{SP/n}}} \cdot c_{O_2/n}^{0,5} \cdot c_{N_2/n} \cdot d\tau, \quad [mol \cdot cm^{-3} \cdot s^{-1}] \quad (61)$$

kde značí: $T_{SP/n}$... střední teplotu spalin, $[K]$
 $c_{O_2/n}$... koncentraci O_2 ve spalinách, $[mol \cdot cm^{-3}]$
 $c_{N_2/n}$... koncentraci N_2 ve spalinách, $[mol \cdot cm^{-3}]$
 $d\tau$... časový úsek jednoho výpočtového kroku. $[s]$

Ke stanovení produkce NO ve válci motoru je třeba znát v každém výpočtovém kroku teplotu spalin $T_{SP/n}$, koncentraci O_2 a koncentraci N_2 . Teplota spalin je již známá z popsaného rozdělení náplně válce na oblast směsi a spalin rovnicí (60). Koncentrace O_2 a N_2 se musí stanovit. Ke stanovení těchto koncentrací je nutné nejprve určit množství vzduchu, který je obsažen ve spalované směsi. Celková náplň válce je složena z množství čerstvé směsi (množství paliva a vzduchu) a množství zbytkových plynů, které zůstaly ve válci vlivem nedokonalé výměny náplně válce z předchozího pracovního cyklu. Celková náplň válce lze tedy zapsat vztahem:

$$M_{NV} = M_V + M_P + M_{ZB}, \quad [g] \quad (62)$$

kde značí: M_{NV} ... množství náplně válce, $[g]$
 M_V ... množství vzduchu, $[g]$
 M_P ... množství paliva, $[g]$
 M_{ZB} ... množství zbytkových plynů. $[g]$

Množství zbytkových plynů je vyjádřeno součinitelem zbytkových plynů ξ :

$$\xi = \frac{M_{ZB}}{M_{NV}} \quad [-] \quad (63)$$

Bohatost spalované směsi vyjadřuje součinitel přebytku vzduchu λ :

$$\lambda = \frac{M_V}{M_P \cdot L_{vt}}, \quad [kg \cdot kg^{-1}] \quad (64)$$

kde značí: L_{vt} ... teoretické množství vzduchu potřebné
ke spálení 1 kg paliva. $[kg \cdot kg^{-1}]$

K určení množství zbytkového vzduchu ve spalinách je nutné vypočítat množství spalin v aktuálním kroku n . Využívá se k tomu rozdíl integrálních parametrů vyhoření náplně válce dvou po sobě jdoucích kroků. Tento parametr vychází z Víbeho zákona hoření (viz. kap. 2.4). Rovnice pak bude mít tvar:

$$\Delta M_{SP/n} = M_{NV}(x_n - x_{n-1}), \quad [g] \quad (65)$$

kde značí: x_n ... parametr vyhoření náplně válce v aktuálním kroku n , $[-]$

x_{n-1} ... parametr vyhoření náplně válce v předcházejícím kroku $n-1$. $[-]$

S využitím vztahů (62), (63) a (64) lze po úpravě napsat vztah pro množství vzduchu ve spalované směsi v kroku n :

$$M_{V/n} = \frac{\lambda \cdot L_{vt} \cdot \Delta M_{SP/n} \cdot (1 - \xi)}{1 + \lambda \cdot L_{vt}} \quad [g] \quad (66)$$

Ze složení atmosférického vzduchu (zjednodušeně 23 hmot. % O_2 a 77 hmot. % N_2) lze již stanovit množství O_2 a N_2 ve spalinách (ve výpočtovém kroku n). Podíl ostatních plynů ve vzduchu lze zanedbat (jejich množství je asi 1 hmot. %). Množství zbytkového kyslíku O_2 ve spalinách v kroku n tedy bude:

$$M_{O_2/n} = 0,23 \cdot (\lambda - 1) \cdot M_{V/n} \quad [g] \quad (67)$$

a množství N_2 v kroku n bude:

$$M_{N_2/n} = 0,77 \cdot \lambda \cdot M_{V/n} \quad [g] \quad (68)$$

Celkové množství O_2 v kroku n $M_{O_2-CELK/n}$ se vypočte jako součet O_2 přivedený v aktuálním kroku n $M_{O_2/n}$ a zbytkového O_2 z předcházejícího kroku $n-1$ $M_{O_2-ZB/n-1}$ podle vztahu:

$$M_{O_2-CELK/n} = M_{O_2/n} + M_{O_2-ZB/n-1} \quad [g] \quad (69)$$

Podobně se bude počítat celkové množství N_2 . Tedy jako součet N_2 přivedeného v aktuálním kroku n $M_{N_2/n}$ a zbytkového N_2 z předcházejícího kroku $n-1$ $M_{N_2-ZB/n-1}$ podle vztahu:

$$M_{N_2-CELK/n} = M_{N_2/n} + M_{N_2-ZB/n-1} \quad [g] \quad (70)$$

V rovnici (61) pro výpočet množství NO se vyskytují koncentrace O_2 a N_2 v jednotkách $[mol \cdot cm^{-3}]$. Proto je nutné množství O_2 a N_2 přepočítat. K přepočtu je zapotřebí znát objem spalin v každém výpočtovém kroku. Tím se v příslušném objemu spalin stanoví koncentrace O_2 a N_2 .

Program *Zeldovich.xls* využívá objemů převzatých z programu *Tlak-teplota.xls*, tedy objemů jednotlivých (10-ti) vrstev. Rozdělení náplně válce do vrstev bylo vysvětleno v kapitole 2.6. Navržený program pro výpočet NO se od programu *Zeldovich.xls* odlišuje tím, že postupně pracuje s objemem spalin z každého výpočtového kroku ($\Delta n = 1^\circ KH$), přičemž se výsledná koncentrace O_2 a N_2 určí z celkového objemu spalin ve válci.

