

ZVÝŠENÍ ŽIVOTNOSTI A SPOLEHLIVOSTI PROVOZU SPALOVACÍCH KOMOR S HYBRIDNÍMI HOŘÁKY

LIFETIME PROLONGING AND OPERATIONAL RELIABILITY OF THE COMBUSTION CHAMBERS WITH HYBRID BURNER

Stanislav Veselý

EKOL, spol. s r.o., Brno, ČR

Abstrakt

Při provozu spalovacích turbín je nejefektivnější metodou snižování emisí použití hybridních hořáků. V příspěvku je popsán princip technologie hybridního hořáku na plynné palivo a jeho zásadní odlišnosti od klasických hořáků s difuzním spalováním. Jsou popsány základní problémy vznikající při technologii spalování předem smíchané chudé směsi palivo – vzduch. Hlavní pozornost je věnována zvýšenému sklonu k pulzačnímu hoření. Je provedena analýza vzniku tlakových pulzací a představeny rovnice, které musí být splněny, aby nedošlo k pulzačním tlakům, které by ohrozily nejenom spolehlivost provozu, ale i bezpečnost, protože při hodnotách tlakových pulzací větších než je 0,5 % jmenovitého tlaku ve spalovací komoře, může dojít k destrukci funkčních částí komory. Z analýzy vyplývá, že musí být splněny některé geometrické poměry mezi délkovými a příčnými rozměry hybridního hořáku. Protože geometrické poměry ovlivňují také proces míšení paliva se vzduchem, jsou ovlivněny rovněž emise NO_x a CO. Protože existuje velké množství variant geometrie hořáku, byl využit matematický model míšení paliva a vzduchu a sledován vliv na homogenitu směsi na výstupu z hořáku. Jsou rovněž představeny různé konstrukční varianty hybridního hořáku a jejich přednosti a nedostatky.

Abstract

The use of hybrid burners is the most efficient method of reducing emissions while operating a combustion turbine. The principle of hybrid burner technology for gas fuel and its basic differences with classical diffuse combustion burners is described. Basic problems arising from the combustion technology of premixed lean mixture of fuel and air is described. Main attention is paid to the increased tendency to pulsation burning. We analyze the occurrence of pressure pulsations and present the equations that must be met to avoid pulsating pressure that would not only compromise the reliability of the operation, but also the safety, because at pressure pulses bigger than 0.5% of the nominal pressure in the combustion chamber, the destruction of the functional chamber parts can occur. The analysis shows that some geometric ratios between the length and transverse dimensions of the hybrid burner must be met. Because geometric conditions also affect the fuel-air mixing process, NO_x and CO emissions are also affected. Since there are many variations of the burner geometry, a mathematical model of fuel and air mixing was used and the effect on the homogeneity of the burner output was monitored. Different variants of the hybrid burner design and their advantages and disadvantages are also presented.

Úvod

Na počátku 90. let minulého století vyvstal u provozovatelů spalovacích turbín na tranzitní soustavě ze zemí bývalého SSSR do západní Evropy problém ochrany životního prostředí. Emisní limity byly v té době nastaveny na hodnoty $100 \text{ mg Nm}^{-3} \text{ NO}_x$ a $300 \text{ mg Nm}^{-3} \text{ CO}$. Tyto limity se neustále snižovaly a v současné době jsou na hodnotách $25 \text{ mg Nm}^{-3} \text{ NO}_x$ a $33 \text{ mg Nm}^{-3} \text{ CO}$. Dosažení těchto limitů není možné dosáhnout při použití klasického způsobu spalování, kdy palivo a vzduch se přivádí do spalovacího prostoru odděleně a poté se mísí a hoří v primární zóně komory. Tento způsob se nazývá difuzní spalování. Emisní limity nelze dosáhnout proto, že při míšení paliva se vzduchem vznikají lokálně vysoké teploty plamene, což jsou

zdroje vzniku NO_x a lokálně nízké teploty plamene, které jsou zdrojem CO. Proto je nutné použít technologii spalování předem smíchané chudé směsi palivo – vzduch.

