



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI A SPALOVACÍ CHARAKTERISTIKY PALIV

PHYSICAL PROPERTIES AND COMBUSTION CHARACTERISTIC OF FUELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RADEK NEJEZCHLEB

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VÍT KERMES, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Radek Nejezchleb

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Fyzikální vlastnosti a spalovací charakteristiky paliv

v anglickém jazyce:

Physical properties and combustion characteristic of fuels

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

- 1) Seznámení se s problematikou spalování plyných paliv a jejich termofyzikálními vlastnostmi
- 2) Tvorba SW pro výpočet spalování a mezí výbušnosti

Cíle bakalářské práce:

Tvorba otevřeného programu pro výpočet spalování plyných paliv a mezí výbušnosti jejich směsí. Vytvořený SW musí být otevřený pro vkládání dalších výpočtových modulů.

Seznam odborné literatury:

- 1) Šesták J., Transportní a termodynamická data, Skripta ČVUT, Praha 1981
- 2) Stehlík P., Termofyzikální vlastnosti, Nakladatelství VUT Brno, 1992
- 3) Babinec F., Aplikovaná fyzikální chemie, Nakladatelství VUT Brno, 1991, ISBN 80-214-0367-5

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vít Kermes, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 24.10.2008

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Předmětem této bakalářské práce je vytvoření otevřené výpočetní pomůcky pro stanovení základních vlastností plyných paliv a výpočet základních spalovacích charakteristik. Teoretická část práce se věnuje chemickým rovnicím při spalování, uvádí základní vztahy pro výpočet dějů v ideálních a nedokonalých plynech, uvádá výpočty výhřevnosti a mezí výbušnosti směsi plynů a výpočet Wobbeho indexu. Dále jsou uvedeny a popsány nejpoužívanější druhy plyných paliv. Další část práce je věnována oxidantu, především výpočtu složení vlhkého vzduchu a výpočtům při míchání vzduchu s čistým kyslíkem. V závěru teoretické části jsou uvedeny vztahy pro výpočet entalpií ideálních a nedokonalých plynů a výpočet adiabatické teploty spalin.

KLÍČOVÁ SLOVA

Spalování, plyné palivo, směsi plynů, výhřevnost, meze výbušnosti, Wobbeho index, suchý vzduch, vlhký vzduch, entalpie plynů

ABSTRACT

The subject of this bachelor's thesis is creating an open calculation tool for determination of elementary properties of gas fuels and calculation of basic combustion characteristics. The theoretical part is focused on chemical equations by combustion, basic equations for calculation of process in gases and calculation of heating value, explosive limits and Wobe index. The most used gas fuels are described furthermore. The next part of bachelor's thesis is focused on oxidant, especially on the calculation of composition of moist air and mixing of air and oxygen. Equations for the computing of enthalpy of gases and adiabatic heating temperature are noted at the end of the theoretical part.

KEY WORDS

Combustion, gas fuel, mixture of gases, heating value, explosion limits, Wobbe index, dry air, moist air, enthalpy of gases

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE

NEJEZCHLEB, R. *Fyzikální vlastnosti a spalovací charakteristiky paliv* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vít Kermes, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Fyzikální vlastnosti a spalovací charakteristiky paliv vypracoval samostatně, na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a s použitím odborné literatury.

V Brně dne 25.5.2009

.....
Radek Nejezchleb

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mi věnovali svůj čas a svými znalostmi a vědomostmi pomohli k vypracování této bakalářské práce, především vedoucímu práce Ing. Vítu Kermesovi, Ph.D. a dále také doc.Ing. Ladislavu Bébarovi, CSc.

OBSAH:

OBSAH:.....	1
1 ÚVOD.....	2
2 ROZBOR ZADÁNÍ.....	3
3 TEORIE.....	4
3.1 Spalování.....	4
3.1.1 Chemické reakce při spalování.....	4
3.2 Plyny a jejich vlastnosti.....	5
3.2.1 Základní dělení plynů.....	5
3.2.2 Ideální plyn.....	5
3.2.3 Směsi ideálních plynů.....	6
3.3 Palivo.....	7
3.3.1 Základní vlastnosti paliv.....	8
3.3.2 Druhy a dělení plynných paliv.....	9
3.3.3 Výhřevnost a spalné teplo plynných paliv.....	11
3.3.4 Meze výbušnosti plynných paliv.....	11
3.3.5 Wobbeho index.....	12
3.4 Okysličovadlo (vzduch).....	12
3.4.1 Složení suchého vzduchu.....	13
3.4.2 Složení vlhkého vzduchu.....	13
3.4.3 Potřeba okysličovadla, přebytek okysličovadla.....	15
3.5 Entalpie plynů.....	16
3.5.1 Adiabaická teplota plamene (spalin).....	18
4 TVORBA VÝPOČETNÍ POMŮCKY.....	20
4.1 Výběr vhodného prostředí.....	20
4.2 Jednotlivé části (listy) programu.....	20
4.2.1 Zadání a výsledky.....	20
4.2.2 Vlastnosti složek.....	22
4.2.3 Složení okysličovadla a paliva.....	22
4.2.4 Stechiometrické výpočty.....	23
4.2.5 Průtok okysličovadla a spalin.....	24
4.2.6 Výpočet výhřevnosti.....	25
4.2.7 Meze výbušnosti.....	26
4.2.8 Entalpie.....	26
4.3 Možnosti rozšíření programu.....	27
4.3.1 Přidání nových výpočetních celků.....	28
4.3.2 Rozšíření počtu složek.....	28
4.4 Analýza vypočtených výsledků.....	28
5 ZÁVĚR.....	29
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	30
7 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	32
8 SEZNAM PŘÍLOH.....	35

1 ÚVOD

S neustále se zvyšující životní úrovní se zvyšuje i spotřeba energií. Mezi základní zdroje primární energie v ČR patří uhlí, jaderné palivo, zemní plyn a obnovitelné zdroje energie, které jsou ale zatím v menšině (cca 4,5 %) [7]. Ačkoliv se v poslední době hodně mluví o orientaci na jadernou energetiku jako výrobu environmentálně poměrně šetrnou, zatím je situace taková, že většina energie je vyráběna spalováním [7]. Pro lokální výrobu tepla např. pro technologické procesy v chemickém průmyslu je velmi praktickým palivem zemní plyn, případně jiná dostupná plynná paliva a jejich směsi. Cena zemního plynu je sice vyšší než cena některých jiných paliv [21], ale po připojení plynovodu je tento zdroj kdykoliv k dispozici, odpadají nároky na dopravu a skladování a jeho spalování je vzhledem k emisím ekologičtější než spalování uhlí. Pokud je k dispozici hořlavý plyn z jiných částí technologie, může být i jeho cena velmi nízká. Další důležité výhody plynných paliv jsou jednoduchá regulace s velkým rozsahem, vysoká teplota plamene, a tedy dobré předávání tepla a absence tuhého zbytku po spalování.

Existuje celá řada společností z oblasti energetiky a procesního inženýrství zabývajících se výrobou projekcí a výzkumem hořáků na plynná paliva. I při řešení projektů, které se přímo nezabývají výrobou tepla nebo elektrické energie, je často potřeba dodávat do procesu teplo, a je tedy nutné vytvořit energetickou bilanci dané části. Plynných paliv však existuje celá řada, vzájemně se liší svým složením a vlastnostmi a pro dosažení větší přesnosti výpočtu je nutné stanovit vlastnosti paliva z jeho složení.

Protože v praxi je velmi nepraktické a zdlouhavé řešit tyto základní úlohy neustále znovu klasickým výpočtem, je vhodné vytvořit výpočetní pomůcku, která práci mnohonásobně urychlí a zefektivní.

2 ROZBOR ZADÁNÍ

Cílem bakalářské práce bylo sestavit výpočetní pomůcku (SW), která bude sloužit pro výpočet některých fyzikálně-chemických vlastností zadaného plynného paliva a pro stanovení základních hodnot spalovacího procesu.

Zadání mělo obsahovat:

- složení paliva v objemových procentech [% obj], kde se výsledné palivo může skládat až ze tří různých směsí plynů
- objemový průtok paliva [$\text{m}^3_{\text{N}}/\text{hod}$]
- vlastnosti spalovacího vzduchu (teplota [$^{\circ}\text{C}$], tlak [kPa], relativní vlhkost [%])
- poměrné dosycení okysličovadla kyslíkem [$\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N vzd}}$]
- přebytek okysličovadla

Požadovanými výsledky výpočtů bylo:

- výsledné složení paliva
- výhřevnost výsledného paliva
- meze výbušnosti výsledného paliva
- výsledný průtok paliva
- složení okysličovadla, průtok okysličovadla
- složení vlhkých spalin, průtok vlhkých spalin
- složení suchých spalin, průtok suchých spalin
- složení suchých spalin po přepočtu na 3 % kyslíku
- složení vlhkých spalin po přepočtu na 3 % kyslíku v suchých spalinách
- stechiometrický průtok okysličovadla vztažený na jednotku paliva
- reálný průtok okysličovadla vztažený na jednotku paliva
- průtok vlhkých spalin vztažený na jednotku paliva
- průtok suchých spalin vztažený na jednotku paliva
- entalpii paliva, okysličovadla a spalin za zadané teploty

Celá výpočetní pomůcka měla být jednoduchá, přehledná a zpracována v takovém prostředí, aby byla pro širokou uživatelskou základnu jednoduše editovatelná a bylo možné přidávat další složky paliva, případně další výpočetní moduly.

3 TEORIE

3.1 Spalování

Spalováním rozumíme rychlou exotermickou oxidaci paliva, přičemž cílem je uvolnění chemicky vázaného tepla a jeho následné využití [13] nebo chemická přeměna paliva na jiné, většinou jednodušší a ekologicky méně škodlivé prvky (spalování skládkového plynu) [9]. Spalování může být dokonalé nebo nedokonalé. Při dokonalém spalování jsou produkty spalování plyny, které nelze za běžných podmínek dále oxidovat tzn. CO_2 , H_2O a SO_2 . Při nedokonalém spalování zapříčiněným nedostatkem kyslíku k reakci (nedostatek vzduchu, špatné promíchání) nevznikají produkty konečné, ale meziprodukty (např. CO , C_xH_y), které lze při přivedení kyslíku oxidovat na konečné produkty, přičemž uvolněné teplo neodpovídá výhřevnosti paliva. Nedokonalé spalování je v technologiích spalování nežádoucí, a proto se práce dále bude zabývat výhradně spalováním dokonalým [8].

3.1.1 Chemické reakce při spalování

Chemické reakce se v technické praxi obvykle vyjadřují pomocí chemické rovnice reakce. Je to symbolický zápis, kterým se vyjadřují chemické děje. Skládá se z levé strany, kde jsou uvedeny reaktanty a pravé strany, kde jsou zapsány produkty. Ve spalovacím procesu jsou reaktanty hořlaviny obsažené v palivu a kyslík obsažený v oksyličovadle, případně v palivu. Produktem jsou spaliny. Chemické rovnice kvantifikujeme pomocí stechiometrických koeficientů na úrovni molekul, případně atomů. Musíme je stanovit tak, abychom dostali stejný počet atomů určitého prvku na straně reaktantů i na straně produktů [18].

Pomocí stechiometrických koeficientů můžeme určit, jaké množství reaktantu potřebujeme na vytvoření daného množství produktu nebo naopak.

Základními složkami ve spalovacích procesech jsou uhlík, vodík a jejich sloučeniny. Jsou obsaženy téměř ve všech druzích paliva a rovnice jejich reakce s kyslíkem jsou základními rovnicemi dokonalého spalování.



kde k, l, m, n, p, r jsou stechiometrické koeficienty

Pro spalování uhlovodíků, které jsou typickým příkladem plynného paliva (metan, propan, acetylén apod.) platí obecná rovnice udávající stechiometrické koeficienty ve tvaru:



$$\text{kde } m = x + \frac{y}{4}$$

3.2 Plyny a jejich vlastnosti

3.2.1 Základní dělení plynů

Plynné skupenství patří společně s kapalným do skupiny tekutin. Částice již nejsou drženy pohromadě žádnými silami, konají neuspořádaný pohyb a ovlivňují se pouze při vzájemných srážkách. Pro potřeby výpočtů se plynné látky dle [10] dělí na :

Ideální plyn - Za ideální plyn považujeme z fenomenologického hlediska takový plyn, který se přesně řídí vztahy po ideální plyn.

Nedokonalý plyn - Nedokonalý plyn se s dostatečnou přesností řídí vztahy pro ideální plyn, ale nemá konstantní fyzikální vlastnosti.

Reálný plyn (pára) - Reálný plyn se neřídí dostatečně přesně vztahy pro ideální plyn. Za reálné plyny jsou považovány hlavně páry (plyny ve stavu blízkém zkapalnění) a to především za vyšších teplot.

Výpočetní vztahy pro tyto skupiny vyplývají z kinetické teorie plynů, jejich přechod však není jednoznačně fyzikálně definovaný. Záleží především na přesnosti s jakou je potřeba daný problém řešit. Pro jednodušší výpočty základních dějů za běžných teplot a tlaků lze používat model ideálního, případně nedokonalého plynu s dostatečnou přesností.

Pokud jsou prováděny výpočty v oblasti blízké zkapalnění (nízké teploty, vysoký tlak), budou se odchylky od vztahů pro ideální plyn dále zvětšovat, až se stanou prakticky nepoužitelnými. Pro výpočty v oblastech reálných plynů (par) je již nutné používat složitější výpočetní vztahy, v praxi pak spíše parní tabulky nebo diagramy [10].

3.2.2 Ideální plyn

Základní rovnicí popisující chování ideálního plynu je stavová rovnice ideálního plynu. Rovnici vyjádřil na základě experimentů Clapeyron, 1834:

$$\frac{p \cdot v}{T} = konst. \quad (3)$$

Neznámá konstanta byla později nahrazena měrnou plynovou konstantou r , která je různá pro každý ideální plyn. Tvar stavové rovnice ideálního plynu je:

$$\frac{p \cdot v}{T} = r, \quad (4)$$

$$\text{kde } r = \frac{R_m}{M} \quad (5)$$

R_M je univerzální plynová konstanta, jejíž hodnota je pro všechny ideální plyny stejná [15] a má hodnotu:

$$R_m = 8,3143 \pm 0,0012 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Dále platí:

$$v = \frac{V}{m} \quad (6)$$

$$M = \frac{m}{n} \quad (7)$$

Lze vyjádřit další tvary stavové rovnice ideálního plynu:

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T \quad (8)$$

$$p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T \quad (9)$$

S použitím těchto rovnic je možné vždy vypočítat jednu stavovou veličinu (p , V , T), pokud jsou ostatní dvě známy. Prakticky bývají velmi často děje zjednodušené, tj. jedna ze stavových veličin zůstává konstantní. Rozlišovány jsou děje [10]:

- izobarické ($p = \text{konst.}$)
- izochorické ($V = \text{konst.}$)
- izotermické ($T = \text{konst.}$)

Dále je rozeznáván děj, kde součin $p \cdot V^n$ je konstantní:

- adiabatický (izoentropický) ($n = \kappa$)
- polytropický ($1 < n < \kappa$)

V těchto případech je pak situace jednodušší a při přechodu z jednoho stavu do jiného stačí znalost jedné z nekonstantních stavových veličin pro úplné určení stavu.

Pomocí stavové rovnice lze také jednoduše dokázat, že určitý objem jakéhokoli ideálního plynu obsahuje za daných podmínek vždy stejný počet částic, resp. určitý počet částic má za daných podmínek vždy stejný objem.

$$V = n \cdot R_m \cdot \frac{T}{p} \quad (10)$$

Pro vyjadřování molárního množství je obvyklé používat jednotku mol, resp. kmol. Za vztahné, tzv. normální podmínky bylo stanoveno $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($273,15 \text{ K}$) a 101325 Pa [1].

$$V = 1000 [\text{mol}] \cdot 8,3143 [\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \cdot \frac{273,15 [\text{K}]}{101325 [\text{Pa}]} \doteq 22,414 \text{ m}^3$$

3.2.3 Směsi ideálních plynů

V oblasti spalování plynných paliv se čisté plyny vyskytují pouze zřídka. Daleko častěji je třeba určovat vlastnosti směsi několika plynů o známém složení.