Koncentrace O_2 ve spalinách $c_{O_2/n}$ odpovídá následujícímu vztahu:

$$c_{O_2/n} = \frac{M_{O_2-CELK/n}}{1000 \cdot \mathcal{M}_{O_2} \cdot V_{SP/n}}, \quad [mol \cdot cm^{-3}] \quad (71)$$

kde značí: $M_{O_2-CELK/n}$... celkové množství O_2 v kroku n , $[g]$

$\mathcal{M}_{O_2}$... molární hmotnost O_2 , $[g \cdot mol^{-1}]$

pozn. $\mathcal{M}_{O_2} = 32 \text{ g} \cdot mol^{-1}$

$V_{SP/n}$... celkový objem spalin v kroku n . $[g]$

Podobně koncentrace N_2 ve spalinách $c_{O_2/n}$ se vypočte následovně:

$$c_{O_2/n} = \frac{M_{N_2-CELK/n}}{1000 \cdot \mathcal{M}_{N_2} \cdot V_{SP/n}}, \quad [mol \cdot cm^{-3}] \quad (72)$$

kde značí: $M_{N_2-CELK/n}$... celkové množství N_2 v kroku n , $[g]$

$\mathcal{M}_{N_2}$... molární hmotnost N_2 , $[g \cdot mol^{-1}]$

pozn. $\mathcal{M}_{N_2} = 28 \text{ g} \cdot mol^{-1}$

$V_{SP/n}$... celkový objem spalin v kroku n . $[g]$

Ze stanovených koncentrací a střední teploty spalin lze již vypočítat koncentraci NO ve spalinách podle vztahu (61). K určení množství spotřebovaného O_2 na tvorbu NO je nutné koncentraci NO převést na látkové množství:

$$\Delta n_{NO/n} = NO_n \cdot V_{SP/n} \cdot 1000. \quad [mol] \quad (73)$$

Spotřebované látkové množství O_2 na tvorbu NO bude podle teoretického odvození uvedeného v literatuře [2] mít poloviční velikost látkového množství vyprodukovaného NO:

$$n_{O_2-SP/n} = \frac{\Delta n_{NO/n}}{2}. \quad [mol] \quad (74)$$

Látkové množství zbytkového O_2 je rozdíl celkového O_2 , který se účastní chemické reakce pro vznik NO a O_2 spotřebovaného na vznik NO:

$$n_{O_2-ZB/n} = n_{O_2/n} - n_{O_2-SP/n} \quad [mol] \quad (75)$$

Látkové množství zbytkového O_2 je potřeba dále převést na množství v $[g]$:

$$M_{O_2-ZB/n} = n_{O_2-ZB/n} \cdot \mathcal{M}_{O_2}, \quad [g] \quad (76)$$

které se přičte jako zbytkové množství O_2 v následujícím kroku do celkového množství O_2 , do rovnice (69) za člen $M_{O_2-ZB/n-1}$.

Součet vyprodukovaných látkových množství NO od začátku výpočtu produkce NO (tj. od začátku hoření ZH) až po aktuální krok n uvádí následující vztah:

$$\sum_{ZH}^n NO = \sum_{ZH}^{n-1} NO + \Delta n_{NO/n} \quad [mol] \quad (77)$$

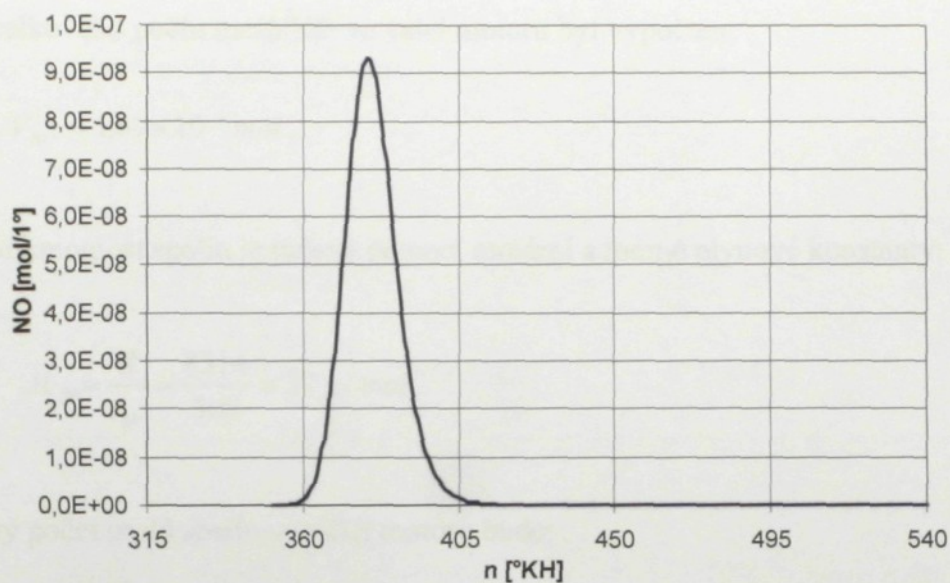
Obr. 20 v jednotlivých sloupcích přehledně ukazuje postup výpočtu navrženého výpočtového programu pro tvorbu NO ve válci motoru.

Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Výpočtový krok [°KH]	Objem spalín [dm ³]	Teplota spalín [K]	Parametr vyhoření [-]	Množství spalín [g]	Množství vzduchu [g]	Množství kyslíku [g]	Zbytkový kyslík [g]	Celkové množství kyslíku [g]	Látkové množství kyslíku [mol]	Koncen-trace kyslíku [mol.cm ⁻³]	Množství dusíku [g]
n	$V_{SP/n}$	$T_{SP/n}$	x_n	$\Delta M_{SP/n}$	$M_{V/n}$	$M_{O_2/n}$	$M_{O_2-ZB/n-1}$	$M_{O_2-CELK/n}$	$n_{O_2/n}$	$c_{O_2/n}$	$M_{N_2/n}$
= n	$V_{SP/n}$	$T_{SP/n}$	x_n	$= M_{NV} \cdot (x_n - x_{n-1})$	$= [\lambda \cdot L_{vt} \cdot M_{SP} \cdot (1-\xi)] / (1 + [\lambda \cdot L_{vt}])$	$= 0,23 \cdot (\lambda - 1) \cdot M_{V/n}$	$= M_{O_2-ZB/n-1}$	$= M_{O_2/n} + M_{O_2-CELK/n-1}$	$= (M_{O_2-CELK/n}) / M_{O_2}$	$= (n_{O_2/n}) / (1000 \cdot V_{SP/n})$	$= 0,77 \cdot \lambda \cdot M_{V/n}$

