

Ing. Kristýna ŠVANDOVÁ^{1),2)}
 Ing. Petr ZELENSKÝ^{1),3)}
 Ing. Martin BARTÁK, Ph.D.³⁾

¹⁾ Strojírenský vědeckotechnický
 park s.r.o., Buštěhrad
²⁾ PŽS - Engineering s.r.o., Kladno
³⁾ ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
 Ústav techniky prostředí

Recenzent
 doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.

CFD simulace odsávacího systému tavicí pece pro zpracování oceli



CFD Simulation of the Ventilation System of the Steel Processing ladle

Zvyšující se požadavky na kvalitu pracovního prostředí v oblasti těžkého průmyslu a na účinnost technických zařízení směřují k optimalizaci odsávacích systémů v průmyslových provozech. Vzhledem ke složitosti řešené problematiky může být při analýze stávajících systémů a návrhu nových technických řešení přínosné využít počítačovou mechaniku tekutin (CFD). Příspěvek popisuje analýzu stávajícího odsávacího systému v průmyslovém provozu mimopecního zpracování oceli společnosti US Steel Košice, přičemž vychází ze dvou předchozích experimentálních a výpočetních studií. Je popsána úprava a potřebné zjednodušení dodaného geometrického modelu řešeného prostoru, tvorba numerické sítě a CFD simulace zaměřená na účinnost odsávacího systému při různých objemových průtocích. Jsou uvedeny okrajové podmínky simulace a její nastavení, včetně způsobu simulace šíření škodlivin z povrchu taveniny při jejím legování pomocí CaSi. Na základě získaných výsledků je popsáno optimální nastavení odsávacího systému a možnosti jeho další optimalizace za účelem zvýšení účinnosti.

Klíčová slova: CFD simulace, zpracování oceli, šíření škodlivin, větrání, optimalizace

Increasing demands on adequate quality of working environment in heavy industry and on the efficiency of technical equipment are leading to optimization of ventilation systems in industrial plants. Considering the complexity of the issue, the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) can be beneficial when analysing existing systems and designing new technical solutions. The paper describes the analysis of the existing ventilation system of the industrial steel processing shop of US Steel Košice. It is based on two previous experimental and computational studies. It describes the modification and necessary simplification of the geometric model of the analysed facility, creation of the numerical mesh and CFD simulation focused on the efficiency of the ventilation system at various volumetric flows. The boundary conditions of the simulation and its setting are presented as well, including the method of simulating the spreading of pollutants from the surface of the melted steel during its alloying with CaSi. The optimal setting of the ventilation system and the possibilities of its further optimization in order to increase its efficiency are described on the basis of the obtained results.

Keywords: CFD simulation, processing of steel, spreading of contaminants, ventilation, optimization

ÚVOD

V současné době jsou kladeny čím dál vyšší požadavky na kvalitu pracovního prostředí, zejména v těžkých průmyslových provozech, kde dochází k uvolňování škodlivých látek. Odsávací zařízení, která jsou do těchto provozů navrhována, musí dle platných norem splňovat řadu požadavků, zejména na účinnost. V procesu návrhu, analýzy a optimalizace takového zařízení lze využít i simulace metodou počítačové mechaniky tekutin – CFD (Computational Fluid Dynamics).