K vyjádření jejich složení jsou používány molární koncentrace, objemové koncentrace nebo hmotnostní koncentrace. Při počítání s chemickými rovnicemi kvantifikovanými stechiometrickými koeficienty se obvykle pracuje s molárními koncentracemi:

$$c_{ni} = \frac{n_i}{n} \quad (11)$$

Pro oblast výpočtů plyných paliv, kde je možné považovat jednotlivé složky za ideální (nedokonalé) plyny, je dle rovnice (10) možné zcela ekvivalentně používat také objemové koncentrace:

$$c_{ni} = \frac{n_i}{n} = \frac{V_i}{V} = c_{vi} \quad (12)$$

Pomocí známých hodnot fyzikálně-chemických vlastností jednotlivých plynů (složek) lze vypočítat tyto vlastnosti i pro jejich směs. Základní takovouto vlastností je molární hmotnost. U směsi plynů se nazývá střední zdánlivou molovou hmotností plynu a lze ji vypočítat dle vztahu [10]:

$$M_S = \sum_{i=1}^n M_i \cdot c_{vi} \quad (13)$$

Celkový tlak směsi plynů je roven součtu dílčích tlaků jednotlivých složek. Příspěvky jednotlivých složek se nazývají parciální tlaky složky. Tento vztah vyjadřuje Daltonův zákon [10]:

$$p = \sum_{i=1}^n p_i \quad (14)$$

Poměr parciálního tlaku složky k celkovému tlaku je zároveň dle [10] roven objemové, resp. molární koncentraci. Platí tedy:

$$c_{vi} = c_{ni} = \frac{p_i}{p} \quad (15)$$

3.3 Palivo

Obecně se jedná o chemickou látku nebo směs látek, které jsou schopné za vhodných podmínek hořet. Mají tedy chemicky vázanou energii, která se při hoření mění v teplo. Obecně paliva mohou obsahovat hořlavinu a balast (voda, popelovina, inertní plyny), přičemž požadujeme, aby palivo mělo obsah hořlaviny co největší [8]. Vlastnosti paliv závisí tedy nejen na vlastnostech látky, ze které se skládají, ale také na zastoupení v palivu. Od paliv požadujeme co největší výhřevnost, co nejlepší chování při spalování a co nejméně škodlivých emisí. Dále také požadujeme co nejnižší cenu při zachování zmíněných vlastností na přijatelné úrovni.

3.3.1 Základní vlastnosti paliv

Ve spalovacích procesech dle [8] rozeznáváme paliva:

- tuhá
- kapalná
- plynná

Tuhá paliva - nejrozšířenějším tuhým palivem je uhlí (hnědé, černé), dále do této kategorie patří také rašelina, biomasa, odpady, koks, brikety apod. Určujeme tyto základní vlastnosti:

- spalné teplo, výhřevnost
- hrubý rozbor – stanoví obsah vody, popeloviny a hořlaviny v palivu
- prvkový rozbor – stanoví poměrné obsahy prvků hořlaviny
- podíl prchavé hořlaviny
- měrná sirnatost
- melitelnost
- měrná hmotnost
- sypaná hmotnost
- bod vzplanutí
- zápalná teplota a další

Kapalná paliva - jsou nejčastěji kapalné frakce s bodem varu 60–350 °C vzniklé destilací ropy. Jsou děleny na:

- extralehké topné oleje (ELTO)
- lehké topné oleje (LTO)
- těžké topné oleje (TTO, mazut)

Mezi základní vlastnosti patří:

- spalné teplo, výhřevnost
- měrná hmotnost
- hrubý rozbor (obsah vody, popeloviny a hořlaviny v palivu – silně převládá hořlavina)
- prvkový rozbor (poměrné obsahy prvků hořlaviny)
- charakteristické teploty (tuhnutí, tečení, vzplanutí, hoření, samovznícení)
- kinematická viskozita – nejvyšší u TTO, nejnižší u ELTO (je silně závislá na teplotě, proto se používá přehřev paliva; pro čerpání je nutné dosáhnout 70–80 °E, pro rozprašování 2–4 °E)

Plynná paliva - pojem plynné palivo zahrnuje každý plyn, který obsahuje hořlavé složky a je využíván pro spalování. Základní hořlavé složky plynných paliv jsou CO, H₂ a plynné uhlovodíky. Mezi základní vlastnosti patří:

- spalné teplo, výhřevnost
- měrná hmotnost
- měrná tepelná kapacita
- meze výbušnosti plynu
- obsah nečistot v plynu
- vlhkost plynu
- hutnota plynu
- tlak plynu

- bod vzplanutí
- zápalná teplota

3.3.2 Druhy a dělení plynných paliv

Vzhledem k tomu, že bakalářská práce se zabývá spalováním plynných paliv, následující text již bude zaměřen pouze na ně.

Plynným palivem se rozumí směs hořlavých plynů (oxid uhelnatý, vodík, plynné uhlovodíky apod.), někdy i plynů inertních. Většinou jsou plynná paliva považována za nedokonalé plyny, proto nelze pokládat jejich fyzikální vlastnosti za konstantní. Ty jsou obecně závislé na teplotě a tlaku. Pokud se mluví o určitých hodnotách jejich fyzikálních vlastností (c_p , výhřevnost, viskozita), je nutné si uvědomit, že se jedná o hodnoty platné pouze pro daný stav (teplota, tlak). Obvykle se tyto hodnoty uvádějí za normálních podmínek ($101,325 \text{ kPa}$, $0 \text{ }^\circ\text{C}$) pokud není uvedeno jinak [8].

Plynná paliva bez ohledu na jejich původ a další vlastnosti dělíme do čtyř základních kategorií [8]:

- plyny nízko výhřevné ($LHV < 8,35 \text{ MJ/m}^3_N$)
- plyny středně výhřevné ($LHV = 8,35 - 12,5 \text{ MJ/m}^3_N$)
- plyny velmi výhřevné ($LHV = 12,5 - 21,5 \text{ MJ/m}^3_N$)
- plyny velmi vysoce výhřevné ($LHV > 21,5 \text{ MJ/m}^3_N$)

Dle [6], [8], [11] a [3] mezi nejčastěji používaná plynná paliva patří následující plyny uvedených vlastností:

Zemní plyn - je nejrozšířenějším plynným palivem u nás. Je fosilního původu a nachází se obvykle ve společném ložisku s ropou, někdy též s uhlím nebo samostatně. Jeho hlavní složkou je metan (CH_4), jehož objemová koncentrace bývá kolem 85–98 %. Složení se liší dle konkrétního ložiska.

Vodní plyn - je vyráběn procesem zplyňování koksu (Lowúv proces), rozkladem vodní páry na žhavém koksu na vodík a oxid uhelnatý. V případě, že se zvyšuje výhřevnost vodního plynu vstřikováním oleje dostáváme karbuovaný plyn.

Koksárenský plyn - vzniká v koksárenských pecích při výrobě koksu z černého uhlí. Hlavní složkou je vodík, ale konkrétní vlastnosti závisí hlavně na druhu použitého uhlí. Koksárenský plyn je nutné vyčistit a odsířit. Dříve se koksárenský plyn, používaný v plynárenských soustavách, nazýval svítiplyn.

Vysokopecní plyn - též nazývaný kychtový plyn, je vedlejším produktem při výrobě surového železa. Vzniká redukčním procesem ve vysokých pecích nedokonalým spálením koksu a uvolněním oxidu uhličitého z vápence, který je součástí vsázky.

Generátorový plyn - je to syntetický plyn používaný v průmyslu zejména tehdy, když nebyl k dispozici zemní plyn. Vyrábí se zplyňováním tříděného černého nebo hnědého uhlí směsí vzduchu a malého množství vodní páry. Stejně jako vysokopecní plyn je pro velký obsah oxidu uhelnatého prudce jedovatý.

Propan butan (PB, LPG) - plyn používaný především v dopravě a v domácnostech na vaření. Jedná se obvykle o směs zkapalněných rafinérských plynů s převahou propanu a butanu. Vyšší uhlovodíky jsou zastoupeny pouze v malém množství. Poměr propanu a butanu je v různých zemích a podle různého použití odlišný. Jeho výhodou je poměrně jednoduchá zkapalnitelnost a tím dosažena výrazná redukce objemu, což umožňuje skladování velkého množství plynu v malém objemu. To je výhodné především z hlediska transportu v cisternách a PB lahvích.

Spalitelné plynné odpady - jedná se především o vedlejší produkty z průmyslových technologií, zemědělství nebo také skládkový plyn. Jsou to většinou méně výhřevná paliva, jejichž cena je ale velmi nízká.

Bioplyn - dříve spíše odpadní plyn ze zemědělství. Dnes se záměrně vyrábí pro energetické využití biomasy v bioplynových stanicích anaerobní fermentací. Používá se nejčastěji k výrobě tepla nebo tepla a elektrické energie (kogenerace). Skládá se především z metanu (40–75 %) a oxidu uhličitého (25–55 %). Menší podíly pak zaujímá vodní pára, dusík, kyslík, vodík aj. Dosahuje výhřevnosti 21-24 MJ/m³_N.

Tab. 1. Přibližné složení vybraných druhů zemního plynu [6]

Složka	Tranzitní ZP [% obj]	Norský ZP [% obj]	Alžírský ZP [% obj]	Jihomoravský ZP [% obj]	Holandský ZP [% obj]
Metan CH ₄	98,39	85,80	86,90	97,70	81,31
Etan C ₂ H ₆	0,44	8,49	9,00	1,20	2,85
Propan C ₃ H ₈	0,16	2,30	2,60	0,50	0,37
Butan C ₄ H ₁₀	0,07	0,70	1,20	-	0,14
Pentan C ₅ H ₁₂	0,03	0,25	-	-	0,09
Dusík N ₂	0,84	0,96	0,30	0,60	14,35
Oxid uhličitý CO ₂	0,07	1,50	-	-	0,89

Tab. 2. Výhřevnost a přibližné složení vybraných plyných paliv [8],[3]

Plyn	Výhřevnost MJ/m ³ _N	CO ₂ % obj.	O ₂ % obj.	CH % obj.	CO % obj.	H ₂ % obj.	CH ₄ % obj.	N ₂ % obj.	Zbyt. % obj.
Vodní plyn	10,5	6,3	0,2	-	3,8	51	0,5	4	-
Koksárenský plyn	16,3	2,3	0,8	-	6,8	57,5	22,5	7,8	2,4
Vysokopecní plyn	3,9	10,5	-	-	28	2,7	0,3	58,3	-
Generátorový plyn	5,2	5,2	0,2	-	28,1	13,3	0,6	52,4	0,2
Bioplyn (ČOV)	21,1	38	-	-	-	1	61	-	-

3.3.3 Výhřevnost a spalné teplo plyných paliv

Spalné teplo (HHV) - je teplo uvolněné při dokonalém spálení 1 kg paliva s kyslíkem, jestliže spaliny jsou ochlazené na původní teplotu (paliva) a voda je ve spalinách ve skupenství kapalném [10].

Výhřevnost (LHV) - je teplo uvolněné při dokonalém spálení 1 kg paliva s kyslíkem, jestliže spaliny jsou ochlazené na původní teplotu (paliva) a voda je v plynném stavu. Odpovídá spalnému teplu zmenšenému o výparné teplo vody obsažené ve spalinách [10].

Ve spalovacích procesech je zpravidla kondenzace vodní páry ze spalin nežádoucí, protože způsobuje korozi zařízení. Proto využíváme hodnotu výhřevnosti a nikoliv spalného tepla.

Výjimku tvoří např. kondenzační kotle pro vytápění objektů, kde se spaliny ochlazují až na 40–90 °C a tedy pod rosný bod a tím se dosahuje vyšší účinnosti. Taková konstrukce je však složitější (spalinový ventilátor, komín dimenzovaný na vnitřní přetlak) a klade větší nároky na použitý materiál (korozivzdorné materiály) [19].

Výhřevnost paliv stanovujeme v MJ/kg. U plyných paliv je stanovována také v MJ/m³_N. Výhřevnost směsi plynů lze následně stanovit dle vztahu [10]:

$$LHV = \sum_{i=1}^n LHV_i \cdot c_{vi} \quad (16)$$

V kotlích a jiných spalovacích zařízeních nelze teplo uvolněné spálením paliva dokonale přeměnit na jinou energii. Výkon kotle je zmenšený o ztráty kotle (komínovou ztrátou, sáláním do okolí, na výhřevných plochách, chemickým nedopalem...)

3.3.4 Meze výbušnosti plyných paliv

Většina plyných hořlavých látek může při určité koncentraci ve směsi se vzduchem vytvořit nebezpečnou směs, která při dostatečné iniciační energii (zdroj zapálení) reaguje se vzdušným kyslíkem. Energie je uvolněna ve velmi krátkém časovém intervalu a nastává výbuch. Tento děj je také spojen s prudkým rozpínáním plynů vyvolávajícím tlakovou vlnu.

Tento děj však probíhá pouze v určitém rozmezí koncentrací, které je experimentálně zjištěno, a udává se jak pro směs se vzduchem, tak i (méně často) pro směs s kyslíkem. Spodní hranici nazýváme dolní mez výbušnosti. Např. pro metan je to cca 5 % obj. ve směsi se vzduchem. Pod touto hranicí nelze plyn zapálit (jedná se tedy zároveň o dolní mez zápalnosti), ale za bezpečnou koncentraci se obecně považuje koncentrace pod 50 % dolní meze výbušnosti. Horní hranici nazýváme horní mez výbušnosti (pro metan cca 15 % obj.) a nad touto hranicí směs sama nevybuchuje (nehoří), ale hoří pouze za přístupu vzduchu [20].

Výpočetní vztah pro meze výbušnosti směsi plynů udává norma ČSN 38 6405 Plynová zařízení, zásady provozu. Norma rozlišuje dva výpočetní vztahy – pro směs bez obsahu inertních plynů [5]:

$$L_{h(d)} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{C_{Vi}}{L_{h(d)i}}} \quad (17)$$

a vztah pro směs s obsahem inertních složek [5]:

$$L_{h(d)} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{C_{Vi}}{L_{h(d)i}} + \frac{in}{100}}, \quad (18)$$

kde in je celková koncentrace inertních složek ve směsi, C_{Vi} je koncentrace i -té složky, $L_{h(d)}$ je horní (dolní) mez výbušnosti směsi a $L_{h(d)i}$ je horní (dolní) mez výbušnosti i -té složky.

3.3.5 Wobbeho index

Existuje značné množství plynných paliv, složených z celé řady složek. Proto není možné při zkoušení hořáků vždy používat palivo se kterým bude hořák provozován, a vzhledem k počtu možných složek není ani možné vždy vytvořit zkušební palivo stejného složení. Nejlépe vybavené zkušebny hořáků mají k dispozici zemní plyn, propan, propylen, butan, vodík, dusík a oxid uhličitý. Většinou je však k dispozici složek ještě méně. Je však nutné použít takové zkušební palivo, jehož vlastnosti budou co nejvíce podobné plynu, se kterým bude hořák provozován, aby se parametry spalování se zkušebním palivem co nejvíce podobaly parametrům provozním, a výrobce hořáků tak mohl garantovat určité hodnoty [2].

Jako porovnávací kritérium slouží Wobbeho index:

$$Wb = \frac{HHV}{\sqrt{SG}}, \quad (19)$$

kde HHV je spalné teplo plynu a SG je poměrná hmotnost plynu definovaná jako:

$$SG = \frac{M}{M_{vzd}}, \quad (20)$$

kde M je molární hmotnost plynu a M_{vzd} je molární hmotnost vzduchu.

Pro co největší podobnost vlastností zkušebního paliva s provozním palivem je nutné, aby byl rozdíl mezi Wobbeho indexem zkušebního a provozního paliva co nejmenší [2].

3.4 Okysličovadlo (vzduch)

Nejčastěji používaným okysličovadlem je okolní vzduch obsahující cca 21 % kyslíku. Je vždy dobře dostupný a jeho cena nižší než při jakémkoliv jiném řešení. Pokud obsah kyslíku ve vzduchu není dostatečný, je možné pro spalovací proces použít

čistý kyslík (sklářský průmysl, svařování), který však cenu vyrobené energie výrazně zvýší, nebo využít okolní vzduch, ale míchat ho s čistým kyslíkem (dosytit kyslíkem). Tak můžeme i při nižších nákladech vyrobit okysličovač s vyšším obsahem kyslíku. Celkový průtok okysličovače do spalovacího procesu se tedy sníží, a tím se sníží i nároky na rozměry potrubí. Zároveň dosáhneme vyšší teploty plamene a tím selepší přestup tepla radiací [10].