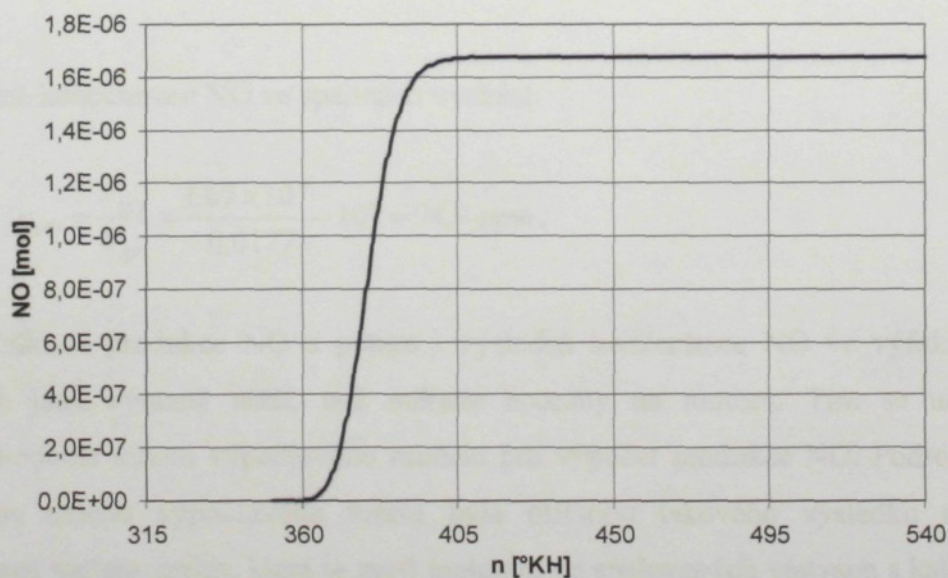
Sloupec	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Výpočtový krok [°KH]	Zbytkový dusík [g]	Celkové množství dusíku [g]	Látkové množství dusíku [mol]	Koncen-trace dusíku [mol.cm ⁻³]	Časový úsek kroku [s]	Produkce NO [mol.cm ⁻³]	Látkové množství NO [mol]	Látk. mn. spotřebovaného O ₂ [mol]	Látk. mn. zbytkového O ₂ [mol]	Množství zbytkového O ₂ [g]	Suma látk. mn. NO [mol]
n	$M_{N_2-ZB/n-1}$	$M_{N_2-CELK/n}$	$n_{N_2/n}$	$c_{N_2/n}$	Δt	ΔNO_n	$\Delta n_{NO/n}$	$n_{O_2-SP/n}$	$n_{O_2-ZB/n}$	$M_{O_2-ZB/n}$	$\sum_{ZH}^n NO$
= n	$= M_{N_2-ZB/n-1}$	$= M_{N_2/n} + M_{N_2-ZB/n-1}$	$= (M_{N_2-CELK/n}) / M_{N_2}$	$= (n_{N_2/n}) / (1000 \cdot V_{SP/n})$	$= 1 / (6 \cdot n_{mot})$	$= 6 \cdot 10^6 / (T_{SP/n})^{0,5} \cdot e^{(-69090/T_{SP/n})} \cdot (c_{O_2/n})^{0,5} \cdot c_{N_2/n} \cdot \Delta t$	$= 1000 \cdot NO_n \cdot V_{SP/n}$	$= (n_{NO/n}) / 2$	$= n_{O_2/n} - n_{O_2-SP/n}$	$= n_{O_2-ZB/n} \cdot M_{O_2}$	$= \sum_{ZH}^n NO + \Delta n_{NO/n}$

Obr. 20: Postup výpočtu navrženého výpočtového programu pro tvorbu NO ve válci motoru.

Obr. 21 a 22 ukazují průběhy produkce NO ve válci motoru z navrženého programu pro oblast hoření a následné expanze, resp. od začátku hoření směsi do DÚ. Stanovené hodnoty těchto průběhů jsou vypočteny pro zážehový spalovací motor, který spaluje stechiometrickou směs benzínu a vzduchu ($\lambda=1$) v režimu plného zatížení při otáčkách motoru 3000 1/min.



Obr. 21: Průběh křivky produkce NO ve válci motoru.



Obr. 22: Průběh sumární produkce NO ve válci motoru.

Výpočet koncentrace NO ve spalínách v [ppm]:

Uvedené výpočty se vztahují k zážehovému motoru, který spaluje stechiometrickou směs benzínu a vzduchu ($\lambda=1$) v režimu plného zatížení při otáčkách motoru 3000 1/min.

Počet celkového počtu molů NO ve válci motoru byl vypočten:

$$V_{NO} = 1,67 \times 10^{-6} \text{ mol}.$$

Molární hmotnost spalín je určena pomocí molární a měrné plynové konstanty:

$$\mathcal{M}_{SP} = \frac{R}{r_{SP}} = \frac{8314}{308} = 27 \text{ g/mol}.$$

Celkový počet molů spalín ve válci motoru bude:

$$V_{SP} = \frac{M_{NV}}{\mathcal{M}_{SP}} = \frac{0,47738}{27} = 0,0177 \text{ mol}.$$

Výsledná koncentrace NO ve spalínách vychází:

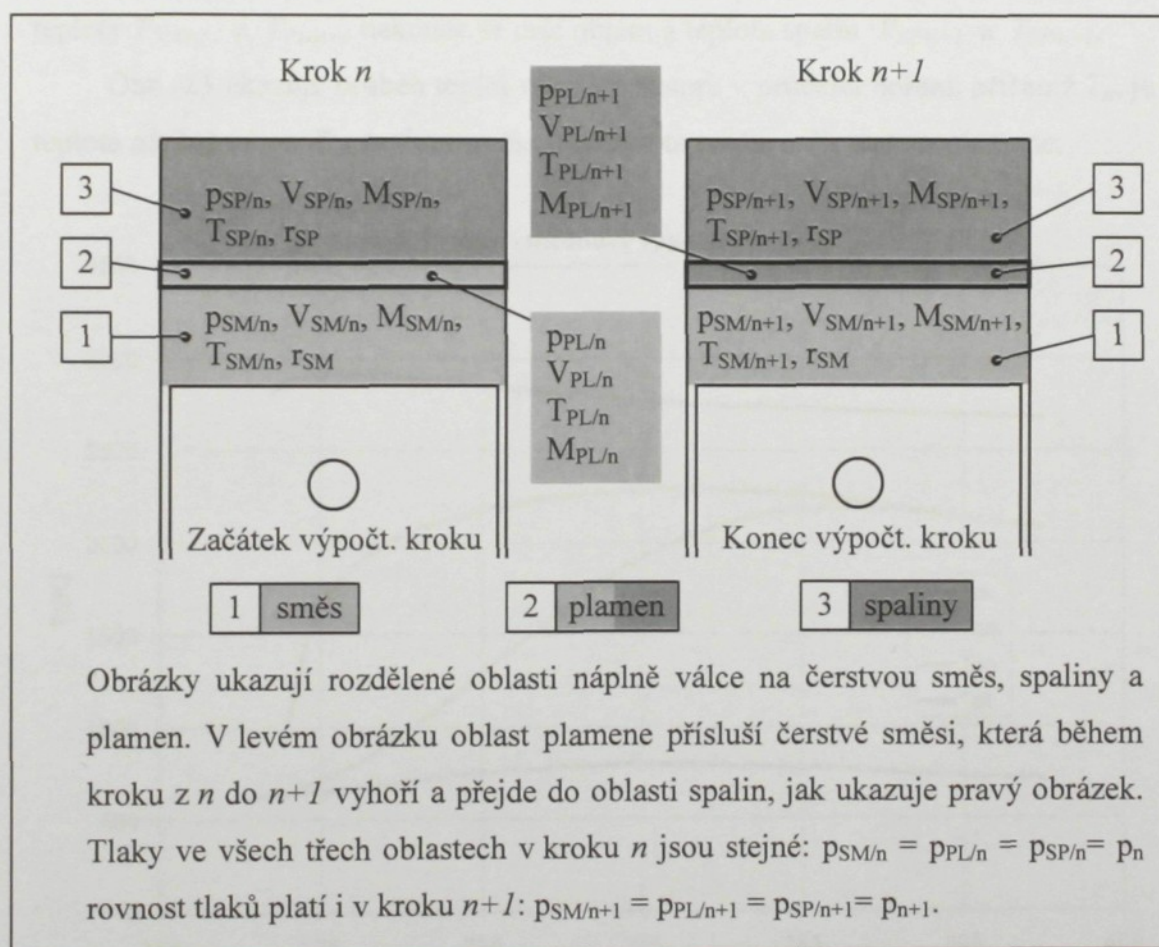
$$c_{NO} = \frac{V_{NO}}{V_{SP}} = \frac{1,67 \times 10^{-6}}{0,0177} \cdot 10^6 = 94,4 \text{ ppm}.$$

Celková produkce NO a potom i výsledná koncentrace NO ve výfukových plynech jsou výrazně nižší, než měřené hodnoty na motoru. Tím se ukázala nevěrohodnost tohoto výpočtového modelu pro výpočet produkce NO. Podrobnější analýzou celého výpočtového řešení byla příčinou takového výsledku určena vypočtená teplota spalín, která je proti teplotám ve spalovaných vrstvách s kalkulací látkových vlastností podle Shülleho vztahu nižší až o 400 K. Bylo proto nutné nalézt jiný přístup pro výpočet teplot v zóně hoření a pro tvorbu NO ve válci motoru.

5.1. Nově navržený výpočtový model pro tvorbu NO

Vzhledem k nízkým hodnotám produkce NO při použití dvouzónového modelu (kapitola 4.1) byla navržena další varianta výpočtu NO ve válci motoru, která předpokládá rozdělení náplně válce na tři oblasti: oblast směsi, spalín a plamene. Oblast plamene bude mít vyšší teplotu než v případě spalín v dvouzónovém modelu. Vyšší teplota má totiž pro tvorbu NO zásadní význam. Produkce NO se pak bude počítat jak v oblasti spalín, tak i v oblasti plamene. Výsledné koncentrace NO se na konci každého výpočtového kroku sečtou a budou tvořit celkovou koncentraci NO ve výfukových plynech.

Rozdělení náplně válce v průběhu vyhořívání směsi na tři oblasti (směsi, plamene, spalín) je provedeno podle následujícího grafického modelu:



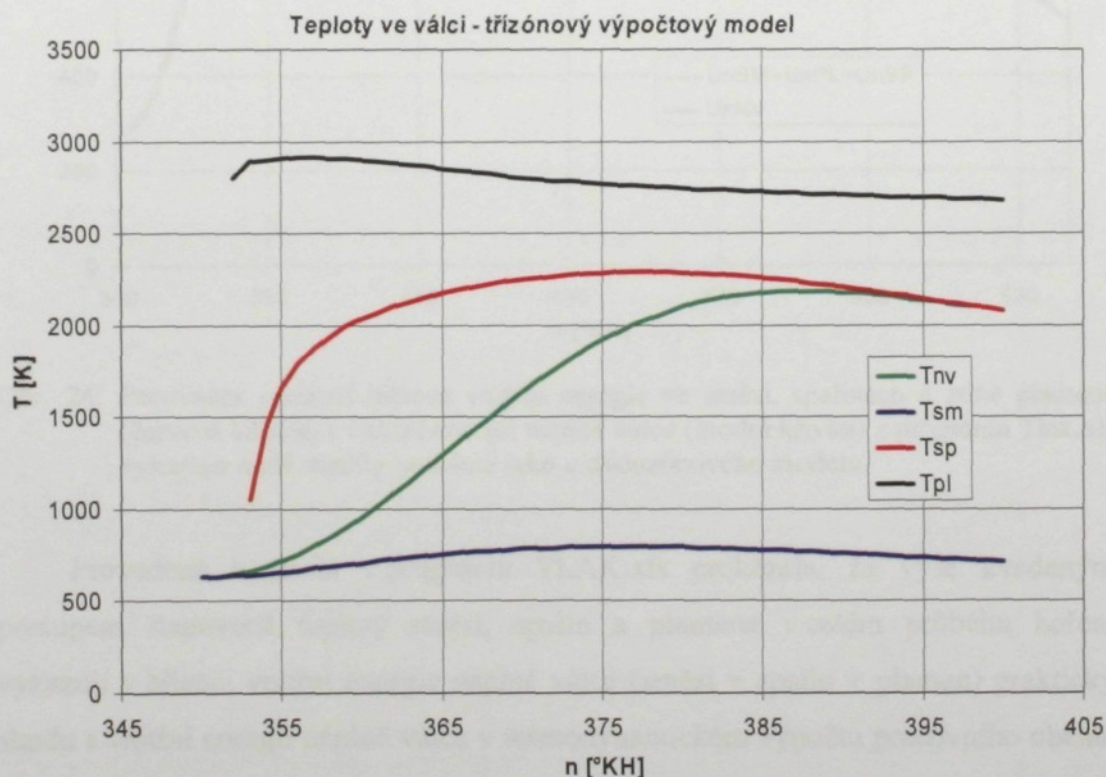
Stanovení jednotlivých veličin z tohoto grafického modelu bude probíhat podobným výpočtovým mechanismem jako je popsán v kapitole 4.1, doplněným o výpočet pro vrstvu zóny hoření, tj. oblast plamene.