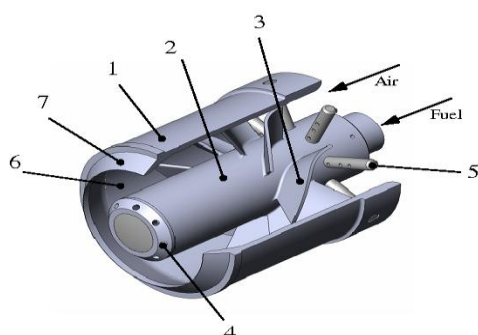
Spalování předem smíchané chudé směsi palivo – vzduch

V roce 1997 vyvinula spolupracující firma EST (Rusko) tzv. kombinovaný neboli hybridní hořák označený EST-1. Tento hořák byl použit při ekologické modernizaci spalovacích turbín GTN – 16 a GT 750-6. Podélný řez spalovací turbínou GT 750-6 je na obr. 1.

Technologie spalování předem smíchané chudé směsi palivo – vzduch se zásadně liší od technologie spalování difúzním způsobem.

Základní problémy jsou následující:

- úzký rozsah koncentrací pro stabilní hoření,
- možnost proskoku plamene do směšovací komory,
- možnost samovznícení směsi,
- zvýšený sklon k pulzačnímu hoření.



1 - plášť; 2 - centrální těleso; 3 - vířič; 4 - otvory pro přívod paliva pro difúzní spalování; 5 - přívod paliva pro kinetický obvod; 6 - směšovací komora; 7 - kuželové zúžení; 8 - otvory pro přívod paliva do proudu vzduchu (kinetický obvod)

Obr. 1: Hybridní hořák

Konstrukce nízkoemisního kombinovaného hořáku (hybridního)

Konstrukce hybridního hořáku EST-1 je znázorněna na obr. 2. Pro zajištění spolehlivého zapálení a práce na režimech nízkého zatížení je nutný difúzní okruh. Hybridní hořák má proto dva nezávislé regulované okruhy přívodu paliva – difúzní a předem smíchané směsi.

Analýza vzniku tlakových pulzací a jejich odstranění

Na obr. 3 je znázorněno schéma hybridního hořáku EST-1 a EST-1M. Hořák EST-1 byl uveden do provozu na kompresní stanici Nitra v roce 2007 a při provozu hořáku na spalování s předem smíchané směsi se vyskytly tlakové pulsace s frekvencí 120–200 Hz s dvojamplitudou 0,2 ÷ 0,35 bar v závislosti na zatížení. Provoz s těmito pulsacemi není možný. Podle našich i zahraničních zkušeností je možné připustit tlakové pulsace s dvojamplitudou maximálně 0,045 bar.

Pro jednotlivé veličiny na obr. 3 platí tyto rovnice:

$$(\dot{m}_A + \dot{m}_{FP}) = F_1 (\Delta p_{VIR} + \Delta p_p) \quad (1)$$

$$\Delta p_x = F_2 (\dot{m}_A + \dot{m}_{FP}) \quad (2)$$

$$\Delta p_{max} = F_3 (\dot{m}_A + \dot{m}_{FP}) \quad (3)$$

Přítom doba mísení je:

$$\tau_{MIS} = \frac{L}{C} \quad (4)$$

Doba hoření τ_x je vypočtena z teorie hoření.

Existence prodlevy mezi momentem přívodu paliva do proudu vzduchu a momentem, kdy se uvolní teplo o velikosti

$$\tau_{MIS} + \tau_X, \quad (5)$$

vede k určitému fázovému posuvu mezi kmitáním průtoku, tlaku a vývinu tepla a v důsledku toho mohou v proudu vznikat a udržet se pulsace tlaku.