3.4.1 Složení suchého vzduchu

Hlavní složky vzduchu jsou N_2 , O_2 , H_2O , Ar, CO_2 , H_2 , přičemž složení vzduchu se neustále mění. Největší změnu ve složení pak vytváří vodní pára. Proto byl zaveden pojem suchý vzduch, jehož složení dostaneme odstraněním vodní páry ze vzduchu. Jeho složení pak už zůstává relativně stálé. Uváděné složení suchého vzduchu se v různých zdrojích mírně liší. Mezinárodní organizace pro civilní letectví však zavedla model tzv. Mezinárodní standardní atmosféry (MSA), který je celosvětově rozšířený a používán nejen pro výpočty v letectví a raketové technice. Tento model uvádí následující složení suchého vzduchu :

Tab. 3. složení Mezinárodní atmosféry [14]

složka	N_2	O_2	Ar	CO_2	H_2
Molární koncentrace	0,7803	0,2099	0,0094	0,0003	0,0001

3.4.2 Složení vlhkého vzduchu

V přírodě se tedy vyskytuje vzduch, který se považuje za směs ideálních plynů (suchý vzduch) a vodní páry. Právě vodní pára se nejvíce ze všech složek blíží stavu nasycení, který také často nastává, voda v ovzduší kondenzuje a mění se její množství rozpuštěné ve vzduchu.

Při popisu konkrétního stavu, ve kterém se vlhký vzduch nachází, obvykle používáme tyto hodnoty:

- teplota vzduchu
- tlak vzduchu
- relativní vlhkost vzduchu

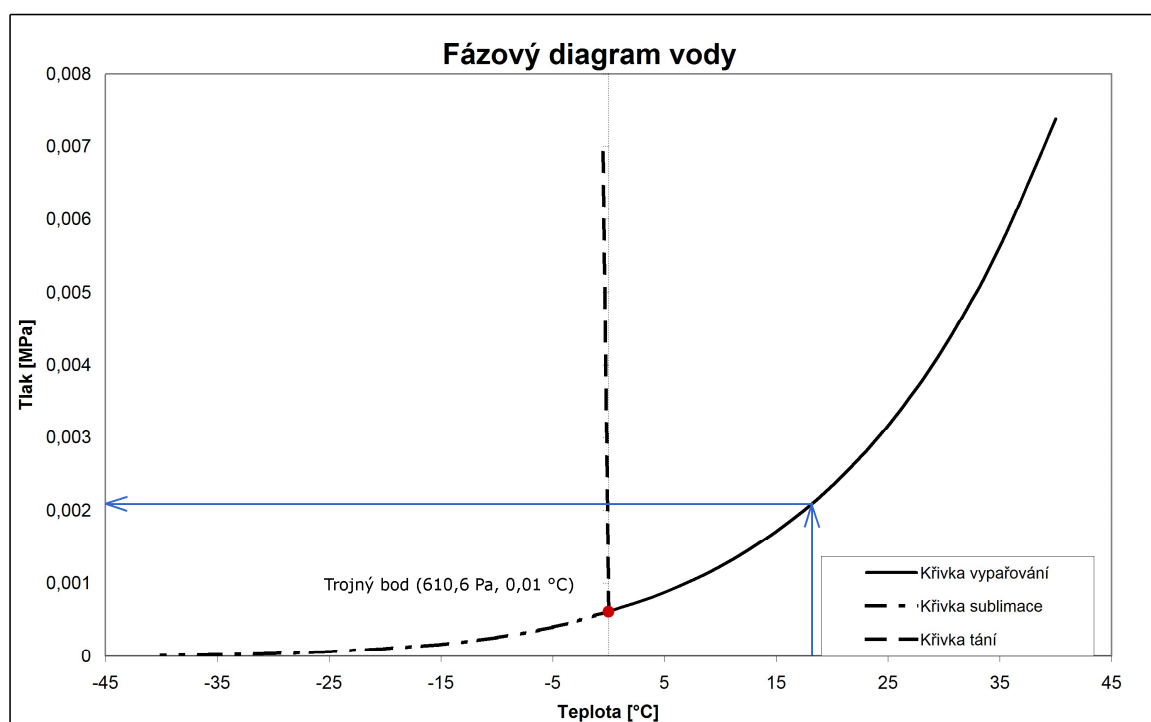
Relativní vlhkost se udává v procentech a vyjadřuje míru nasycení vzduchu vodní parou jako poměr parciálního tlaku syté vodní páry a parciálního tlaku za daných podmínek. Pokud je relativní vlhkost 100 %, do vzduchu už se nemůže za daných podmínek vypařit žádná voda. Množství vody, které je možné ve vzduchu rozpustit, však není konstantní. Závislost parciálního tlaku syté vodní páry na teplotě vyjadřuje Antoinetova rovnice, která má obecný tvar uvedený v [15]:

$$\log_{10} p'' = A - \frac{B}{C + t}, \quad (21)$$

kde p_0 je tlak par na mezi sytosti, A, B a C jsou experimentálně zjištěné koeficienty a t je teplota sytých par.

Rovnice v tomto tvaru platí pro jakoukoliv látku, pro kterou jsou tabelizovány hodnoty koeficientů. Koeficienty však platí vždy pouze pro konkrétní jednotky a určitý rozsah teplot. Musíme tedy vždy nejdříve rozhodnout, zda teplota, pro kterou chceme spočítat tlak nasycených par, leží v daném definičním oboru a pokud neleží, musíme použít koeficienty jiné.

Empirické vztahy pro výpočet tlaku na mezi sytosti také udávají některé normy. Např. ČSN 730540-3 Tepelná ochrana budov. Grafickým vyjádřením vztahu teploty a tlaku syté páry je křivka sytosti (též kondenzace nebo vypařování) ve fázovém diagramu vody:



Obr. 1 - Fázový diagram vody (výřez), sestaven z datových zdrojů dle [15]

Hodnoty křivky sytosti se používají k řadě technických výpočtů a jsou z toho důvodu také tabelovány [16]. Existuje i řada programů a výpočetních pomůcek na internetu, které tlak sytých par stanovují (např. [12], [17]).

Většinou jsou výpočty prováděny pro vzduch za atmosférického tlaku a běžných teplot, a proto parciální tlak vodní páry obsažené ve vzduchu je tak malý, že nevzniknou výraznější nepřesnosti, pokud je s ní počítáno dle stavové rovnice ideálního plynu. Pak tedy s využitím rovnice (15) platí, že objemová koncentrace vody je úměrná parciálnímu tlaku. Relativní vlhkost je pak definována jako poměr koncentrace syté vodní páry a vodní páry za daných podmínek:

$$\varphi = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}''} = \frac{p}{P_{H_2O}''} = \frac{c_{H_2O}}{c_{H_2O}''} \Rightarrow c_{H_2O} = \varphi \cdot c_{H_2O}'' = \varphi \cdot \frac{P_{H_2O}''}{p} \quad (22)$$

Pokud je známá koncentrace vodní páry, přepočtením složení vlhkého vzduchu je stanovena výsledná koncentrace jednotlivých složek ve vlhkém vzduchu:

$$c_i^{VZ} = c_i^{SV} \cdot (1 - c_{H_2O}^{VZ}) \quad (23)$$

3.4.3 Potřeba oksličovadla, přebytek oksličovadla

Jak již bylo uvedeno výše, ne vždy musí být oksličovadlem pouze vzduch. Může se jednat o čistý kyslík nebo směs kyslíku se vzduchem. Každopádně je vždy potřeba nejdříve spočítat, dle vztahů z části 3.4.2, celkové složení oksličovadla (objemové, molární), aby bylo možné stanovit jeho průtok do spalovacího procesu.

Ze stechiometrických koeficientů v chemických rovnicích spalování je možné vypočítat potřebu kyslíku pro dokonalé spálení:



Z rovnic spalování vyplývá, že pro spálení jednoho molu (kilomolu) uhlíku potřebujeme jeden mol (kilomol) kyslíku. Pro spálení jednoho molu (kilomolu) vodíku potřebujeme polovinu molu (kilomolu) kyslíku. Podobně můžeme sestavit rovnice a vyjádřit koeficienty pro jakokoliv hořlavou složku plynu.

V případě spalování plyných paliv je z hlediska dalších výpočtů vhodnější vyjadřovat potřebu kyslíku na jeden mol (kilomol) paliva, kdy koeficienty nejsou pouze celá čísla, jak je obvyklé u stechiometrických koeficientů, ale mohou být i 1/2, 1/3 apod. Chemické rovnice vyčíslené pro potřeby spalování plyných paliv jsou obsaženy v příl. 1.

Sečtením potřeb kyslíku pro oxidaci jednotlivých složek paliva je možné vypočítat celkovou potřebu kyslíku na jeden mol (kilomol) paliva. Z rovnice (12) vyplývá, že stejně lze pracovat také s objemovým vyjádřením:

$$\dot{n}_{O_2} = \sum_{i=1}^n c_{ni} \cdot S_{iO_2} \cdot \dot{n}^P, \quad (26)$$

kde \dot{n}_{O_2} je molový průtok kyslíku, c_{ni} je molová koncentrace složky, S_{iO_2} je koeficient matice stechiometrických koeficientů pro i-tý řádek a sloupec O_2 , \dot{n}^P je molový průtok paliva.

$$\dot{V}_{O_2} = \sum_{i=1}^n c_{vi} \cdot S_{iO_2} \cdot \dot{V}^P, \quad (27)$$

kde \dot{V}_{O_2} je objemový průtok kyslíku, c_{vi} je objemová koncentrace složky a \dot{V}^P je objemový průtok paliva.

Ze složení oksyličovadla lze vypočít celkovou potřebu oksyličovadla:

$$\dot{V}_{stech}^{OK} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{c_{O_2}^{OK}}, \quad (28)$$

kde \dot{V}_{stech}^{OK} je stechiometrická potřeba oksyličovadla a $c_{O_2}^{OK}$ je koncentrace kyslíku v oksyličovadle.

V praxi se nespaluje při přesném stechiometrickém množství, protože by vlivem nedokonalého promíchání paliva a jiných nedokonalostí mohlo dojít k nedokonalému spalování, což je nežádoucí. Spaluje se tedy s přebytkem oksyličovadla α , který udává násobek stechiometrické potřeby oksyličovadla:

$$\alpha = \frac{\dot{V}^{OK}}{\dot{V}_{stech}^{OK}} \Rightarrow \dot{V}^{OK} = \alpha \cdot \dot{V}_{stech}^{OK}, \quad (29)$$

kde α je přebytek oksyličovadla a \dot{V}^{OK} je skutečný průtok oksyličovadla.

Hodnota \dot{V}^{OK} tedy udává výsledný objemový průtok oksyličovadla (obvykle vzduchu) do spalovacího procesu. Udává se v m^3_N a proto pokud je potřeba hodnota skutečného objemového průtoku za daných podmínek, je nutné provést přepočít dle stavové rovnice.

3.5 Entalpie plynů

Entalpie je veličinou vyjadřující tepelnou energii uloženou v dané látce. Její jednotka je J/kg nebo kJ/kg . Je to veličina hojně využívaná v technologických výpočtech jak u tepelných (parních) turbín, tak v bilančních výpočtech v procesním inženýrství. Definičním vztahem pro výpočet entalpie je [1]:

$$di = c_p dT \quad (30)$$

Nelze tedy jednoduše stanovit absolutní hodnotu entalpie, ale pouze rozdíl entalpií. Stejně jako u jiných forem energie (potenciální, vnitřní) je pak nutné stanovit vztažný bod, kde bude entalpie považována za nulovou a od něhož je možné rozdíly počítat. Obvykle se za tento bod považuje $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($273,15 \text{ K}$). Při výpočtu entalpie je nutné rozlišit, zda pracujeme s ideálním plynem, který má konstantní hodnoty fyzikálních vlastností, nebo s nedokonalým plynem, kde jsou hodnoty fyzikálních vlastností závislé na teplotě.

Ideální plyny:

Platí že $c_p = \text{konst.}$, tedy:

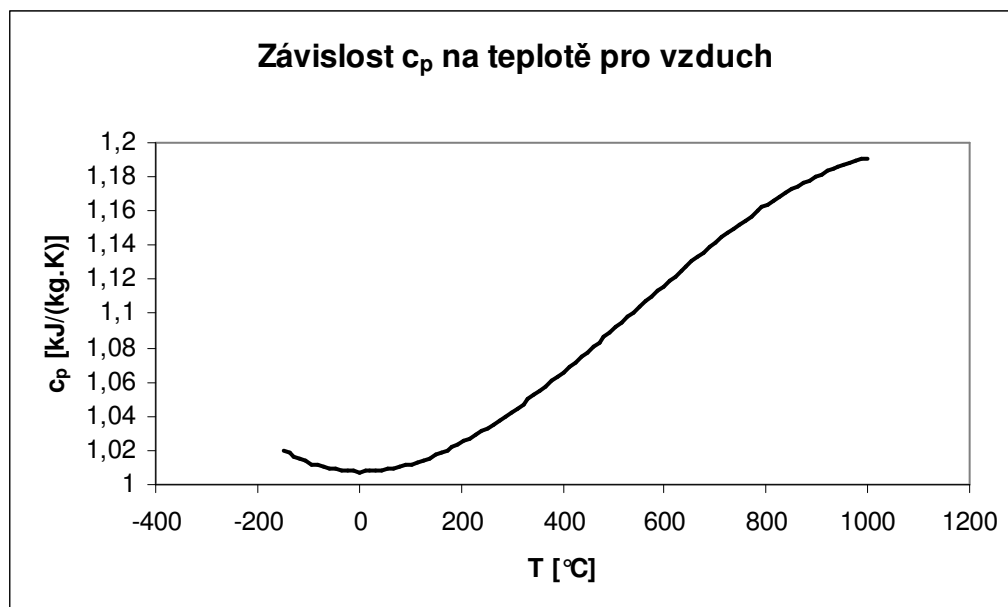
$$\int_{i_0}^i di = c_p \cdot \int_{T_0}^T dT$$
$$[i]_{i_0}^i = c_p [T]_{T_0}^T \quad (31)$$
$$i - i_0 = c_p (T - T_0)$$

Nedokonalé plyny:

Předpoklad, že $c_p = \text{konst.}$, může pro větší rozdíly teplot vnášet do výpočtu značnou nepřesnost, protože u nedokonalého plynu je c_p funkcí teploty. Experimentálně zjištěnou závislost c_p na teplotě pro vzduch vyjadřuje následující tabulka.

Tab.4. Závislost c_p na teplotě pro vzduch [15]

T [°C]	-150	-50	0	20	40	60	80	100	200
c_p [kJ/kg.K]	1,026	1,006	1,006	1,006	1,006	1,045	1,009	1,011	1,026
T [°C]	300	400	500	600	700	800	900	1000	
c_p [kJ/kg.K]	1,047	1,068	1,093	1,114	1,137	1,16	1,182	1,193	



Obr.2. Závislost c_p na teplotě z dat dle [15]

Pro stanovení závislosti c_p na teplotě se používá polynom, jehož tvary se v literatuře mírně liší. Konkrétnímu polynomu pak odpovídají číselné hodnoty koeficientů experimentálně stanovené pro určitý prvek nebo sloučeninu. Jeden z používaných tvarů polynomu je [14]:

$$c_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + \frac{E}{T^2}, \quad (33)$$

kde A, B, C, D, E jsou koef. pro danou složku, T [K], c_p [kJ.kmol⁻¹.K⁻¹].

Entalpii opět dostáváme integrací výrazu:

$$\begin{aligned} di &= c_p \cdot dT \\ \int_{i_0}^i di &= \int_{T_0}^T c_p \cdot dT \\ \int_{i_0}^i di &= \int_{T_0}^T \left(A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + \frac{E}{T^2} \right) \cdot dT \quad (34) \\ [i]_{i_0}^i &= \left[A \cdot T + \frac{B \cdot T^2}{2} + \frac{C \cdot T^3}{3} + \frac{D \cdot T^4}{4} + \frac{E \cdot T^{-1}}{-1} \right]_{T_0}^T \\ i - i_0 &= A \cdot (T - T_0) + \frac{B}{2} \cdot (T^2 - T_0^2) + \frac{C}{3} \cdot (T^3 - T_0^3) + \frac{D}{4} \cdot (T^4 - T_0^4) + \left(\frac{E}{T_0} - \frac{E}{T} \right) \end{aligned}$$

Zde je nutné dosazovat teplotu v Kelvinech. Obvykle považujeme $i_0 = 0$ kJ.kmol⁻¹ při $T_0 = 273,15$ K.