Objemová změna v jednom výpočtovém kroku (z polohy n do polohy $n+1$), při které se tlak změní z p_n na p_{n+1} je řešena jako změna objemu $V_n = V_{SM/n} + V_{SP/n} + V_{PL/n}$ na objem $V_{n+1} = V_{SM/n+1} + V_{SP/n+1} + V_{PL/n+1}$, přičemž z objemu $V_{SM/n}$ se odečte objem $V_{PL/n}$. Objem $V_{SM/n}$ projde při změně tlaku z p_n na p_{n+1} adiabatickou změnou a v poloze $n+1$ bude nový objem směsi $V_{SM/n+1}$, objem $V_{PL/n}$ v intervalu z n do $n+1$ vyhoří a změna objemu na konečný objem $V_{PL/n+1}$ je řešena podle 1. zákona termodynamiky:

$$\Delta Q_{n+1} = M_{PL/n+1} \cdot (c_{v/SP/Tn+1} \cdot T_{PL/n+1} - c_{v/SM/Tn} \cdot T_{SM/Tn}) + \frac{p_n + p_{n+1}}{2} \cdot (V_{PL/n+1} - V_{PL/n}). \quad (78)$$

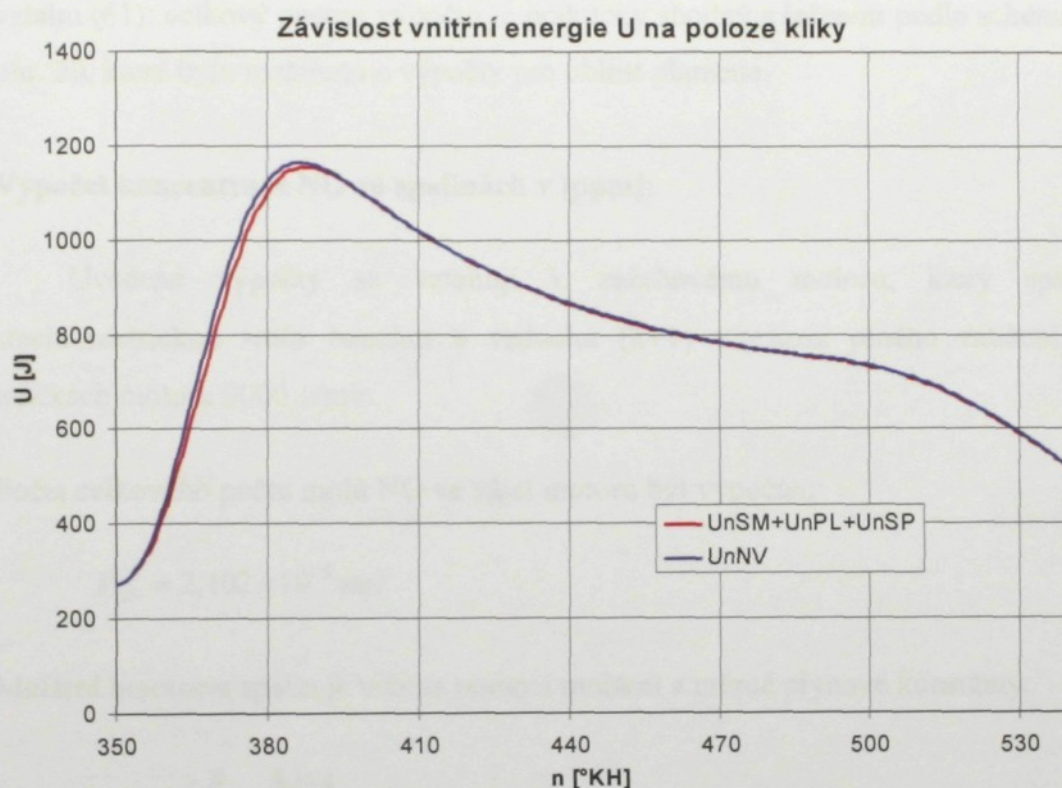
Při řešení se dále použijí stavové rovnice pro objemy $V_{SM/n+1}$ a $V_{PL/n+1}$ a teploty $T_{SM/n+1}$ a $T_{PL/n+1}$ nakonec se určí objem a teplota spalin $V_{SP/n+1}$ a $T_{SP/n+1}$.

Obr. 23 ukazuje průběh teplot ve válci motoru v průběhu hoření, přičemž T_{nv} je teplota náplně válce, T_{sm} teplota směsi, T_{sp} teplota spalin a T_{pl} teplota plamene.



Obr. 23: Průběh střední teploty T_{nv} (zelená křivka), teploty směsi T_{sm} (modrá křivka), teploty spalin T_{sp} (červená křivka) a teploty plamene T_{pl} (černá křivka) v závislosti na úhlu pootočení KH.