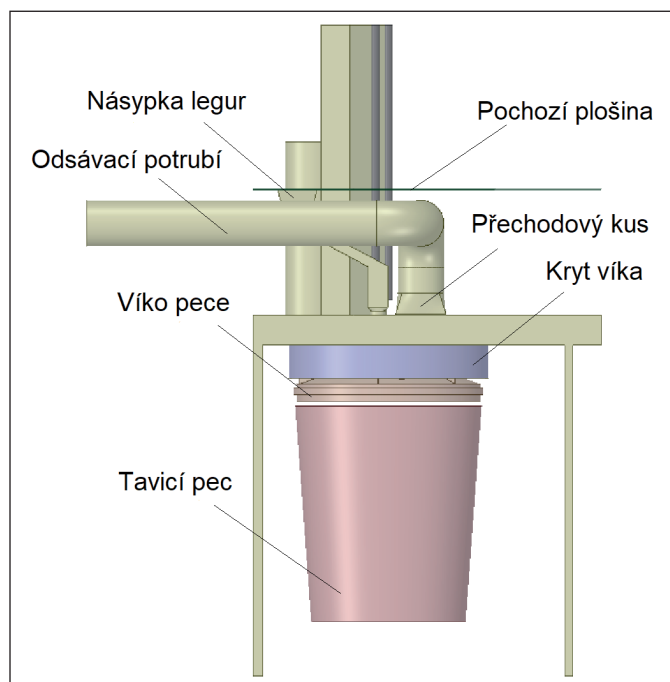
Příspěvek se zabývá analýzou odsávacího systému tavicí pece pro zpracování oceli společností US Steel Košice a vychází ze dvou studií, které byly v předchozích letech zpracovány společnostmi Hatch a Vítkovice ÚAM. Jeho hlavním cílem je ověření postupu CFD simulace a optimalizace nastavení výpočetního modelu tak, aby bylo dosaženo co nejlepší kvality výsledků při využití dostupné výpočetní kapacity ve Strojírenském vědeckotechnickém parku Buštěhrad. Ověřená metodika bude použita pro další práci na daném pracovišti v oblasti CFD simulací obdobných průmyslových provozů.

Bylo vypracováno několik numerických studií se zaměřením na faktory, které by mohly mít vliv na simulaci odsávacího systému odpadních plynů, uvolňujících se na hladině taveniny v tavicí peci. Jedná se o:

- ☐ vliv hustoty numerické sítě,
- ☐ vliv modelu turbulence,
- ☐ vliv okrajové podmínky definující vývoj škodlivin na hladině taveniny.

Pro ověření metodiky byl řešen vliv objemového průtoku odsávacím systémem na účinnost odsávání. Výsledky získané z analýzy proudění v prů-

myslovém prostoru budou použity jako podklad pro další studii daného zařízení se zohledněním vlivu prachových částic na účinnost odsávání.



Obr. 1 3D model tavicí pece

Fig. 1 3D model of the steel processing ladle

GEOMETRIE MODELU TAVICÍ PECE A NUMERICKÁ VÝPOČETNÍ SÍŤ

Geometrie tavicí pece pro zpracování oceli a odsávacího zařízení společnosti US Steel Košice je zobrazena na obr. 1. Tavicí pec je kryta víkem, mezi nímž a okrajem pece je mezera o šířce 15 cm umožňující přísávání vzduchu z okolního prostředí. Víko pece je dále opatřeno krytem, pod nímž se nachází vstup do odsávacího potrubí, které je ke konstrukci připojeno přechodovým kusem. Násypka legur je vedena skrze nosnou konstrukci a víko pece a ústí přímo nad hladinu taveniny. Prostor pod krytem víka je detailně zobrazen na obr. 2 (nahore), s vyznačením ústí násypky legur, vstupu do odsávacího potrubí a otvoru pro technologické sondy v konstrukci nad tavicí pecí. Rozměry zařízení jsou: šířka 7,0 m × hloubka 6,2 m × výška 14,2 m.

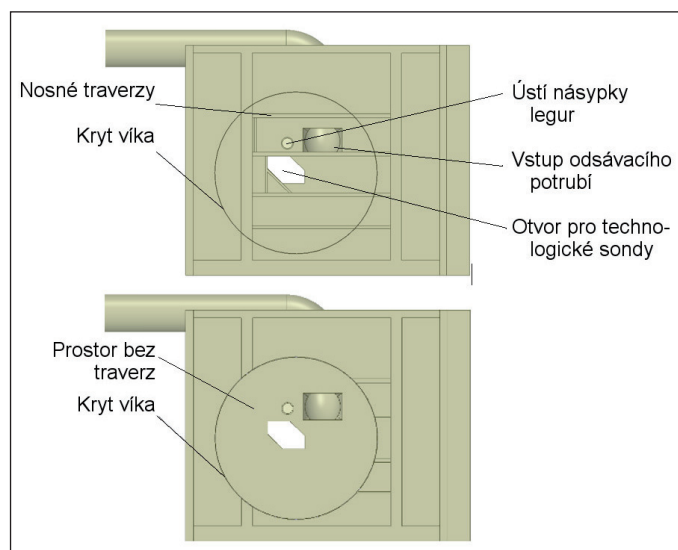
Geometrie zařízení byla pro potřeby této studie dodána zadavatelem jako 3D model ve formátu parasolid. Dodaný geometrický model byl převeden do formátu Step a importován do programu ANSYS SpaceClaim 18.0. S ohledem na dostupnou výpočetní kapacitu bylo nutné geometrii zařízení zjednodušit a snížit tak velikost následně vytvořené numerické sítě. Byly provedeny následující úpravy, u kterých byl předpokládán minimální vliv na výsledek simulace (resp. na proudění v simulovaném prostoru):