Odstranění pulsací tlaku se řeší takto: průtok paliva se rozdělí na několik proudů, které se přivádí postupně v různých řezech do proudu vruchu (viz. obr. 3), přičemž dráha od řezu, v kterém se přivádí první proud do řezu, ve kterém se přivádí poslední proud je charakterizována časem:

$$\tau_{PŘÍ} = \frac{L_2 - L_1}{c}, \quad (6)$$

a poté se palivo a vzduch směšují v proudu na vzdálenosti L_1 , což charakterizuje čas mísení

$$\tau_{MIS} = \frac{L_1}{c}, \quad (7)$$

až se vytvoří chudá směs, která shoří v čase τ_X a tvoří se spaliny za silného vývinu tepla. Přitom musí být splněna rovnice (tato rovnice je patentována):

$$1,2 < \frac{\tau_{PŘÍ} + \tau_{MIS} + \tau_X}{\tau_{MIS} + \tau_X} < 2,0. \quad (8)$$

Vliv tlakových pulzací na životnost a spolehlivost provozu spalovacích turbín

Nízkoemisní hybridní hořák byl použit na spalovacích komorách turbín GT 750-6, které slouží k pohonu kompresorů na plynovodu, který vede mimo jiné přes Slovensko, Českou republiku do Německa. V těchto lokalitách bylo dosaženo těchto parametrů:

a) Koncentrace emisí škodlivin při normálních podmínkách přepočtena na 15 % O_2 ve spalínách v rozsahu výkonů 30 – 100 % nominálního výkonu.

$$NO_x < 25 \text{ mg Nm}^{-3}$$

$$CO < 30 \text{ mg Nm}^{-3}$$

b) Provoz bez samovznícení směsi paliva a vzduchu ve směšovací komoře pro všechny zatížení

c) Dlouhodobý provoz bez tlakových pulzací větších než 0,025 bar

Bylo experimentálně ověřeno, že tlakovými pulzacemi s dvojamplitudou větší než 0,1 bar dochází k těmto poruchám:

- praskání svarů čela plamence,
- vytloukání čepů pro uchycení plamence v plášti spalovací komory,
- slehávání izolace spalínovodu mezi spalovací komorou a vysokotlakou turbínou,
- praskání kuželky vstupního hrdla vysokotlaké turbíny.