Rovněž v tomto případě je kritériem správnosti výsledku sumární bilance vnitřní energie. Součet vnitřních energií v jednotlivých zónách v každém výpočtovém kroku se musí rovnat vnitřní energii náplně válce v příslušném kroku, která je určena výpočtovým programem TLAK.xls (tj. vnitřní energii, určené střední teplotou náplně válce). Obr. 24 porovnává sumární bilanci vnitřní energie ve směsi, spalínách a v zóně plamene s vnitřní energií náplně válce.



Obr. 24: Porovnání sumární bilance vnitřní energie ve směsi, spalínách a zóně plamene (červená křivka) s vnitřní energií náplně válce (modrá křivka) z programu Tlak.xls vykazuje malé rozdíly podobně jako u dvouzónového modelu.

Provedená kontrola v programu TLAK.xls prokázala, že výše uvedeným postupem stanovené teploty směsi, spalín a plamene v celém průběhu hoření vykazují v bilanci vnitřní energie náplně válce (směsi + spalín + plamen) prakticky shodu s vnitřní energií náplně válce v termodynamickém výpočtu pracovního oběhu. To naznačuje, že modelový výpočet teploty směsi, teploty spalín a teploty plamene byl navržen správně a lze ho tedy dále využít pro kalkulaci produkce NO ve válci motoru.

5.2. Výpočet produkce NO s využitím nově navrženého modelu

K výpočtu produkce NO s použitím modelu, který předpokládá rozdělenou náplň válce na tři oblasti (směs, plamen a spaliny) je potřeba znát teplotu plamene i teplotu spalin, protože navržený výpočtový model uvažuje celkovou produkci NO jako součet jednotlivých produkcí NO z oblasti plamene i oblasti spalin. Výpočet produkcí NO v obou oblastech, tj. v zóně plamene a ve spalinách, probíhá podle vztahu (61): celkový postup výpočtu je prakticky shodný s řešením podle schéma na obr. 20, které bylo rozšířeno o výpočty pro oblast plamene.

Výpočet koncentrace NO ve spalinách v [ppm]:

Uvedené výpočty se vztahují k zážehovému motoru, který spaluje stechiometrickou směs benzínu a vzduchu ($\lambda=1$) v režimu plného zatížení při otáčkách motoru 3000 1/min.

Počet celkového počtu molů NO ve válci motoru byl vypočten:

$$V_{NO} = 2,402 \times 10^{-5} \text{ mol}.$$

Molární hmotnost spalin je určena pomocí molární a měrné plynové konstanty:

$$\mathcal{M}_{SP} = \frac{R}{r_{SP}} = \frac{8314}{308} = 27 \text{ g/mol}.$$

Celkový počet molů spalin ve válci motoru bude:

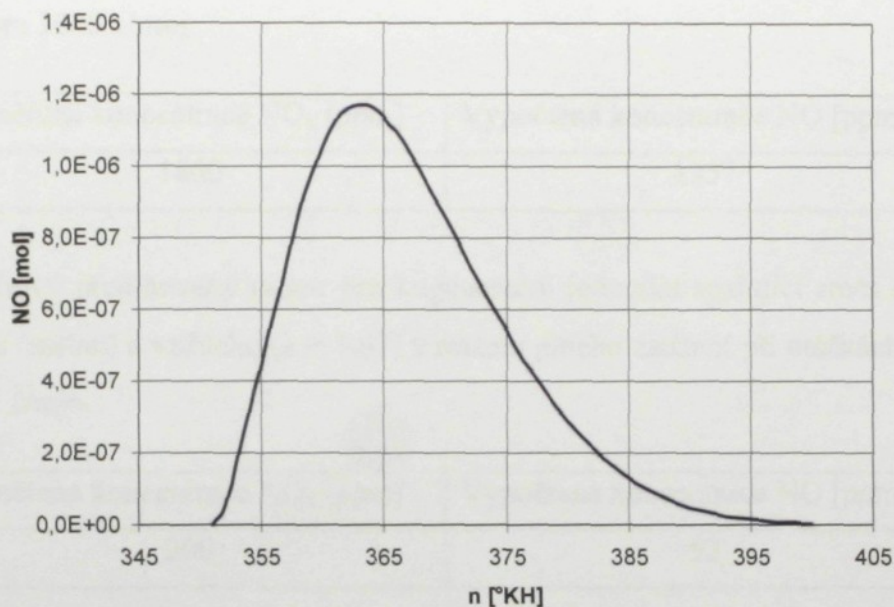
$$V_{SP} = \frac{M_{NV}}{\mathcal{M}_{SP}} = \frac{0,47738}{27} = 0,0177 \text{ mol}.$$

Výsledná koncentrace NO ve spalinách vychází:

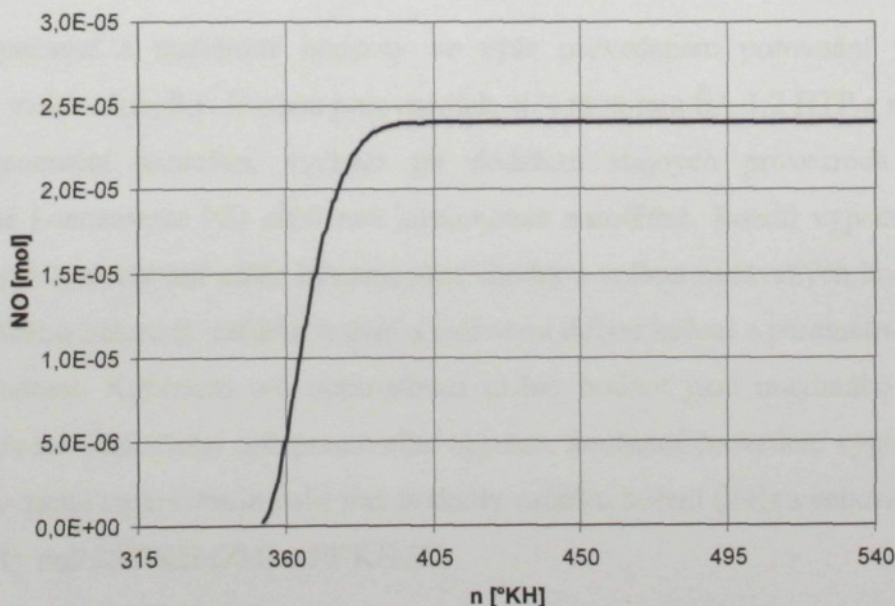
$$c_{NO} = \frac{V_{NO}}{V_{SP}} = \frac{2,402 \times 10^{-5}}{0,0177} \cdot 10^6 = 1357 \text{ ppm}.$$

Vypočtená výsledná koncentrace NO je již věrohodná. Proto lze navržený výpočtový program pro tvorbu NO ve válci motoru považovat za vhodný. Následným porovnáním výsledků produkce NO z navrženého programu s výsledky měření motorů lze posoudit přesnost tohoto výpočtového modelu.