Entalpii směsi plynů je možné vypočítat dle vztahu:

$$i = \sum_{i=1}^n i_i \cdot c_{Vi} \quad (35)$$

3.5.1 Adiabaická teplota plamene (spalin)

Pro adiabatický spalovací proces, kde nejsou uvažovány žádné tepelné ztráty, je možné vytvořit jednoduchou energetickou bilanci.



Obr.3. Bilance teoretického spalování

Do procesu vstupuje palivo o určité entalpii (dané teplotou a složením paliva) a okysličovadlo o určité entalpii (dané teplotou a složením okysličovadla). Tyto dva proudy spolu reagují exotermickou reakcí za vzniku spalin. Tím se zvýší entalpie spalin o energii uvolněnou spálením paliva, kterou lze vypočítat z výhřevnosti paliva.

Nelze však přímo sčítat měrné entalpie i v $kJ/kmol$, protože molové (objemové) průtoky jednotlivých proudů nejsou stejné, a je tedy nutné ve výpočtu průtoky také zohlednit. Dále je také nutné uvážit, že molový (objemový) průtok spalin není roven součtu molových (objemových) průtoků paliva a okysličovadla (viz příl. 1). Je tedy nutné pracovat s entalpií I v kJ . Pro objemové vyjádření entalpie platí:

$$i = \frac{I}{V} \quad (36)$$

$$I = i \cdot V = i \cdot \dot{V} \cdot t_i, \quad (37)$$

jako vztažený čas můžeme brát např. 1 hodinu, pokud je průtok udáván m^3_N/hod .

Z uvedeného bilančního schématu je tedy možné sestavit bilanční rovnici ve tvaru:

$$\begin{aligned} i^{SP} \cdot \dot{V}^{SP} &= i^P \cdot \dot{V}^P + i^{OK} \cdot \dot{V}^{OK} + LHV^P \cdot \dot{V}^P \\ i^{SP} &= \frac{i^P \cdot \dot{V}_p + i^{OK} \cdot \dot{V}^{OK} + LHV^P \cdot \dot{V}^P}{\dot{V}^{SP}} \end{aligned} \quad (38)$$

Konkrétní hodnotě entalpie pak při daném složení odpovídá i konkrétní teplota. Tuto teplotu však není možné analyticky vyjádřit, a tak je nutné pomocí iterace rovnice (32) hledat teplotu, při které bude entalpie spalin odpovídat požadované hodnotě. Tuto teplotu pak nazýváme teoretická teplota hoření (spalin, plamene). Reálná teplota hoření pak bude vždy nižší z důvodu ztrát [1].

4 TVORBA VÝPOČETNÍ POMŮCKY

4.1 Výběr vhodného prostředí

Vzhledem k požadavku na jednoduchou uživatelskou editovatelnost vytvořeného SW a možnost přidávání nových výpočetních modulů bylo rozhodnuto použít tabulkový editor Microsoft Excel. Tento program je k dispozici většině uživatelů a umožňuje přehledné provedení všech požadovaných výpočtů.

Celý výpočet byl rozčleněn do několika částí (listů), přičemž pro použití programu stačí pracovat s jedním listem a ostatní slouží pro provádění mezivýpočtů a dílčích výsledků a je nutné s nimi pracovat pouze v případě potřeby úpravy výpočtů.

4.2 Jednotlivé části (listy) programu

4.2.1 Zadání a výsledky

List obsahuje veškeré hodnoty nutné pro výpočet spalování a vlastností paliva. Zároveň obsahuje i výsledky výpočtu, takže při práci s výpočetním SW si většinou vystačíme pouze s tímto listem.

V tab. 1.1.1 je možné vybrat až tři různé plyny, které budou tvořit palivo, a zadat jejich objemové průtoky a složení. Pro zadání složení jednotlivých plynů (plyn 1, plyn 2, plyn 3) je k dispozici 24 složek, u nichž je možné zadat jejich objemovou koncentraci. Průtok neoznačeného plynu je považován za nulový. U vybraného (zaškrtnutého) plynu je prováděna kontrola zadání složení dle vztahu:

$$\sum_{i=1}^{24} c_{vi} = 100\% \quad (39)$$

Do tab. 1.1.2 se zadává teplota, tlak a relativní vlhkost vzduchu v okolí. Pro případ dosycování okolního vzduchu kyslíkem je nutné zadat objem čistého kyslíku přimíchaného do jednoho m^3 vzduchu.

V tab. 1.1.3 se zadává skutečný přebytek okysličovadla (do složení okysličovadla je započítán i sytící kyslík, pokud je zadán).

Tab. 1.1.4 slouží pro zpětné určení přebytku okysličovadla (a tím i ostatních parametrů spalovacího procesu) ze známé koncentrace kyslíku v suchých spalinách, zjištěné např. při provozu analyzátozem spalin. Tabulka vyžaduje zadání koncentrace kyslíku v suchých spalinách. Stisknutím tlačítka „Vypočítat přebytek okysličovadla“ je spuštěno makro obsahující iterační výpočet, který pomocí nástroje „Hledání řešení“ nalezne hodnotu přebytku okysličovadla α právě takovou, aby výsledná koncentrace kyslíku v suchých spalinách odpovídala koncentraci zadané.

Tab. 1.2.1 uvádí výsledné složení paliva, se kterým je spalovací proces počítán. Složky použité v palivu jsou zvýrazněny pro jednodušší orientaci. Hodnoty jsou počítány na listu 3.

Tab. 1.2.2 uvádí výhřevnost výsledného paliva a výkon vzniklý spálením paliva o zadaném průtoku. Hodnoty jsou počítány na listu 6.

Tab. 1.2.3 uvádí horní a dolní mez výbušnosti výsledného paliva ve směsi se vzduchem při 20 °C. Hodnoty jsou počítány na listu 7.

Tab. 1.2.4 uvádí výsledné složení okysličovadla, se kterým je spalovací proces počítán. Hodnoty jsou počítány na listu 3.

Tab. 1.2.5 uvádí složení spalin. Reálné vlhké spaliny jsou spaliny vzniklé ideálním spálením paliva s okysličovadlem při zadaném přebytku vzduchu. Suché reálné spaliny vzniknou z vlhkých spalin po odstranění veškeré vodní páry. Jejich složení není závislé na vlhkosti okysličovadla (vzduchu), ale pouze na aktuálních parametrech spalovacího procesu.

K vzájemnému porovnávání spalovacích procesů se používají tzv. referenční suché spaliny, které obsahují 3 % kyslíku. Vzniknou spálením paliva s okysličovadlem po odečtení vodní páry, přičemž referenční přebytek okysličovadla α_{ref} je takový, aby v suchých spalinách byla právě 3 % kyslíku. Součástí tabulky je tedy i tlačítko „Přepočítat na 3 % O₂“. Jeho stisknutím se spustí makro obsahující iterační výpočet, který pomocí nástroje „Hledání řešení“ najde hodnotu α_{ref} právě takovou, aby koncentrace kyslíku v suchých spalinách byla 3%. Složení suchých referenčních spalin není závislé na vlhkosti okysličovadla ani na aktuálním přebytku okysličovadla, a proto umožňuje snadné srovnávání parametrů spalování různých paliv. Pro referenční suché spaliny jsou také předepisovány emisní limity.

Složení vlhkých referenčních spalin je stejné jako suchých referenčních spalin bez odečtení vodní páry. Výpočty složení spalin jsou provedeny na listu 5.

Tab. 1.2.6 uvádí průtoky jednotlivých proudů do/ze spalovacího procesu. Uvedeny jsou reálné průtoky:

- paliva ($\dot{V}^P = \dot{V}^{P1} + \dot{V}^{P2} + \dot{V}^{P3}$) (40)
- okysličovadla včetně α , výpočet je proveden na listu 5
- vlhkých reálných spalin, výpočet proveden na listu 5
- suchých reálných spalin, výpočet proveden na listu 5.

Pokud není směs paliv vytvořena ještě před vstupem do spalovací komory, výpočet není schopný zaručit skutečné spálení paliva.

Tabulka 1.2.6 také obsahuje měrné průtoky, které udávají tvorby (spotřeby) jednotlivých proudů na 1 m³_N paliva:

Okysličovadla včetně α - spočítá se jako poměr průtoku okysličovadla včetně započtení přebytku okysličovadla a průtoku paliva:

$$\left(\dot{v}^{OK} = \frac{\dot{V}^{OK}}{\dot{V}^P} \right) \quad (41)$$

Okysličovadla stechiometricky - poměr průtoku paliva bez přebytku okysličovadla ($\alpha=1$) a průtoku paliva:

$$\left(\dot{V}_{stech}^{OK} = \frac{\dot{V}^{OK}}{\alpha \cdot \dot{V}^P} \right) \quad (42)$$

Vlhkých spalin - poměr průtoku vlhkých spalin a průtoku paliva:

$$\left(\dot{V}^{VS} = \frac{\dot{V}^{VS}}{\dot{V}^P} \right) \quad (43)$$

Suchých spalin - poměr průtoku suchých spalin a průtoku paliva:

$$\left(\dot{V}^{SS} = \frac{\dot{V}^{SS}}{\dot{V}^P} \right) \quad (44)$$

Tab. 1.3 umožňuje zadat hodnoty pro výpočet entalpií provedené v listu 8. Lze zadat teplotu paliva, okysličovadla. V tabulce jsou zároveň zobrazeny výsledné entalpie. Obsahuje také tlačítko „Vypočítat teoretickou teplotu spalin“. Stisknutím tlačítka se spustí makro obsahující iterační výpočet, který pomocí nástroje „Hledání řešení“ najde hodnotu teploty spalin právě takovou, aby výsledná entalpie byla rovna entalpii teoretické, stanovené dle rovnice (38).

4.2.2 Vlastnosti složek

Tento list uvádí kompletní seznam všech složek použitých ve výpočtu a jejich molární hmotnost, výhřevnost, horní a dolní mez výbušnosti (viz příl. 2) a stechiometrické koeficienty vyplývající z rovnic spalování (viz příl. 1).

4.2.3 Složení okysličovadla a paliva

Tab. 3.1 uvádí složení suchého vzduchu dle mezinárodní standardní atmosféry bez vodíku. Hodnota koncentrace vodíku v suchém vzduchu (0,01 %) je tak malá, že může být bez výraznějšího vlivu na přesnost výpočtu zanedbána.

Tab. 3.2 zobrazuje hodnoty zadané na listu 1, které jsou důležité pro výpočet složení vlhkého vzduchu, a slouží pouze pro přehlednost.

Tab. 3.3 počítá tlak sytých vodních par za dané teploty dle Antoinetovy rovnice (21). Koeficienty A, B, C jsou čerpány z [1] a platí pro rozsah teplot 1–100 °C. Druhý řádek uvádí parciální tlak vodní páry obsažené ve vzduchu o relativní vlhkosti φ dle rovnice (22). Na třetím řádku je pak vypočtena koncentrace vodní páry v zadaném vlhkém vzduchu dle rovnice (15) přizpůsobené pro konkrétní případ:

$$c_{H_2O}^{VZ} = \frac{P_{H_2O}}{p^{VZ}} \quad (45)$$

Tab. 3.4 počítá výsledné složení vlhkého vzduchu, přičtením vodní páry ke složení suchého vzduchu. Koncentrace jednotlivých složek ve vlhkém vzduchu jsou vypočteny dle rovnice (23).

Tab. 3.5 počítá výsledné složení okysličovadla. V případě, že nebude použito dosycení okysličovadla čistým kyslíkem, bude složení okysličovadla rovno složení vlhkého vzduchu. V případě použití sytícího kyslíku se koncentrace jednotlivých složek se pak spočte dle vztahu:

$$c_i^{OK} = c_i^{VZ} \cdot \left(\frac{1}{1 + v_{O_2}^S} \right) \quad (46)$$

Pro koncentraci kyslíku v okysličovadle je vztah pozměněný přičtením sytícího kyslíku na tvar:

$$c_{O_2}^{OK} = (v_{O_2}^S + c_{O_2}^{VZ}) \cdot \left(\frac{1}{1 + v_{O_2}^S} \right) \quad (47)$$

Tab. 3.6 uvádí výsledné složení paliva. Koncentrace jednotlivých složek se vypočítají dle vztahu:

$$c_i^P = \frac{c_i^{P1} \cdot \dot{V}^{P1} + c_i^{P2} \cdot \dot{V}^{P2} + c_i^{P3} \cdot \dot{V}^{P3}}{\dot{V}^{P1} + \dot{V}^{P2} + \dot{V}^{P3}} \quad (48)$$

4.2.4 Stechiometrické výpočty

Tento list obsahuje matici koeficientů, které určují, jaké látkové množství jednotlivých složek spalin (CO_2 , H_2O , SO_2) vznikne spálením 1 kmol zadaného paliva, jaké látkové množství inertů (N_2 , Ar , CO_2 , SO_2) se do spalin dostane spálením 1 kmol zadaného paliva a jaké látkové množství kyslíku je potřeba pro spálení 1 kmol zadaného paliva. Množství vytvořených složek se počítá zvlášť pro každou ze 24 složek paliva a vychází z matice stechiometrických koeficientů (list 2) a ze složení výsledného paliva (list 3). Množství jednotlivých vytvořených složek se spočte:

$$n_{i,j} = S_{i,j} \cdot c_i^P, \quad (49)$$

kde i označuje řádek, j sloupec matice koeficientů.

Celkové měrné průtoky jednotlivých složek (na 1 kmol paliva) jsou spočítány sloupcovými sumami matice koeficientů:

$$n^m_j = \sum_{i=1}^n S_{i,j} \cdot c_i^P \quad (50)$$

4.2.5 Průtok okysličovadla a spalin

V tab. 5.1 je proveden výpočet spotřeby kyslíku. První řádek počítá skutečný molární průtok paliva dle vztahu:

$$\dot{n}^P = \frac{V^{P1} + V^{P2} + V^{P3}}{22,414} \quad (51)$$

kde 22,414 m³ je objem jednoho kilomolu ideálního plynu za normálních podmínek

Dále je vypočítána skutečná potřeba kyslíku dle vztahu:

$$\dot{n}_{O_2} = n^{m_{O_2}} \cdot \dot{n}^P \quad (52)$$

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{n}_{O_2} \cdot 22,414 \quad (53)$$

Pomocí složení okysličovadla (resp. koncentrace kyslíku v okysličovadle) je vypočteno stechiometrické množství okysličovadla:

$$\dot{V}_{stech}^{OK} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{c_{O_2}^{OK}} \quad (54)$$

Skutečné množství okysličovadla je vypočteno pomocí zadaného přebytku okysličovadla:

$$\dot{V}^{OK} = V_{stech}^{OK} \cdot \alpha \quad (55)$$

Stejně je vypočítáno referenční množství okysličovadla:

$$\dot{V}_{ref}^{OK} = V_{stech}^{OK} \cdot \alpha_{ref} \quad (56)$$

Tab. 5.2 uvádí složení a průtoky reálných spalin. Možné složky spalin jsou O₂, CO₂, H₂O, Ar, N₂, SO₂. Tyto prvky pochází jednak z paliva (produkty spalování + inerty) a jednak jsou vneseny z okysličovadla (vzduchu).

Složky vnesené z okysličovadla:

Průtok O₂ lze vypočítat z potřeby kyslíku přebytku okysličovadla:

$$\dot{n}_{1O_2}^{SP} = \dot{n}_{O_2} \cdot (1 - \alpha) \quad (57)$$

Ostatní složky se spalování neúčastní, a lze je tedy vypočítat z průtoku a složení okysličovadla.

$$\dot{n}_{1i}^{SP} = c_i^{OK} \cdot \frac{\dot{V}^{OK}}{22,414} \quad (58)$$

Složky vytvořené a vnesené z paliva:

Průtok O_2 z paliva do spalin je nulový. Pokud byl kyslík obsažen v palivu, byl využit pro spalování a snížil tak průtok okysličovadla.