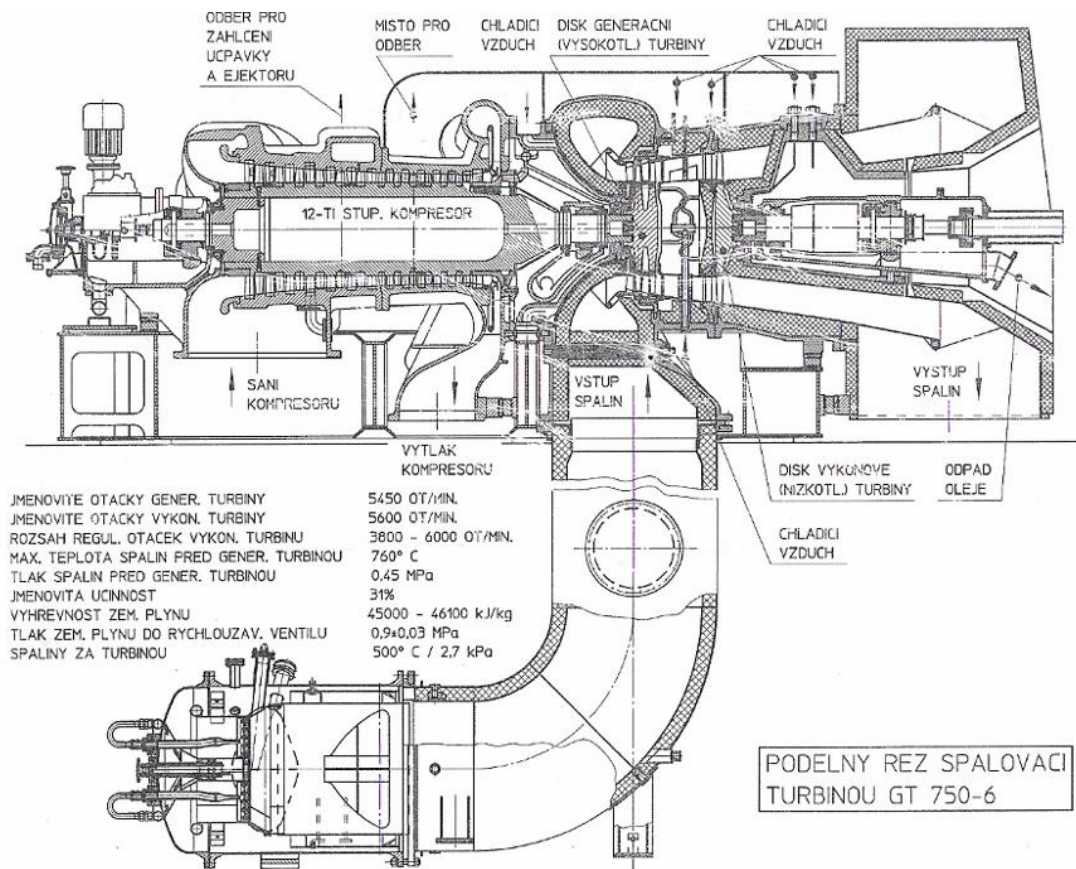
Závěr

Odstraněním tlakových pulzací při provozu nízkoemisního hybridního hořáku byl umožněn dlouhodobý spolehlivý provoz spalovacích turbín s životností více jako 200 000 provozních hodin.

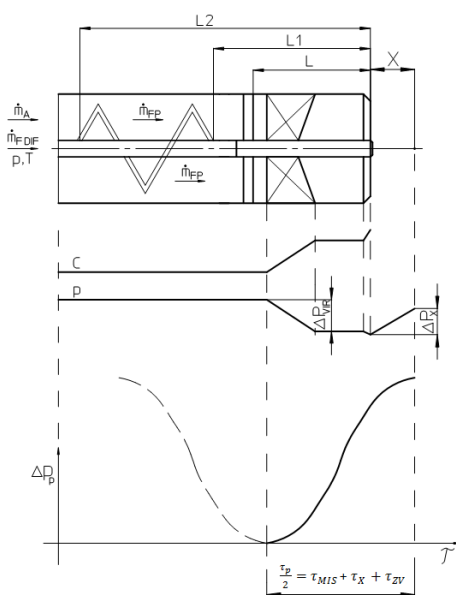
Literatura

- [1] Veselý, S. (2007): *Spalovací komory spalovacích turbín*. Galant Brno, s.r.o., Brno. ISBN 80-239-6657
- [2] Veselý, S. (2008): *Spalovací turbíny, termodynamika a základy konstrukce*. Galant Brno, s.r.o., Brno.

[3] Veselý, S. (2008): *Hybridní hořák s regulací hmotnostního průtoku primárního vzduchu*. Inaugurační přednášky, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Bratislava. ISBN 978-80-254-3011-8



Obr. 2: Podélný řez spalovací turbínou GT 750-6



Na obr. 3 je označeno:

- \dot{m}_A – hmotnostní průtok vzduchu
- \dot{m}_{FDIF} – hmot. průtok paliva v dif. obvodu
- \dot{m}_{FP} – hmot. průtok paliva v premix obvodu
- p – tlak
- T – teplota
- X, L, L_1, L_2 – vzdálenosti
- Δp_p – tlakové pulsace
- Δp_{VIR} – tlaková ztráta ve vířiči
- Δp_x – zvýšení tlaku při vývinu tepla
- c – rychlost
- τ_p – doba tlakového pulsu
- τ_{MIS} – doba mísení
- τ_X – doba vývinu tepla
- τ_{ZV} – doba pro proběhnutí zvukové vlny

Obr. 3: Schéma hybridního hořáku EST-1 a EST-2M