Obr. 25 ukazuje průběh okamžité produkce NO ve válci motoru v zóně plamene po celou dobu hoření. Obr. 26 znázorňuje průběh sumární produkce NO ve válci motoru pro oblast hoření a následné expanze.



Obr. 25: Průběh křivky okamžité produkce NO ve válci motoru v oblasti zóny plamene v celém průběhu hoření.



Obr. 26: Průběh sumární produkce NO ve válci motoru.

5.3. Porovnání výsledků výpočtu s výsledky měření

Porovnání výsledku výpočtu koncentrace NO ve výfukových plynech bylo provedeno s výsledky měření výfukových škodlivin na následujících motorech:

- 1) Zážehový nepřepřlňovaný motor ŠA 1.2 HTP spalující stechiometrickou směs benzínu (BA95N) a vzduchu ($\lambda = 1$) v režimu plného zatížení při otáčkách motoru 3000 1/min.

Naměřená koncentrace NO _x [ppm]	Vypočtená koncentrace NO [ppm]
1800	1357

- 2) Zážehový přepřlňovaný motor pro kogenerační jednotku spalující směs zemního plynu (metan) a vzduchu ($\lambda = 1,67$) v režimu plného zatížení při otáčkách motoru 1500 1/min.

Naměřená koncentrace NO _x [ppm]	Vypočtená koncentrace NO [ppm]
200	52

Vypočtené a naměřené hodnoty ve výše provedeném porovnání vykazují poměrně velké odchylky. V obou porovnáních, tj. s motorem ŠA 1.2 HTP a motorem pro kogenerační jednotku, vychází při dodržení stejných provozních režimů vypočtené koncentrace NO nižší než koncentrace naměřené. Rozdíl vypočtených a naměřených koncentrací může být zmenšen vhodnou volbou zadávaných hodnot pro popis průběhu hoření tj. začátku hoření a celkovou dobou hoření a parametru Víbeho rovnice hoření. Kritériem pro optimalizaci těchto hodnot jsou maximální tlak ve válci a střední indikovaný tlak pracovního objemu. Současné provedení výpočtového programu zatím neumožňuje volit jiné hodnoty začátku hoření (ZH) a celkovou dobu hoření (H), než 350°KH (ZH) a 50°KH (H).

6. Popis programu Tlak-teplota (SM+SP+PL)-NO.xls

Výpočtový program je vytvořen v prostředí Microsoft Excel. Program Tlak.xls včetně doplněného programu Tlak-teplota (SM+SP+PL)-NO.xls, v němž je obsažen také podprogram k určení produkce NO ve válci motoru je přiložen k diplomové práci na CD.

Výpočtový program obsahuje komentáře k buňkám, které zvyšují orientaci v programu a zároveň podávají bližší informace o většině vstupních parametrů.

Do programu Tlak.xls byl vložen podprogram pro odvod tepla, který využívá velikosti součinitele přestupu tepla podle Bargendeho vztahu (25). Tento podprogram pracuje správně bez jakéhokoli omezení pro celý pracovní oběh motoru. Nyní program Tlak.xls nabízí uživateli volbu přestupu tepla podle Eichelberga, Woschniho a nově také podle Bargendeho. Pro aktivaci příslušného přestupu tepla je nutné aktivovat makro tlačítkem na listu „Zadání“.

Podprogram pro výpočet produkce NO není zatím uživatelsky variabilní, tzn. že se tento podprogram nepřizpůsobuje všem vstupním hodnotám zadávaných na listu „Zadání“. Vzhledem k pracnosti a časové náročnosti při hledání nového (vhodnějšího) a funkčního modelu pro výpočet produkce NO nebylo již možné z časového hlediska tento nedostatek programu odstranit. Navržený program byl proto ověřován s těmito vstupními parametry:

- Začátek hoření paliva: 350° pootočení klikového hřídele
- Délka hoření paliva: 50° pootočení klikového hřídele
- Součinitel přebytku vzduchu volit pouze větší než jedna ($\lambda > 1$)

Při dalších úpravách výpočtového programu bude proto nutné vytvořit jeho univerzálně využitelnou konečnou variantu.

Seznam hlavních a v rámci DP vytvořených listů a jejich stručný popis výpočtového programu Tlak-teplota (SM+SP+PL)-NO.xls:

- List „Zadání“: tabulka vstupních hodnot a volba variant výpočtu pomocí makra (nově obsahuje makro pro volbu přestupu tepla podle Bargendeho)
- List „xhoř“: graf podílu vyhořelé směsi v náplni válce stanoveného podle Víbeho zákona hoření.
- List „Tkap“: hodnoty z podprogramu pro výpočet látkových vlastností NV
- List „CYKL“: hodnoty z programu pro výpočet sledovaných veličin v jednotlivých krocích obou pracovních cyklů, výpočet kinematických veličin na pístu a silových poměrů na klikovém mechanismu
- List „Parametry“: tabulka vstupních hodnot a tabulka výsledků
- List „M1“: výpočtový program Tlak.xls
- List „M2“: výpočtový program Tlak-teplota.xls
- List „Bargende“: navržený výpočtový program pro výpočet dvouzónového modelu směs-spaliny podle Bargendeho vztahu pro přestup tepla
- List „NOx“: navržený výpočtový program ke stanovení produkce NO ve válci motoru a koncentrace NO ve výfukových plynech
- List „zóna_pl_a_sp“: navržený výpočtový program pro výpočet třízónového modelu směs-plamen-spaliny
- List „NOx_plamen“: navržený výpočtový program ke stanovení produkce NO v zóně plamene
- List „NOx_spaliny“: navržený výpočtový program ke stanovení produkce NO v zóně spaliny; obsahuje celkovou (sumární) produkci NO ve válci motoru
- List „Zeldovich“: výpočtový program k určení produkce NO ve válci motoru a koncentrace NO ve výfukových plynech s využitím teplotního rozvrstvení náplně válce podle programu Tlak-teplota.xls
- List „T-vrstev“: graf teplotního rozvrstvení náplně válce s průběhem střední teploty ve válci motoru
- List „Látkové množ NO“: graf průběhu látkového množství NO ve válci motoru z programu Zeldovich.xls
- List „Koncentrace NO“: graf průběhu koncentrace NO ve válci motoru z programu Zeldovich.xls