Průtok ostatních složek lze vypočítat pomocí průtoku paliva a měrných průtoků složek z listu 4, dle vztahu:

$$\dot{n}_{2i}^{SP} = n_j^m \cdot \dot{n}^P \quad (59)$$

Celkový průtok jednotlivých složek lze spočítat součtem průtoků z okysličovadla a z paliva:

$$\dot{n}_i^{SP} = \dot{n}_{1i}^{SP} + \dot{n}_{2i}^{SP} \quad (60)$$

Celkový průtok spalin je roven součtu průtoků jednotlivých složek:

$$\dot{n}^{SP} = \sum_{i=1}^n \dot{n}_i^{SP} \quad (61)$$

Koncentrace jednotlivých složek spalin se spočtou dle vztahu:

$$c_i^{SP} = \frac{\dot{n}_i^{SP}}{\dot{n}^{SP}} \quad (62)$$

U suchých spalin je průtok vodní páry nulový. Průtoky ostatních složek zůstávají stejné. Průtok suchých spalin lze tedy vypočítat:

$$\dot{n}^{SS} = \dot{n}^{SP} - \dot{n}_{H_2O}^{SP}$$

Koncentrace jednotlivých složek suchých spalin se vypočtou podle vztahu:

$$c_i^{SS} = \frac{\dot{n}_i^{SS}}{\dot{n}^{SS}} \quad (63)$$

V tab. 5.3 je obsažen výpočet průtoků a složení referenčních spalin. Celý výpočet probíhá stejně jako u spalin reálných, pouze místo přebytku vzduchu α je dosazen přebytek vzduchu referenční α_{ref} a místo reálného průtoku okysličovadla \dot{V}^{OK} je ve výpočtu použit referenční průtok okysličovadla \dot{V}_{ref}^{OK} .

4.2.6 Výpočet výhřevnosti

V tab. 6.1 je realizován výpočet střední zdánlivé molové hmotnosti výsledného paliva a výpočet výhřevnosti výsledného paliva. Střední zdánlivá molová hmotnost se vypočte pomocí upravené rovnice (13):

$$M^P = \sum_{i=1}^{24} c_i^P \cdot M_i \quad (64)$$

Celková výhřevnost se pak vypočte dle vztahu:

$$LHV^P = \sum_{i=1}^{24} c_i^P \cdot LHV_i, \quad (65)$$

kde LHV_i jsou výhřevnosti jednotlivých složek v MJ/m^3_N uvedené na listu 2.

V tab. 6.2 je proveden výpočet spalovacího výkonu podle odvozeného vztahu:

$$P_s = \frac{Q}{t_t} = \frac{LHV^P \cdot V^P}{t_t} = LHV^P \cdot \dot{V}^P \quad (66)$$

4.2.7 Meze výbušnosti

Tab. 7 obsahuje výpočet mezí výbušnosti dle výpočetního vztahu z ČSN 38 6405, rovnice (18). Po přizpůsobení vztahu na možné složky paliva je tvar rovnic:

$$L_h^P = \frac{100}{\sum_{i=1}^{18} \frac{c_i^P}{L_{hi}} + \frac{c_{SO_2}^P + c_{N_2}^P + c_{Ar}^P + c_{CO_2}^P + c_{H_2O}^P + c_{O_2}^P}{100}} \quad (67)$$

$$L_d^P = \frac{100}{\sum_{i=1}^{18} \frac{c_i^P}{L_{di}} + \frac{c_{SO_2}^P + c_{N_2}^P + c_{Ar}^P + c_{CO_2}^P + c_{H_2O}^P + c_{O_2}^P}{100}} \quad (68)$$

Pro paliva s obsahem kyslíku bude výpočet dle ČSN 38 6405 vykazovat nepřesnosti, protože kyslík obsažený v palivu zvyšuje koncentraci kyslíku ve směsi vzduch-palivo, a tím snižuje meze výbušnosti.

4.2.8 Entalpie

Tento list umožňuje vypočítat entalpii výsledného paliva, oksličovadla a spalin za zadané teploty. Umožňuje také stanovit adiabatickou (teoretickou) teplotu spalin. S jednotlivými složkami je v programu počítáno jako s nedokonalým plynem, a celý výpočet se tedy řídí dle rovnice (34). Pro větší přehlednost je výpočet rozepsán do tabulek po jednotlivých krocích.

Tab. 8.1 slouží k zobrazení teplot zadaných na listu 1, tab. 1.3 a k zobrazení výsledných entalpií. Umožňuje také změnu referenční teploty, která je obvykle stanovena na $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($273,15 \text{ K}$).

Tab. 8.2 udává koeficienty A, B, C, D, E polynomu pro výpočet c_p jednotlivých složek. Data jsou čerpána z [14] a [4] jsou určena pro polynom:

$$c_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + \frac{E}{T^2} \quad (33)$$

Tab. 8.3 uvádí jednotlivé členy uvedeného polynomu po integraci (viz rovnice 34), dosažení teplot T_0 (zadané v tab 8.1) a teploty daného plynu (zadané v listu 1, tab. 1.3). Tabulka je členěna do tří oddílů. Oddíl 1 obsahuje složky paliva, oddíl 2 pouze složky obsažené v okysličovadle a oddíl 3 obsahuje pouze složky obsažené ve spalínách.

Tab. 8.4 uvádí výsledné entalpie jednotlivých složek jako součet členů polynomu (rovnice 34). Je opět dělena do tří oddílů (palivo, okysličovadlo, spaliny).

Tab. 8.5 zohledňuje koncentrace jednotlivých složek v palivu, okysličovadle a spalínách a počítá tak výslednou entalpii dle rovnice (35). Vypočítaná entalpie je v kJ/kmol a následně je přepočítána na kJ/m^3_N dle rovnice:

$$i = \frac{i_n}{22,414} \quad (69)$$

V tab. 8.5 jsou provedeny pomocné výpočty pro iterační výpočet adiabatické (teoretické) teploty spalín dle rovnice (38).

Entalpie složek vstupujících do spalovacího procesu se vypočte součtem entalpie paliva a okysličovadla:

$$\dot{I}_{vstup} = i^P \cdot \dot{V}^P + i^{OK} \cdot \dot{V}^{OK} \quad (70)$$

Produktem reakce paliva s okysličovadlem jsou spaliny. Jejich teplota je zvýšena teplem uvolněným při této reakci, které se vypočítá z výhřevnosti paliva:

$$\dot{Q} = \frac{LHV^P \cdot \dot{V}^P}{1000} \quad (71)$$

Adiabatická entalpie spalín je tedy rovna entalpii vstupní, zvýšené o teplo uvolněné spálením paliva. Této entalpii odpovídá určitá teplota spalín, kterou však není možné analyticky vyjádřit a je nutné spustit iterační výpočet (list 1), který spočítá teplotu spalín takovou, aby platilo:

$$i^{SP} = \frac{\dot{I}_{vstup} + \dot{Q}}{\dot{V}^{SP}} \quad (72)$$

4.3 Možnosti rozšíření programu

Jak bylo uvedeno výše, jedním z požadavků, kladených na vytvářený výpočtový SW, byla možnost úpravy a přizpůsobení výpočtů podle potřeb konkrétního uživatele. Lze předpokládat, že by mohla nastat potřeba přidávat nové výpočetní celky (směšování paliv, výkonové charakteristiky apod.) a také pracovat s plynnými palivy, které

obsahují jiné (další) složky. Pro jakoukoliv úpravu výpočtového SW je nutné odemknout měněné listy (Nástroje - Zámek), které jsou zabezpečeny, aby bylo zamezeno nechtěnému poškození SW.

4.3.1 Přidání nových výpočetních celků

Pro přidání nového výpočetního celku není nutné nijak zasahovat do dosavadního programu. Stačí přidat nový list, a na buňky s hodnotami, se kterými má program pracovat, je možné odkazovat se do původních listů. Z hlediska přesnosti a přehlednosti je vhodné se vždy odkazovat na buňku, ve které byla hodnota primárně spočítána, než na buňku, kam je převzata (typicky list 1).

4.3.2 Rozšíření počtu složek

Pokud je nutné do složení plynu zahrnout složku, kterou stávající seznam nezahrnuje (list 2) je možné dle rozsahu nutných změn postupovat podle těchto možností:

Přidání nejvíce tří složek

Pokud nelze žádnou ze stávajících složek přepsat (jsou pro výpočet potřebné), je možné program doplnit až o tři složky, které mohou vnést do spalin pouze CO₂, H₂O nebo SO₂. Přidání je nutné provést v tab. 1.1.1, tab. 1.2.1, tab. 2 včetně vlastností, tab. 3.6, tab. 4, tab. 6.1, tab. 7, list 8 dopsat názvy a v tab. 8.2 vyplnit odpovídající koeficienty pro daný polynom určující závislost c_p na teplotě.

Přidání více složek

Přidání více než tří složek nebo složky, která do spalin může vnést jiné prvky než výše popsané, je problémem vyžadující změnu struktury výpočtu, a je nutné se tedy blíže a podrobně seznámit s jednotlivými výpočty a celý výpočet přebudovat dle konkrétní potřeby. V zásadě se jedná o vložení řádků a následné rozšíření sum v tab. 1.1.1, tab. 1.2.1, tab. 2 včetně vlastností, tab. 3.6, tab. 4, tab. 6.1, tab. 7 a v tab. 8.2.

4.4 Analýza vypočtených výsledků

Správnost a dostatečná přesnost vypočtených výsledků závisí z velké části na přesnosti výchozích hodnot jednotlivých prvků (příl. 2). Pro vyhodnocení výsledků vypočtených pomocí vytvořené pomůcky *Burngas 2009* bylo tedy použito jiných, v praxi používaných výpočetních pomůcek (program *NRK.exe*, výpočtová pomůcka *Výpočty směsí plynů a mezi výbušnosti.xls* a další), do kterých byly vloženy stejné vstupní hodnoty. Kontrola se sestává ze tří modelových příkladů uvedených v příl. 3, příl. 4 a příl. 5.

Hodnoty vypočtené v příkladu 1 a 2 pomocí *Burngas 2009* se nijak zásadně neliší od hodnot vypočtených pomocí jiného SW. Drobné odchylky způsobují spíše rozdílné hodnoty vlastností jednotlivých prvků než výpočetní chyby. V programu *Burngas 2009* je v případě potřeby možné tyto hodnoty kdykoliv nahradit hodnotami přesnějšími. V příkladu 3 bylo možné porovnat pouze vlastnosti plynu, protože bylo využito syčení okysličovadla čistým kyslíkem, a toto není u uvedených kontrolních SW možné. Hodnoty vlastností paliva nevykazují zásadní odlišnosti od výsledků dosažených pomocí jiného SW.

5 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit výpočetní pomůcku (SW), která by umožnila výpočty vlastností plyných paliv a parametrů spalovacího procesu a tím zjednodušila práci při navrhování hořáků využívajících plyná paliva.

V teoretické části se bakalářská práce zabývá popisem základních vztahů a teoretických základů použitých při sestavování výpočetní pomůcky a také základními druhy a vlastnostmi pevných, kapalných a především plyných paliv. Pozornost je dále věnována vlastnostem a složení vzduchu, který je nejpoužívanějším oksličovadlem ve spalovacích procesech. Poslední kapitola teoretické části popisuje vztahy využité při výpočtu entalpie plynů a adiabatické teploty spalování.

V praktické části je pak podrobně popsána aplikace výpočetních vztahů popsaných v teoretické části při sestavování výpočetní pomůcky.

Stěžejní částí práce bylo vlastní vypracování výpočetní pomůcky *Burngas 2009*. Bylo dosaženo jednoduchého a přehledného vzhledu a jednoduché možnosti úpravy. SW umožňuje vypočítat všechny hodnoty požadované v zadání s dostatečnou přesností. Během zkoušení programu, zaměřeného na praktické využití SW, byl doplněn výpočet některých hodnot nad rámec zadání. SW umožňuje zpřesnění číselných hodnot vlastností jednotlivých prvků, přidání dalších prvků a také přidání dalších výpočetních modulů.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BABINEC František. *Aplikovaná fyzikální chemie*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1991. 200 s. ISBN 80-214-0367-5
- [2] BAUKAL Charles E. *Industrial burners handbook*. 1st. edition. USA: CRC Press LLC, 2004. 808 s. ISBN 0-8493-1386-4
- [3] BIOPROFIT. *Vlastnosti PB, Jak využít bioplyn?*. [on-line]. Publikováno: 2007. Čerpáno: 24.3.2009. Dostupné z: <http://www.bioplyn.cz>
- [4] c_p data sesbíraná a používaná na UPEI FSI VUT Brno.
- [5] ČSN 38 6405: *Plynová zařízení, zásady provozu*. Praha: Český normalizační institut, 1988. 32 s.
- [6] FÍK Josef. *Základní vlastnosti ZP I*. [on-line]. Publikováno: 6.4.2004. Čerpáno: 1.4.2009. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=1921>
- [7] MPO. *Primární energetické zdroje 1995 až 2008* [pdf on-line]. Publikováno: 13.3.2009. Čerpáno: 15.2.2009. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/dokument57026.html>
- [8] OCHRANA Ladislav. *Kotle a výměníky tepla*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 2004. 85 s. ISBN 80-214-2847-3
- [9] OMNIPOL A.S. *Technologie a zařízení pro likvidaci ekologických zátěží* [on-line]. Čerpáno: 10.4.2009. Dostupné z: <http://www.omnipol.cz/MAIN/CivTech.html#ekologie>
- [10] PAVELEK Milan. *Termomechanika*. 3. přepracované vyd. Brno: VUT Brno, 2003. 284 s. ISBN 80-214-2409-5
- [11] RWE. *Propan butan – LPG*. [on-line]. Čerpáno: 21.3.2009. Dostupné z: http://www.cng.cz/cs/zemni_plyn/alternativni_pohonne_hmoty/propan_butan_lpg.html
- [12] *Saturated Water Line - Steam Table*. [on-line]. Dostupné z: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-tables/saturated-water.asp>
- [13] *Spalování* [on-line]. Publikováno: 25.11.2008. Čerpáno: 5.1.2009. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Spalování>
- [14] STEHLÍK Petr. *Termofyzikální vlastnosti. Tepelné pochody: Teoretické základy oboru*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1992. 69 s. ISBN 80-214-0428-0
- [15] ŠESTÁK Jiří. *Tepelné pochody: transportní a termodynamická data*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. 245 s. ISBN 80-01-01795-8
- [16] ŠIFNER Oldřich. *Mezinárodní standardy termofyzikálních vlastností vody a vodní páry*. Praha: Academia, 1996. 174 s. ISBN 80-200-0596-X
- [17] U.S. SECRETARY OF COMMERCE. *NIST WebBook Chemie*. [on-line]. Dostupné z: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>
- [18] VACÍK Jiří a kol. *Přehled středoškolské chemie*. Praha: SPN, 1999. 368 s. ISBN 80-7235-108-7
- [19] VALENTA Vladimír. *Kondenzační kotel pro každého (I)*. [on-line]. Publikováno: 1.2.2002. Čerpáno: 15.4.2009. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=868&h=5&pl=39>
- [20] ZÁMOSTNÝ Petr. *Hořlavé a výbušné látky*. [prezentace]. Čerpáno: 10.3.2009. Dostupné z: www.vscht.cz/kot/resources/studijni-materialy/bchv-p-002/prezentace.ppt

[21] *Zemní plyn – nejvýhodnější palivo* [graf on-line]. Publikováno: 2008. Čerpáno: 15.2.2009. Dostupné z: <http://www.setrimenergii.cz/zemni-plyn---nejvyhodnejsi-palivo.html>

7 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

α	přebytek okysličovadla	[-]
α_{ref}	referenční přebytek okysličovadla	[-]
φ	relativní vlhkost	[%]
c	molární, objemová koncentrace	[-]
$c_{H_2O}^{VZ}$	koncentrace vodní páry ve vlhkém vz.	[-]
c_{H_2O}	koncentrace vodní páry	[-]
c_{H_2O}''	koncentrace syté vodní páry	[-]
$c_{O_i}^{OK}$	koncentrace i-té složky v okysličovadle	[-]
c_i^P	koncentrace i-té složky v palivu	[-]
c_i^{P1}	koncentrace i-té složky v plynu 1	[-]
c_i^{P2}	koncentrace i-té složky v plynu 2	[-]
c_i^{P3}	koncentrace i-té složky v plynu 3	[-]
c_i^{SS}	koncentrace i-té složky v suchých sp.	[-]
c_i^{SV}	koncentrace i-té složky v suchém vzd.	[-]
c_i^{VZ}	koncentrace i-té složky ve vlhkém vzd.	[-]
c_n	molární koncentrace	[-]
c_{ni}	molární koncentrace i-té složky	[-]
$c_{O_2}^{OK}$	koncentrace kyslíku v okysličovadle	[-]
$c_{O_2}^{VZ}$	koncentrace kyslíku ve vlhkém vzd.	[-]
c_p	měrná tepelná kapacita za konst. tlaku	[kJ.kmol ⁻¹ .K ⁻¹]
c_v	objemové koncentrace	[-]
c_{Vi}	objemová koncentrace i-té složky	[-]
HHV	spalné teplo	[MJ.m _N ⁻³]
I	entalpie	[kJ]
i	měrná entalpie	[kJ. m _N ⁻³]
i_i	měrná entalpie i-té složky	[kJ. m _N ⁻³]
in	celková koncentrace inertů v palivu	[% obj]
i_n	měrná entalpie	[kJ.kmol ⁻¹]
i^{OK}	měrná entalpie okysličovadla	[kJ. m _N ⁻³]
i^P	měrná entalpie paliva	[kJ. m _N ⁻³]
i^{SP}	měrná entalpie vlhkých spalin	[kJ. m _N ⁻³]