7. Závěr

Úkolem diplomové práce bylo doplnit stávající program Tlak.xls (vytvořen na KVM Technické univerzity v Liberci) dvouzónovým modelem směs-spaliny pro přestup tepla podle Bargendeho vztahu (25). Cílem práce také bylo navrhnout vhodný výpočtový model pro stanovení produkce oxidu dusnatého (NO) ve válci zážehového spalovacího motoru.

Navržený výpočtový program Tlak-teplota (SM+SP+PL)-NO.xls (přiložen k DP na CD) obsahuje v listu „Bargende“ výpočtový model, který uvažuje náplň válce (s látkovými vlastnostmi skutečného složení) v procesu hoření směsi jako objem rozdělený na dvě oblasti: oblast připravené čerstvé (homogenní) směsi a oblast spalin (vyhořelé směsi). V obou oblastech byly stanoveny teploty (teplota směsi a spalin), které využívá Bargendeho vztah k určení velikosti hodnot součinitele přestupu tepla, jež slouží k výpočtu odvedeného tepla z náplně válce do okolních stěn spalovacího prostoru motoru. Nyní program Tlak.xls nabízí uživateli výběr mezi součinitelem přestupu tepla podle Eichelberga, Woschniho a nově i dle Bargendeho.

Navržený výpočtový program Tlak-teplota (SM+SP+PL)-NO.xls dále obsahuje dva výpočtové modely pro kalkulaci produkce NO ve válci motoru, které využívají látkové vlastnosti skutečného složení náplně válce. První výpočtové řešení využívá dvouzónového modelu, který byl použit pro výpočet součinitele přestupu tepla podle Bargendeho: vzhledem k nízké produkci NO ve válci motoru se neosvědčil. Proto byl po delším hledání a ověřování navržen druhý výpočtový model pro výpočet produkce NO, který je podobný prvnímu výpočtovému modelu s tím rozdílem, že uvažuje kromě oblasti směsi a oblasti spalin také oblast zóny plamene, která má výrazně vyšší teplotu než oblast se spaliny. Mechanismus kalkulace produkce NO probíhá v třízónovém výpočtovém modelu tak, že celková produkce NO je tvořena jako součet jednotlivých produkcí NO z oblasti plamene i oblasti spalin. Třízónový model pro kalkulaci tvorby NO poskytuje věrohodnější výsledky než model dvouzónový. Při porovnávání vypočtených hodnot produkce NO s naměřenými hodnotami na motorech vykazuje zatím třízónový model poměrně velké odchylky vypočtené koncentrace NO od měření – výpočtový program má ale ještě možnosti další optimalizace. Přiložený upravený program Tlak-teplota (SM+SP+PL)-NO.xls proto není konečným řešením.

8. Literatura

- [1] BROŽ, M.: *Výpočtový model zónového vyhořívání směsi v zážehovém motoru*. Diplomová práce KSD-402, 64 str., Technická univerzita v Liberci, 2001.
- [2] ŠTECHR, V.: *Teoretický výpočet produkce NO_x při spalovacím procesu ve válci pístového motoru*. Diplomová práce KSD-450, 70 str., Technická univerzita v Liberci, 2003.
- [3] HEYWOOD, J. B.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, Inc., ISBN 0-07-028637-X, 1988.
- [4] SHER, E.: *Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines*. Pollutant Formation and Control. Academic Press, ISBN 0-12-639855-0, 1998.
- [5] BEROUN, S., ŠTECHR, V.: *Oxidy dusíku ve výfukových plynech PSM: mechanismus tvoření, výpočet*. Studijní pomůcka, 9 str., KVM FS, Technická univerzita v Liberci, 2005.
- [6] BEROUN, S.: *Výfukové škodliviny pístových spalovacích motorů*. Studijní texty k předmětu „Prostředky zvyšování parametrů PSM“, KSD FS, Technická univerzita v Liberci, 2002.
- [7] TWARDOWSKI, T.: *Abgasturboaufladung eines 3-Zylinder Ottomotors – Evaluierung der Leistungssteigerung und Bestimmung von Wandwärmeverlusten*. 3. Studienarbeit „Projektarbeit“. TU Freiberg, Škoda Auto a.s., 2002.
- [8] BEROUN, S.: *Termodynamika pístového spalovacího motoru*. Studijní texty k předmětu „Prostředky zvyšování parametrů PSM“, KSD FS, Technická univerzita v Liberci, 2002.
- [9] BLAŽEK, J., ZUHDI, S.: *Properties of chosen substance depending on temperature*. KSD FS, Technická univerzita v Liberci, 2001.
- [10] BEROUN, S.: *Spalovací proces v pístových spalovacích motorech – Víbeho zákon hoření*. Studijní texty k předmětu „Prostředky zvyšování parametrů PSM“, KSD FS, Technická univerzita v Liberci, 2005.
- [11] BEROUN, S.: *Výfukové emise pístových spalovacích motorů*. KSD FS, Technická univerzita v Liberci, 2005.
- [12] BEROUN, S.: *Výpočtový odhad teploty směsi, teploty spalin a lokální teploty plamene v náplni válce*. Pracovní materiál, KVM FS TU v Liberci, 2006-2007.