I_{vstup}	entalpie vstupující	[kJ]
L_d	dolní mez výbušnosti	[% obj]
L_{di}	dolní mez výbušnosti i-té složky	[% obj]
L_h	horní mez výbušnosti	[% obj]
L_{hi}	horní mez výbušnosti i-té složky	[% obj]
LHV	výhřevnost	[MJ.m _N ⁻³]
LHV_i	výhřevnost i-té složky	[MJ.m _N ⁻³]
LHV^P	výhřevnost paliva	[MJ.m _N ⁻³]
m	hmotnost	[kg]
M	molární hmotnost	[kg.kmol ⁻¹]
M_i	molární hmotnost i-té složky	[kg.kmol ⁻¹]
M^P	střední molová hmotnost paliva	[kg.kmol ⁻¹]
M_S	střední molová hmotnost směsi	[kg.kmol ⁻¹]
M_{vzd}	molární hmotnost vzduchu	[kg.kmol ⁻¹]
n	látkové množství	[mol]
\dot{n}_{O_2}	stechiometrická potřeba kyslíku	[kmol.hod ⁻¹]
$\dot{n}_{H_2O}^{SP}$	průtok vodní páry ve vlhkých spal.	[kmol.hod ⁻¹]
n_i	látkové množství i-té složky	[mol]
n_{ij}	množství složky j ze vytvořené ze složky i	[kmol.kmol ⁻¹]
\dot{n}_i^{SP}	průtok i-té složky ve vlhkých spalinách	[kmol.hod ⁻¹]
\dot{n}_i^{SS}	průtok i-té složky v suchých spal.	[kmol.hod ⁻¹]
n_j^m	množství složky j z paliva	[kmol.kmol ⁻¹]
$\dot{n}_{O_2}^{SP}$	průtok kyslíku ve vlhkých spalinách	[kmol.hod ⁻¹]
\dot{n}^P	molární průtok paliva	[kmol.hod ⁻¹]
\dot{n}^{SP}	průtok vlhkých spalin	[kmol.hod ⁻¹]
\dot{n}^{SS}	průtok suchých spalin	[kmol.hod ⁻¹]
p	celkový tlak	[Pa]
p''	tlak sytých par	[Pa]
p_{H_2O}	parciální tlak vodní páry	[Pa]
p''_{H_2O}	parciální tlak syté vodní páry	[Pa]
p_i	parciální tlak i-té složky	[Pa]
P_S	spalovací výkon	[MW]
p^{vz}	tlak okolního vzduchu	[Pa]

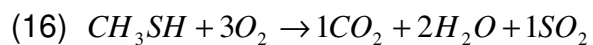
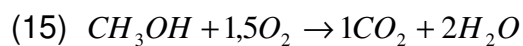
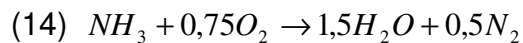
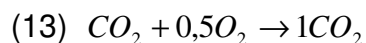
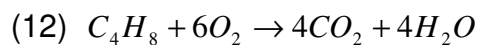
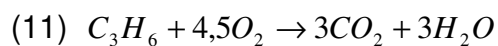
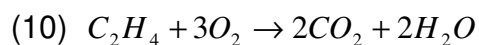
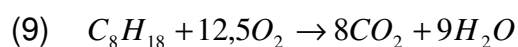
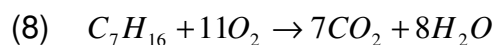
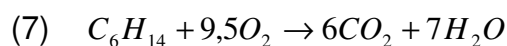
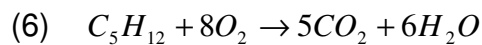
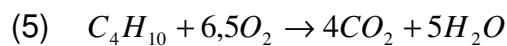
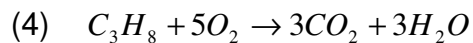
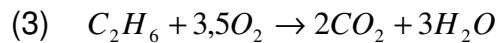
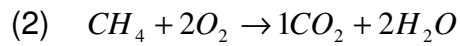
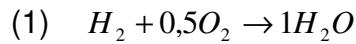
Q	teplo vzniklé hořením	[kJ]
Q_s	teplo vzniklé hořením	[MJ]
r	měrná plynová konstanta	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
R_m	universální plynová konstanta	[J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
S_{ij}	stech. koeficient řádek i, sloupec j	[-]
S_{i,O_2}	stech. koeficient spotřeby kyslíku i-té sl.	[-]
t	teplota	[°C]
T	teplota	[K]
t_i	čas	[hod]
v	měrný objem	[m ³ .kg ⁻¹]
V	objem	[m ³]
V_i	objem i-té složky	[m ³]
\dot{V}_{O_2}	stechiometrická potřeba kyslíku	[m _N ³ .hod ⁻¹]
$v_{O_2}^S$	poměrné dosycení kyslíkem	[m ³ .m ⁻³ _{vzd}]
v^{OK}	měrná potřeba okysličovadla	[m ³ .m ⁻³ _{pal}]
\dot{V}^{OK}	průtok okysličovadla	[m _N ³ .hod ⁻¹]
\dot{V}_{ref}^{OK}	referenční průtok okysličovadla	[m _N ³ .hod ⁻¹]
v_{stech}^{OK}	měrná stechiometrická potřeba oksy.	[m ³ .m ⁻³ _{pal}]
\dot{V}_{stech}^{OK}	stechiometrický průtok okysličovadla	[m _N ³ .hod ⁻¹]
\dot{V}^P	průtok paliva	[m _N ³ .hod ⁻¹]
\dot{V}^{P1}	průtok plynu 1	[m _N ³ .hod ⁻¹]
\dot{V}^{P2}	průtok plynu 2	[m _N ³ .hod ⁻¹]
\dot{V}^P	průtok plynu 3	[m _N ³ .hod ⁻¹]
v^{SP}	měrná tvorba vlhkých spalin	[m ³ .m ⁻³ _{pal}]
$\dot{V}^{P SP}$	průtok vlhkých spalin	[m _N ³ .hod ⁻¹]
v^{SS}	měrná tvorba suchých spalin	[m ³ .m ⁻³ _{pal}]
Wb	Wobeho index	[MJ.m _N ⁻³]

8 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1. - Chemické rovnice spalování složek vyčíslené pro potřeby spalování plyných paliv
- Příloha 2. - Vlastnosti složek a matice stechiometrických koeficientů
- Příloha 3. - Vzorový příklad 1, výsledky z Burgas 2009 a jiných SW
- Příloha 4. - Vzorový příklad 2, výsledky z Burgas 2009 a jiných SW
- Příloha 5. - Vzorový příklad 3, výsledky z Burgas 2009 a jiných SW
- Příloha 6. - Burgas 2009 v1.7.xls

PŘÍLOHA 1

Chemické rovnice spalování složek vyčíslené pro potřeby spalování plyných paliv



PŘÍLOHA 2

Vlastnosti složek a matice stechiometrických koeficientů

složka	MW kg/kmol	Výhřev- nost kJ/m ³ _N	Ld		Lh obj%	spotřeba O ₂ mol/mol	tvorba CO ₂ mol/mol	tvorba H ₂ O mol/mol	tvorba SO ₂ mol/mol	tvorba N ₂ mol/mol	tvorba Ar mol/mol
			obj. %	obj. %							
H ₂	2,01594	10757,56	4		74,2	0,5	0	1	0	0	0
CH ₄	16,04303	35781,47	5		15	2	1	2	0	0	0
C ₂ H ₆	30,07011	63686,68	3		12,5	3,5	2	3	0	0	0
C ₃ H ₈	44,09721	91175,56	2,12		9,35	5	3	4	0	0	0
n-C ₄ H ₁₀	58,1243	118584	1,8		9,1	6,5	4	5	0	0	0
i-C ₄ H ₁₀	58,12437	118278,6	1,8		8,4	6,5	4	5	0	0	0
C ₅ H ₁₂	72,15138	145957,4	1,3		7,5	8	5	6	0	0	0
C ₆ H ₁₄	86,17848	173458	1,2		7,5	9,5	6	7	0	0	0
C ₇ H ₁₆	100,2056	200796	1,1		6,7	11	7	8	0	0	0
C ₈ H ₁₈	114,2327	228216	0,95		6,5	12,5	8	9	0	0	0
C ₂ H ₄	28,05418	59021,43	2,75		28,6	3	2	2	0	0	0
C ₃ H ₆	42,08127	85943,55	2		11,1	4,5	3	3	0	0	0
C ₄ H ₈	56,10835	113427,9	2,5		7,1	6	4	4	0	0	0
CO	28,01054	12626,6	12,5		74	0,5	1	0	0	0	0
NH ₃	17,03061	14114,06	15		28	0,75	0	1,5	0	0,5	0
CH ₃ OH	32,04243	30136,1	6		34,7	1,5	1	2	0	0	0
CH ₃ SH	48,10703	37338,76	4,1		21	3	1	2	1	0	0
H ₂ S	34,07994	23123,76	4,3		46	1,5	0	1	1	0	0
SO ₂	64,06281	0	X		X	0	0	0	1	0	0
N ₂	28,0134	0	X		X	0	0	0	0	1	0
Ar	39,948	0	X		X	0	0	0	0	0	1
CO ₂	44,00995	0	X		X	0	1	0	0	0	0
H ₂ O	18,01534	0	X		X	0	0	1	0	0	0
O ₂	31,99879	0	X		X	-1	0	0	0	0	0

PŘÍLOHA 3

Vzorový příklad 1 – Zemní plyn, výsledky z Burngas 2009 a jiných SW

1.1 Zadávací parametry

1.1.1 Zadání paliva

Plyn 1 obj. průtok: m³_N/hod
 Plyn 2 m³_N/hod
 Plyn 3 m³_N/hod

PRAVDA NEPRAVDA NEPRAVDA

Palivo 1

složka	%obj	%obj	%obj
H ₂			
CH ₄	85,8		
C ₂ H ₆	8,49		
C ₃ H ₈	2,3		
n-C ₄ H ₁₀	0,7		
i-C ₄ H ₁₀			
C ₅ H ₁₂	0,25		
C ₆ H ₁₄			
C ₇ H ₁₆			
C ₈ H ₁₈			
C ₂ H ₄			
C ₃ H ₆			
C ₄ H ₈			
CO			
NH ₃			
CH ₃ OH			
CH ₃ SH			
H ₂ S			
SO ₂			
N ₂	0,96		
Ar			
CO ₂	1,5		
H ₂ O			
O ₂			

1.1.2 Parametry okolního vzduchu

Teplota vzduchu	<input type="text" value="20"/>	°C
Tlak vzduchu	<input type="text" value="103"/>	kPa
Relativní vlhkost vzduchu	<input type="text" value="50"/>	%
Dosycení kyslíkem	<input type="text" value="0"/>	m ³ _N /m ³ _{Nvzd}

1.1.3 Přebytek oksyličovadla

α

1.1.4 Výpočet α z kyslíku ve spalínách

Konc kyslíku v such. spal. %

Rozdíl

Vypočítat přebytek oksyličovadla

1.3 Entalpie

Zadejte teplotu, pro kterou má být spočítána entalpie

	teplota °C	entalpie [kJ/m ³ _N]
Teplota paliva	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="35,92"/>
Teplota oksyličovadla	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="25,93"/>
Teplota spalín	<input type="text" value="1840"/>	<input type="text" value="3003,00"/>

Vypočítat teoretickou teplotu spalín

* adiabatická teplota spalín při zadaném přebytku vzduchu

teoret. Entalpie spalín

59626042

rozdíl

5,21541E-07

1.2 Výsledky výpočtu

1.2.1 Výsledné složení paliva

složka	% obj
H ₂	0,00
CH ₄	85,80
C ₂ H ₆	8,49
C ₃ H ₈	2,30
n-C ₄ H ₁₀	0,70
i-C ₄ H ₁₀	0,00
C ₅ H ₁₂	0,25
C ₆ H ₁₄	0,00
C ₇ H ₁₆	0,00
C ₈ H ₁₈	0,00
C ₂ H ₄	0,00
C ₃ H ₆	0,00
C ₄ H ₈	0,00
CO	0,00
NH ₃	0,00
CH ₃ OH	0,00
CH ₃ SH	0,00
H ₂ S	0,00
SO ₂	0,00
N ₂	0,96
Ar	0,00
CO ₂	1,50
H ₂ O	0,00
O ₂	0,00

1.2.2 Výhřevnost, výkon

Výhřevnost paliva	39,40 MJ/m ³ _N
	46,85 MJ/kg
Spalovací výkon	16,41647 MW

1.2.3 Meze výbušnosti paliva

Dolní (L _d)	4,61 % obj
Horní (L _h)	14,75 % obj

Jedná se o obj.% ve směsi se vzduchem

1.2.4 Složení oksyličovadla

složka	% obj
N ₂	77,16
O ₂	20,75
Ar	0,93
CO ₂	0,03
H ₂ O	1,13

1.2.5 Složení spalin

Reálné			Referenční		$\alpha_{ref} =$
složka	vlhké %obj	suché %obj	vlhké %obj	suché %obj	1,150305
O ₂	2,49	2,99	22,07	3,00	O ₂
CO ₂	8,73	10,52	0,24	10,52	CO ₂
H ₂ O	17,00	0,00	9,20	0,00	H ₂ O
Ar	0,85	1,03	7,56	1,03	Ar
N ₂	70,93	85,46	627,85	85,45	N ₂
SO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	SO ₂

Přepočítat na 3% O₂

1.2.6 Průtoky

	Reálné m ³ _N /hod	Měrné * m ³ _N /m ³ _{Npal}
Paliva	1500	-
Okysličovadla (včetně α)	18234,05	12,16
Okysličovadlo (stechiometricky)	-	10,57
Vlhkých spalin	19855,48	13,24
Suchých spalin	16480,23	10,99

* vztaženo na m³_N paliva

Příklad 1, výsledky z jiných výpočetních SW:

Palivo:

- Výhřevnost paliva: 39,399 MJ/m³_N (36,850 MJ/kg)
- Dolní mez výbušnosti paliva: 3,887 % *
- Horní mez výbušnosti paliva: 16,257 % *

Okysličovadlo:

- N₂ 77,145 %
- O₂ 20,752 %
- Ar 0,939 %
- CO₂ 0,030 %
- H₂O 1,134 %

Složení vlhkých spalin:

- O₂ 2,515 %
- CO₂ 8,372 %
- H₂O 17,002 %
- Ar 0,863 %
- N₂ 70,918 %
- SO₂ 0 %

Složení suchých spalin:

- O₂ 2,295 %
- CO₂ 10,521 %
- H₂O 0 %
- Ar 1,039 %
- N₂ 85,445 %
- SO₂ 0 %

Měrné průtoky:

- Okysličovadla včetně α: 12,156 m³_N/m³_{Npal}
- Okysličovadla stechiom.: 10,571 m³_N/m³_{Npal}
- Vlhkých spalin: 13,237 m³_N/m³_{Npal}
- Suchých spalin: 10,987 m³_N/m³_{Npal}

* hodnoty vypočteny pomocí *Výpočty směsí plynů a mezí výbušnosti.xls*,
ostatní hodnoty vypočteny pomocí *NRK.exe*

PŘÍLOHA 4

Vzorový příklad 2 – Koksárenský plyn, výsledky z Burngas 2009 a jiných SW

1.1 Zadávací parametry

1.1.1 Zadání paliva

Plyn 1
 Plyn 2
 Plyn 3

obj. průtok: m³_N/hod

NEPRAVDA PRAVDA NEPRAVDA

Palivo 2

složka	%obj	%obj	%obj
H ₂		57,5	
CH ₄		22,5	
C ₂ H ₆			
C ₃ H ₈			
n-C ₄ H ₁₀			
i-C ₄ H ₁₀			
C ₅ H ₁₂			
C ₆ H ₁₄			
C ₇ H ₁₆			
C ₈ H ₁₈			
C ₂ H ₄			
C ₃ H ₆		0,6	
C ₄ H ₈		0,5	
CO		8	
NH ₃			
CH ₃ OH			
CH ₃ SH			
H ₂ S			
SO ₂			
N ₂		7,8	
Ar			
CO ₂		2,3	
H ₂ O			
O ₂		0,8	

0 1 0

1.1.2 Parametry okolního vzduchu

Teplota vzduchu °C
 Tlak vzduchu kPa
 Relativní vlhkost vzduchu %
 Dosycení kyslíkem m³_N/m³_{Nvzd}

1.1.3 Přebytek okysličovadla

α

1.1.4 Výpočet α z kyslíku ve spalinách

Konc kyslíku v such. spal. %
 Rozdíl

Vypočítat přebytek okysličovadla

1.3 Entalpie

Zadejte teplotu, pro kterou má být spočítána entalpie

	teplota °C	entalpie [kJ/m ³ _N]
Teplota paliva	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="28,02"/>
Teplota okysličovadla	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="25,95"/>
Teplota spalin	<input type="text" value="1792"/>	<input type="text" value="2902,69"/>

* adiabatická teplota spalin při zadaném přebytku vzduchu

teoret. Entalpie spalin

8243558

rozdíl

2,57045E-07

1.2 Výsledky výpočtu

1.2.1 Výsledné složení paliva

složka	% obj
H ₂	57,50
CH ₄	22,50
C ₂ H ₆	0,00
C ₃ H ₈	0,00
n-C ₄ H ₁₀	0,00
i-C ₄ H ₁₀	0,00
C ₅ H ₁₂	0,00
C ₆ H ₁₄	0,00
C ₇ H ₁₆	0,00
C ₈ H ₁₈	0,00
C ₂ H ₄	0,00
C ₃ H ₆	0,60
C ₄ H ₈	0,50
CO	8,00
NH ₃	0,00
CH ₃ OH	0,00
CH ₃ SH	0,00
H ₂ S	0,00
SO ₂	0,00
N ₂	7,80
Ar	0,00
CO ₂	2,30
H ₂ O	0,00
O ₂	0,80

1.2.2 Výhřevnost, výkon

Výhřevnost paliva	16,33 MJ/m ³ _N
	33,29 MJ/kg
Spalovací výkon	2,267966 MW

1.2.3 Meze výbušnosti paliva

Dolní (L _d)	4,97 % obj
Horní (L _h)	38,34 % obj

Jedná se o obj.% ve směsi se vzduchem

1.2.4 Složení okysličovadla

složka	% obj
N ₂	76,83
O ₂	20,66
Ar	0,93
CO ₂	0,03
H ₂ O	1,55

1.2.5 Složení spalin

Reálné			Referenční		$\alpha_{ref} =$
složka	vlhké %obj	suché %obj	vlhké %obj	suché %obj	1,150563
O ₂	3,64	4,55	2,78	3,00	O ₂
CO ₂	6,47	8,10	0,03	8,86	CO ₂
H ₂ O	20,08	0,00	1,59	0,00	H ₂ O
Ar	0,81	1,02	0,95	1,03	Ar
N ₂	69,00	86,33	78,87	87,12	N ₂
SO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	SO ₂

Přepočítat na
3% O₂

1.2.6 Průtoky

	Reálné m ³ _N /hod	Měrné * m ³ _N /m ³ _{Npal}
Paliva	500	-
Okysličovadla (včetně α)	2499,72	5,00
Okysličovadlo (stechiometricky)	-	4,00
Vlhkých spalin	2839,97	5,68
Suchých spalin	2269,74	4,54

* vztaženo na m³_N paliva

Příklad 2, výsledky z jiných výpočetních SW:

Palivo:

- Výhřevnost paliva: 16,329 MJ/m³_N (33,284 MJ/kg)
- Dolní mez výbušnosti paliva: 4,234 % *
- Horní mez výbušnosti paliva: 38,419 % *

Okysličovadlo:

- N₂ 76,819 %
- O₂ 20,664 %
- Ar 0,935 %
- CO₂ 0,030 %
- H₂O 1,552 %

Složení vlhkých spalin:

- O₂ 3,656 %
- CO₂ 6,379 %
- H₂O 19,825 %
- Ar 0,827 %
- N₂ 69,312 %
- SO₂ 0 %

Složení suchých spalin:

- O₂ 4,55 %
- CO₂ 8,10 %
- H₂O 0 %
- Ar 1,032 %
- N₂ 86,451 %
- SO₂ 0 %

Měrné průtoky:

- Okysličovadla včetně α: 5,017 m³_N/m³_{Npal}
- Okysličovadla stechiom.: 4,014 m³_N/m³_{Npal}
- Vlhkých spalin: 5,682 m³_N/m³_{Npal}
- Suchých spalin: 4,619 m³_N/m³_{Npal}

* hodnoty vypočteny pomocí *Výpočty směsí plynů a mezí výbušnosti.xls*,
ostatní hodnoty vypočteny pomocí *NRK.exe*

PŘÍLOHA 5

Vzorový příklad 3 – Směs plynů, výsledky z Burngas 2009 a jiných SW

1.1 Zadávací parametry

1.1.1 Zadání paliva

- Plyn 1 obj. průtok: 100 m³_N/hod
 Plyn 2 obj. průtok: 500 m³_N/hod
 Plyn 3 obj. průtok: 200 m³_N/hod

PRAVDA PRAVDA PRAVDA

složka	PRAVDA		
	Palivo 1 %obj	Palivo 2 %obj	Palivo 3 %obj
H ₂		57,5	13,3
CH ₄	97,7	22,5	0,6
C ₂ H ₆	1,2		
C ₃ H ₈	0,5		
n-C ₄ H ₁₀			
i-C ₄ H ₁₀			
C ₅ H ₁₂			
C ₆ H ₁₄			
C ₇ H ₁₆			
C ₈ H ₁₈			
C ₂ H ₄			
C ₃ H ₆		0,6	0,2
C ₄ H ₈		0,5	
CO		8	28,1
NH ₃			
CH ₃ OH			
CH ₃ SH			
H ₂ S			
SO ₂			
N ₂	0,6	7,8	52,4
Ar			
CO ₂		2,3	5,2
H ₂ O			
O ₂		0,8	0,2

1 1 1

1.1.2 Parametry okolního vzduchu

Teplota vzduchu	20	°C
Tlak vzduchu	103	kPa
Relativní vlhkost vzduchu	50	%
Dosycení kyslíkem	0,1	m ³ _N /m ³ _{Nvzd}

1.1.3 Přebytek okysličovadla

α 1,10

1.1.4 Výpočet α z kyslíku ve spalinách

Konc kyslíku v such. spal. 5%

Rozdíl 2,26

Vypočítat přebytek okysličovadla

1.3 Entalpie

Zadejte teplotu, pro kterou má být spočítána entalpie

	teplota °C	entalpie [kJ/m ³ _N]
Teplota paliva	20	28,32
Teplota okysličovadla	50	64,88
Teplota spalin	2347	4078,22

Vypočítat teoretickou teplotu spalin

* adiabatická teplota spalin při zadaném přebytku vzduchu

teoret. Entalpie spalin

13046906

rozdíl

0

1.2 Výsledky výpočtu

1.2.1 Výsledné složení paliva

složka	% obj
100 H ₂	39,26
500 CH ₄	26,43
200 C ₂ H ₆	0,15
C ₃ H ₈	0,06
n-C ₄ H ₁₀	0,00
i-C ₄ H ₁₀	0,00
C ₅ H ₁₂	0,00
C ₆ H ₁₄	0,00
C ₇ H ₁₆	0,00
C ₈ H ₁₈	0,00
C ₂ H ₄	0,00
C ₃ H ₆	0,43
C ₄ H ₈	0,31
CO	12,03
NH ₃	0,00
CH ₃ OH	0,00
CH ₃ SH	0,00
H ₂ S	0,00
SO ₂	0,00
N ₂	18,05
Ar	0,00
CO ₂	2,74
H ₂ O	0,00
O ₂	0,55

1.2.2 Výhřevnost, výkon

Výhřevnost paliva	16,07 MJ/m ³ _N
	23,60 MJ/kg
Spalovací výkon	3,571006 MW

1.2.3 Meze výbušnosti paliva

Dolní (L _d)	5,99 % obj
Horní (L _h)	36,20 % obj

Jedná se o obj.% ve směsi se vzduchem

1.2.4 Složení okysličovadla

složka	% obj
N ₂	70,14
O ₂	27,96
Ar	0,84
CO ₂	0,03
H ₂ O	1,03

1.2.5 Složení spalin

Reálné			Referenční		$\alpha_{ref} =$
složka	vlhké %obj	suché %obj	vlhké %obj	suché %obj	1,110594
O ₂	2,06	2,74	3,26	3,00	O ₂
CO ₂	11,07	14,70	0,03	14,55	CO ₂
H ₂ O	24,68	0,00	1,20	0,00	H ₂ O
Ar	0,69	0,91	0,99	0,91	Ar
N ₂	61,50	81,64	82,12	81,54	N ₂
SO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	SO ₂

Přepočítat na
3% O₂

1.2.6 Průtoky

	Reálné m ³ _N /hod	Měrné * m ³ _N /m ³ _{Npal}
Paliva	800	-
Okysličovadla (včetně α)	2599,01	3,25
Okysličovadlo (stechiometricky)	-	2,95
Vlhkých spalin	3199,16	4,00
Suchých spalin	2409,75	3,01

* vztaženo na m³_N paliva

Příklad 3, výsledky z jiných výpočetních SW:

Palivo:

- Výhřevnost paliva: $16,069 \text{ MJ/m}^3_{\text{N}}$ ($23,594 \text{ MJ/kg}$)
- Dolní mez výbušnosti paliva: $4,457 \%$ *
- Horní mez výbušnosti paliva: $33,45 \%$ *

* hodnoty vypočteny pomocí *Výpočty směsí plynů a mezí výbušnosti.xls*,
ostatní hodnoty vypočteny pomocí *NRK.exe*

PŘÍLOHA 6

Burngas 2009 v1.7.xls

1.1 Zadávací parametry

1.1.1 Zadání paliva

Plyn 1 obj. průtok: m³_N/hod
 Plyn 2 obj. průtok: m³_N/hod
 Plyn 3 obj. průtok: m³_N/hod

PRAVDA PRAVDA NEPRAVDA

složka	Palivo 1		Palivo 2		%obj
	%obj		%obj		
H ₂	10		10		4
CH ₄	80		10		95
C ₂ H ₆	3				1
C ₃ H ₈	1		80		
n-C ₄ H ₁₀					
i-C ₄ H ₁₀					
C ₅ H ₁₂					
C ₆ H ₁₄					
C ₇ H ₁₆					
C ₈ H ₁₈					
C ₂ H ₄		1			
C ₃ H ₆		1			
C ₄ H ₈		1			
CO		3			
NH ₃					
CH ₃ OH					
CH ₃ SH					
H ₂ S					
SO ₂					
N ₂					
Ar					
CO ₂					
H ₂ O					
O ₂					

1 1 0

1.1.2 Parametry okolního vzduchu

Teplota vzduchu: °C
 Tlak vzduchu: kPa
 Relativní vlhkost vzduchu: %
 Dosycení kyslíkem: m³_N/m³_{Nvzd}

1.1.3 Přebytek oksyličovadla

α:

1.1.4 Výpočet α z kyslíku ve spalinych

Konc kyslíku v such. spal.: %
 Rozdíl:

Vypočítat přebytek oksyličovadla

1.3 Entapie

Zadejte teplotu, pro kterou má být spočítána entapie

	teplota °C	entapie [kJ/m ³ _N]
Teplota paliva	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="41,42"/>
Teplota oksyličovadla	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="25,93"/>
Teplota spalin	<input type="text" value="2078"/>	<input type="text" value="3410,80"/>

Vypočítat teoretickou teplotu spalin * adiabatická teplota spalin při zadaném přebytku vzduchu

teoret. Entapie spalin
rozdíl

7499932
1732263,495

1.2 Výsledky výpočtu

1.2.1 Výsledné složení paliva

složka	% obj
H ₂	10,00
CH ₄	56,67
C ₂ H ₆	2,00
C ₃ H ₈	27,33
n-C ₄ H ₁₀	0,00
i-C ₄ H ₁₀	0,00
C ₅ H ₁₂	0,00
C ₆ H ₁₄	0,00
C ₇ H ₁₆	0,00
C ₈ H ₁₈	0,00
C ₂ H ₄	0,67
C ₃ H ₆	0,67
C ₄ H ₈	0,67
CO	2,00
NH ₃	0,00
CH ₃ OH	0,00
CH ₃ SH	0,00
H ₂ S	0,00
SO ₂	0,00
N ₂	0,00
Ar	0,00
CO ₂	0,00
H ₂ O	0,00
O ₂	0,00

1.2.2 Výhřevnost, výkon

Výhřevnost paliva	49,52 MJ/m ³ _N
	47,54 MJ/kg
Spalovací výkon	2,063422 MW

1.2.3 Meze výbušnosti paliva

Dolní (L _d)	3,52 % obj
Horní (L _n)	13,89 % obj

Jedná se o obj.% ve směsi se vzduchem

1.2.4 Složení okysličovadla

složka	% obj
N ₂	77,16
O ₂	20,75
Ar	0,93
CO ₂	0,03
H ₂ O	1,13

1.2.5 Složení spalin

Reálné			Referenční $\alpha_{ref}=1,151146$		Přepočítat na 3% O ₂
složka	vlhké %obj	suché %obj	vlhké %obj	suché %obj	
O ₂	4,26	4,99	2,75	3,00	O ₂
CO ₂	8,38	9,81	0,03	11,03	CO ₂
H ₂ O	14,61	0,00	1,14	0,00	H ₂ O
Ar	0,87	1,01	0,94	1,02	Ar
N ₂	71,88	84,19	77,91	84,95	N ₂
SO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	SO ₂

1.2.6 Průtoky

	Reálné m ³ _N /hod	Měrné * m ³ _N /m ³ _{Npal}
Paliva	150	-
Okysličovadla (včetně α)	2521,75	16,81
Okysličovadlo (stechiometricky)	-	13,11
Vlhkých spalin	2706,75	18,05
Suchých spalin	2311,24	15,41

* vztaženo na m³_N paliva

2 Vlastnosti složek

složka	MW	Výhřev- nost	spotřeba O ₂	tvorba CO ₂	tvorba H ₂ O	tvorba SO ₂	tvorba N ₂	tvorba Ar	Ld	Lh	
	kg/kmol	kJ/m _N ³	mol/mol	mol/mol	mol/mol	mol/mol	mol/mol	mol/mol	obj. %	obj%	
H ₂	2,01594	10757,56	0,5	0	1	0	0	0	4	74,2	*ČSN
CH ₄	16,04303	35781,47	2	1	2	0	0	0	5	15	*ČSN
C ₂ H ₆	30,07011	63686,68	3,5	2	3	0	0	0	3	12,5	*ČSN
C ₃ H ₈	44,09721	91175,56	5	3	4	0	0	0	2,12	9,35	*ČSN
n-C ₄ H ₁₀	58,1243	118584,02	6,5	4	5	0	0	0	1,8	9,1	*1
i-C ₄ H ₁₀	58,12437	118278,58	6,5	4	5	0	0	0	1,8	8,4	*1
C ₅ H ₁₂	72,15138	145957,39	8	5	6	0	0	0	1,3	7,5	*1
C ₆ H ₁₄	86,17848	173458,03	9,5	6	7	0	0	0	1,2	7,5	*1
C ₇ H ₁₆	100,2056	200796,01	11	7	8	0	0	0	1,1	6,7	*1
C ₈ H ₁₈	114,2327	228216,01	12,5	8	9	0	0	0	0,95	6,5	*1
C ₂ H ₄	28,05418	59021,43	3	2	2	0	0	0	2,75	28,6	*ČSN
C ₃ H ₆	42,08127	85943,55	4,5	3	3	0	0	0	2	11,1	*ČSN
C ₄ H ₈	56,10835	113427,89	6	4	4	0	0	0	2,5	7,1	*ČSN
CO	28,01054	12626,6	0,5	1	0	0	0	0	12,5	74	*1
NH ₃	17,03061	14114,06	0,75	0	1,5	0	0,5	0	15	28	*1
CH ₃ OH	32,04243	30136,1	1,5	1	2	0	0	0	6	34,7	*1
CH ₃ SH	48,10703	37338,76	3	1	2	1	0	0	4,1	21	*2
H ₂ S	34,07994	23123,76	1,5	0	1	1	0	0	4,3	46	*1
SO ₂	64,06281	0	0	0	0	1	0	0 X	X		
N ₂	28,0134	0	0	0	0	0	1	0 X	X		
Ar	39,948	0	0	0	0	0	0	1 X	X		
CO ₂	44,00995	0	0	1	0	0	0	0 X	X		
H ₂ O	18,01534	0	0	0	1	0	0	0 X	X		
O ₂	31,99879	0	-1	0	0	0	0	0 X	X		

*1 Steinleitner, Hans-Dieter. Tabulky hořlavých a nebezpečných látek, PRAHA 1980

*2 <http://www.desteknik.com.tr/arsiv/teknik/cesitli/FlammableLimits.htm>

*ČSN ČSN 386405

3.1 Složení suchého vzduchu (dle mezinárodní atmosféry)	
složka	koncentrace % obj
N ₂	78,04
O ₂	20,99
Ar	0,94
CO ₂	0,03
	100

3.4 Složení vlhkého vzduchu	
složka	koncentrace % obj
N ₂	77,1574816
O ₂	20,7526338
Ar	0,92936997
CO ₂	0,02966074
H ₂ O	1,13085396
	100

3.2 Předání parametrů ze zadání	
1. Teplota vzduchu	20 °C
2. Tlak vzduchu	103 kPa
3. Relativní vlhkost vzduchu	50 %

z listu zadani

3.3 Výpočet koncentrace vody	
1. Tlak nas. Par	2,32955915 kPa
2. Parc. Tlak vody	1,16477958 kPa
3. Koncentrace vody	1,13085396 % obj

3.5 Celkové složení oksylichovadla

složka	koncentrace % obj
N ₂	77,15748157
O ₂	20,75263375
Ar	0,929369973
CO ₂	0,029660744
H ₂ O	1,130853957
	100

3.6 Celkové složení paliva

složka	obj %
H ₂	10
CH ₄	56,66666667
C ₂ H ₆	2
C ₃ H ₈	27,33333333
n-C ₄ H ₁₀	0
i-C ₄ H ₁₀	0
C ₅ H ₁₂	0
C ₆ H ₁₄	0
C ₇ H ₁₆	0
C ₈ H ₁₈	0
C ₂ H ₄	0,666666667
C ₃ H ₆	0,666666667
C ₄ H ₈	0,666666667
CO	2
NH ₃	0
CH ₃ OH	0
CH ₃ SH	0
H ₂ S	0
SO ₂	0
N ₂	0
Ar	0
CO ₂	0
H ₂ O	0
O ₂	0
sum	100

4 Stechiometrické výpočty

složka	spotřeba O ₂ (10* <i>mol</i>)/ <i>kmol</i>	tvorba CO ₂ (10* <i>mol</i>)/ <i>kmol</i>	tvorba H ₂ O (10* <i>mol</i>)/ <i>kmol</i>	tvorba SO ₂ (10* <i>mol</i>)/ <i>kmol</i>	tvorba N ₂ (10* <i>mol</i>)/ <i>kmol</i>	tvorba Ar (10* <i>mol</i>)/ <i>kmol</i>
H ₂	5	0	10	0	0	0
CH ₄	113,33333	56,66667	113,33333	0	0	0
C ₂ H ₆	7	4	6	0	0	0
C ₃ H ₈	136,66667	82	109,33333	0	0	0
n-C ₄ H ₁₀	0	0	0	0	0	0
i-C ₄ H ₁₀	0	0	0	0	0	0
C ₅ H ₁₂	0	0	0	0	0	0
C ₆ H ₁₄	0	0	0	0	0	0
C ₇ H ₁₆	0	0	0	0	0	0
C ₈ H ₁₈	0	0	0	0	0	0
C ₂ H ₄	2	1,3333333	1,3333333	0	0	0
C ₃ H ₆	3	2	2	0	0	0
C ₄ H ₈	4	2,6666667	2,6666667	0	0	0
CO	1	2	0	0	0	0
NH ₃	0	0	0	0	0	0
CH ₃ OH	0	0	0	0	0	0
CH ₃ SH	0	0	0	0	0	0
H ₂ S	0	0	0	0	0	0
SO ₂	0	0	0	0	0	0
N ₂	0	0	0	0	0	0
Ar	0	0	0	0	0	0
CO ₂	0	0	0	0	0	0
H ₂ O	0	0	0	0	0	0
O ₂	0	0	0	0	0	0
suma	2,72	1,5066667	2,4466667	0	0	0 mol/mol

5.1 Výpočet spotřeby okysličovadla			
1. průtok paliva	6,692246 kmol/hod		
2. potřeba kyslíku	18,20291 kmol/hod	stech	
3. potřeba okysličovadla	87,71373 kmol/hod	stech	
	1966,016 m3/hod	stech	
	112,508 kmol/hod	včetně α	
	2521,754 m3/hod	včetně α	

Referenční (3%O ₂)	100,9713 kmol/hod	vč. α_{ref}
	2263,171 m3/hod	vč. α_{ref}

5.2 Reálné spaliny				
	z okysličovadla	z paliva	vlhké spal	suché spal
O ₂	5,145464253	0 kmol/hod	4,260839	4,989988 %
CO ₂	0,03337071	10,082984 kmol/hod	8,377117	9,810676 %
H ₂ O	1,272301168	16,373695 kmol/hod	14,61224	0 %
Ar	1,045615567	0 kmol/hod	0,86585	1,014021 %
N ₂	86,80833923	0 kmol/hod	71,88396	84,18532 %
SO ₂	0	0 kmol/hod	0	0 %
Celkem	94,30509093	26,456679 kmol/hod	100	100 %
Celkem z pal. + ze vzduch		120,76177 kmol/hod		
		2706,7543 m3/hod		
Celkem z pal + ze vzduch such.		103,11577 kmol/hod		
		2311,2369 m3/hod		

5.3 Referenční spaliny				
	z ref. okysl.	z paliva		
O ₂	2,751299454	0 kmol/hod	2,518926	3,000014 %
CO ₂	0,029948845	10,082984 kmol/hod	9,2588	11,02713 %
H ₂ O	1,141838174	16,373695 kmol/hod	16,03618	0 %
Ar	0,938397134	0 kmol/hod	0,859141	1,023227 %
N ₂	77,90692804	0 kmol/hod	71,32695	84,94963 %
SO ₂	0	0 kmol/hod	0	0 %
Celkem	82,76841165	26,456679 kmol/hod	100	100 %
Celkem z pal. + ze vzduch		109,22509 kmol/hod		
		2448,1712 m3/hod		
Celkem z pal + ze vzduch such.		91,709557 kmol/hod		
		2055,578 m3/hod		

6.1 Výpočet výhřevnosti		
složka	stř. MW $c_i \cdot MW_i \cdot 100$	stř. LHV $c_i \cdot LHV_i \cdot 100$
H ₂	20,1594	107575,6
CH ₄	909,1050333	2027616,633
C ₂ H ₆	60,14022	127373,36
C ₃ H ₈	1205,32374	2492131,973
n-C ₄ H ₁₀	0	0
i-C ₄ H ₁₀	0	0
C ₅ H ₁₂	0	0
C ₆ H ₁₄	0	0
C ₇ H ₁₆	0	0
C ₈ H ₁₈	0	0
C ₂ H ₄	18,70278667	39347,62
C ₃ H ₆	28,05418	57295,7
C ₄ H ₈	37,40556667	75618,59333
CO	56,02108	25253,2
NH ₃	0	0
CH ₃ OH	0	0
CH ₃ SH	0	0
H ₂ S	0	0
SO ₂	0	0
N ₂	0	0
Ar	0	0
CO ₂	0	0
H ₂ O	0	0
O ₂	0	0
	stř. MW kg/kmol	stř. LHV kJ/m _N ³
	23,34912007	49522,1268

6.2 Spalovací výkon
Spalovací výkon 2,063422 MW

7 Výpočet mezí výbušnosti

složka	c/lđ	c/lh
H ₂	2,5	0,134770889
CH ₄	11,3333333	3,777777778
C ₂ H ₆	0,6666667	0,16
C ₃ H ₈	12,893082	2,923351159
n-C ₄ H ₁₀	0	0
i-C ₄ H ₁₀	0	0
C ₅ H ₁₂	0	0
C ₆ H ₁₄	0	0
C ₇ H ₁₆	0	0
C ₈ H ₁₈	0	0
C ₂ H ₄	0,2424242	0,023310023
C ₃ H ₆	0,3333333	0,06006006
C ₄ H ₈	0,2666667	0,093896714
CO	0,16	0,027027027
NH ₃	0	0
CH ₃ OH	0	0
CH ₃ SH	0	0
H ₂ S	0	0
suma	28,395506	7,20019365
inerty		
suma inertů		0

Dolní mez výbušnosti směsi	3,521684 %
Horní mez výbušnosti směsi	13,88852 %

8.1 Výpočet entalpie

Zadejte teplotu, pro kterou má být spočítána entalpie

T_{ref} °C = K
 T_{ref} je taková teplota, při které považujeme entalpii za nulovou)

	teplota °C	K	i [kJ/m ³ _N]
1. Palivo	<input type="text" value="20"/>	293,15	<input type="text" value="41,42"/>
2. Okysličovadlo (ze zadání)	<input type="text" value="20"/>	293,15	<input type="text" value="25,93"/>
3. Spaliny	<input type="text" value="2078"/>	2351,07	<input type="text" value="3410,80"/>

$C_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + E/T^2$ (kJ/kmol.K)

8.5 Pom. Hodnoty k výp. teploty spal.

1. Vstupní entalpie	71613 kJ/(m ³ _N *hod)
2. Teor. entalpie spalin	7499932 kJ/(m ³ _N *hod)
3. Rozdíl teor.ent-spoč.ent	-1732263 kJ/(m ³ _N *hod)

složka

8.2 Koeficienty polynomu					
A	B	C	D	E	
H ₂	30,52363	-0,00423773	5,11273E-06	-1,02727E-09	-82741
CH ₄	1,22785	0,11158108	-4,61491E-05	7,13065E-09	671468
C ₂ H ₆	-8,77506	0,21899879	-0,000109267	2,14001E-08	683673
C ₃ H ₈	-2,73671	0,29990674	-0,000151905	2,99574E-08	0
n-C ₄ H ₁₀	-0,65241	0,38581472	-0,000196837	3,88346E-08	0
i-C ₄ H ₁₀	-6,51461	0,41068531	-0,000223841	4,77267E-08	0
C ₅ H ₁₂	-1,14864	0,479074	-0,000249388	5,02848E-08	0
C ₆ H ₁₄	-3,26019	0,57809299	-0,000308083	6,37951E-08	0
C ₇ H ₁₆	-3,89258	0,67193603	-0,00036127	7,54963E-08	0
C ₈ H ₁₈	-4,13842	0,76374805	-0,000411384	8,57728E-08	0
C ₂ H ₄	4,47172	0,15383375	-8,03278E-05	1,66026E-08	0
C ₃ H ₆	3,91873	0,23383384	-0,000115352	2,19246E-08	0
C ₄ H ₈	-1,69968	0,34619337	-0,000188575	4,02878E-08	0
CO	23,20395	0,01447403	-5,40155E-06	7,1621E-10	172241
NH ₃	25,41336	0,03445682	-6,6987E-07	-2,76323E-09	0
CH ₃ OH	15,15552	0,10425066	-2,95168E-05	0	0
CH ₃ SH	20,77791	0,11099953	-4,04138E-05	2,61154E-09	0
H ₂ S	30,77231	0,00727498	1,4037E-05	-6,7098E-09	0
SO ₂	37,00606	0,02865911	-1,36823E-05	2,19073E-09	-398063
N ₂	23,63908	0,01254614	-4,13646E-06	4,8023E-10	172470
Ar	20,80839	0	0	0	0
CO ₂	31,95636	0,0357079	-1,52924E-05	2,31229E-09	-375874
H ₂ O	25,36597	0,01932883	-3,79818E-06	1,7507E-10	253811
O ₂	24,33747	0,01661394	-7,4474E-06	1,24611E-09	67779
x					
x					
x					

8.3 Členy po integraci a dos. teploty						
oddíl 1. palivo						
610,4726	-23,998265	8,201561	-0,46699	-20,6662		
24,557	631,883656	-74,0298	3,241531	167,712		
-175,5012	1240,19015	-175,279	9,728275	170,7605		
-54,7342	1698,37187	-243,677	13,61839	0		
-13,0482	2184,86876	-315,756	17,65385	0		
-130,2922	2325,71091	-359,073	21,69615	0		
-22,9728	2712,99606	-400,054	22,85902	0		
-65,2038	3273,7406	-494,21	29,00071	0		
-77,8516	3805,17374	-579,53	34,31995	0		
-82,7684	4325,10521	-659,919	38,99156	0		
89,4344	871,160526	-128,857	7,547383	0		
78,3746	1324,20104	-185,042	9,966713	0		
-33,9936	1960,49305	-302,502	18,31448	0		
464,079	81,9664319	-8,66487	0,325583	43,0205		
508,2672	195,128972	-1,07457	-1,25614	0		
303,1104	590,371488	-47,3493	0	0		
415,5582	628,590338	-64,8296	1,187183	0		
615,4462	41,1982117	22,5174	-3,05022	0		
740,1212	162,29654	-21,9485	0,995887	-99,4239		
472,7816	71,0487908	-6,63548	0,218308	43,07769		
416,1678	0	0	0	0		
639,1272	202,213838	-24,5312	1,051147	-93,8818		
507,3194	109,459164	-6,09283	0,079585	63,39417		
486,7494	94,0847422	-11,9467	0,566471	16,92911		

8.4 Ent. sl.	8.5 Ent. Celkova	
i _i	x _i *i _i	
	palivo	
573,5427541	5735,427541	H ₂
753,3643784	42690,64811	CH ₄
1069,89833	2139,79666	C ₂ H ₆
1413,578586	38637,8147	C ₃ H ₈
1873,718507	0	n-C ₄ H ₁₀
1858,041865	0	i-C ₄ H ₁₀
2312,827872	0	C ₅ H ₁₂
2743,327673	0	C ₆ H ₁₄
3182,112181	0	C ₇ H ₁₆
3621,40944	0	C ₈ H ₁₈
839,2848126	559,5232084	C ₂ H ₄
1227,500375	818,3335836	C ₃ H ₆
1642,311953	1094,874635	C ₄ H ₈
580,7266423	1161,453285	CO
701,0654629	0	NH ₃
846,1326249	0	CH ₃ OH
980,5060896	0	CH ₃ SH
676,1115966	0	H ₂ S
782,0412884	0	SO ₂
580,4909119	0	N ₂
416,1678	0	Ar
723,9792695	0	CO ₂
674,1594895	0	H ₂ O
586,3830095	0	O ₂
		x
		x
		x
		x
	entalpie	928,3787172 kJ/kmol
		41,4195912 kJ/m ³ N

N2
Ar
CO₂
H₂O
O₂
x
x
x

SO₂
N2
Ar
CO₂
H₂O
O₂
x
x

oddíl 2. okysličovadlo					
472,7816	71,0487908	-6,63548	0,218308	43,07769	
416,1678	0	0	0	0	
639,1272	202,213838	-24,5312	1,051147	-93,8818	
507,3194	109,459164	-6,09283	0,079585	63,39417	
486,7494	94,0847422	-11,9467	0,566471	16,92911	

oddíl 3. spaliny					
76895,68925	78138,0098	-59177,3	16730,66	-1287,99	
49120,15356	34206,5895	-17890,5	3667,529	558,0533	
43238,20183	0	0	0	0	
66402,80884	97356,2766	-66140,8	17659,02	-1216,2	
52708,49549	52699,3444	-16427,5	1337,014	821,2446	
50571,35318	45297,2966	-32210,6	9516,574	219,3094	

okysličovadlo		
580,4909119	44789,21684	N2
416,1678	386,773857	Ar
723,9792695	21,47376364	CO ₂
674,1594895	762,3759265	H ₂ O
586,3830095	12168,99184	O ₂
		x
		x
		x
entalpie	581,2883222 kJ/kmol	
	25,93416268 kJ/m3N	

111299,0786	0	SO ₂
69661,78282	5007564,634	N2
43238,20183	37437,78931	Ar
114061,1439	955503,5303	CO ₂
91138,64611	1331739,51	H ₂ O
73393,89307	312719,5418	O ₂
		x
		x
entalpie	76449,65005 kJ/kmol	
	3410,799056 kJ/m3N	