- ☐ odstranění měřicích trubic,
- ☐ zjednodušení geometrie víka pece,
- ☐ zjednodušení vnější geometrie přechodového kusu odsávacího potrubí,
- ☐ zjednodušení geometrie nosných traverz.

V rámci variantní studie byly dodatečně provedeny úpravy geometrie v oblasti krytu víka tavicí pece a byly tak vytvořeny dvě verze modelu. V první variantě byly v oblasti pod krytem víka zachovány nosné traverzy, viz obr. 2 (nahore), ve druhém modelu byly naopak odstraněny, viz obr. 2 (dole).

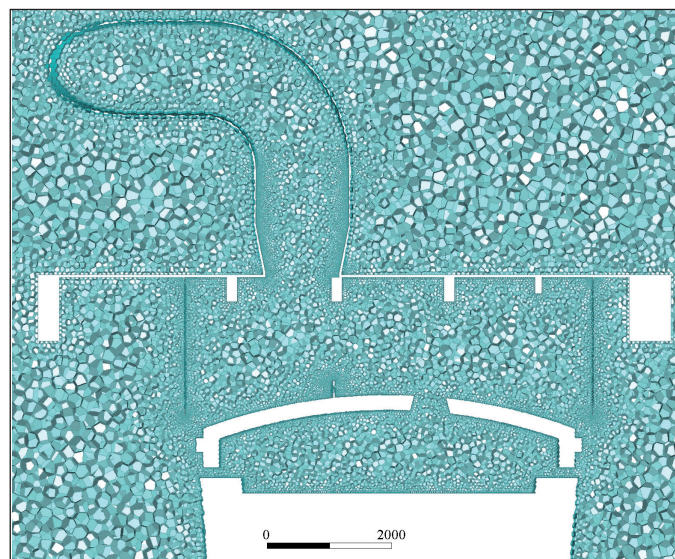
Vnitřní objem modelu tavicí pece není definován, výpočetní oblastí je objem vzduchu, který model obklopuje a který proudí v odsávacím potrubí. V programu ANSYS Fluent Meshing 18.0 byly vygenerovány dvě varianty polyhedrální výpočetní sítě, které se liší velikostí buněk.

První varianta sítě, viz obr. 3, byla vytvořena s maximální velikostí buněk ve volném prostoru 100 mm. Pec a odsávací potrubí byly obklope-



Obr. 2 Geometrie pod krytem víka: model s nosnými traverzami (nahore); model bez traverz (dole)

Fig. 2 Geometry under the cover of the lid: model with supporting girders (top); model without girders (bottom)



Obr. 3 Hrubá síť, oblast nad tavicí pecí

Fig. 3 Coarse mesh, space above the steel processing ladle

ny buňkami o velikosti 50 mm. Stejnou velikostí buněk byl vysíťován i vnitřek odsávacího potrubí, vyjma přechodového kusu (oblast s velkými gradienty rychlosti), kde byla síť zjemněna buňkami o velikosti 5 mm. Oblast kolem víka pece a pod jeho krytem vyplňují buňky o velikosti 25 mm. Stejně velké buňky jsou i nad hladinou taveniny, vyjma prostoru pod ústím násypky legur, který je vysíťován menšími buňkami o velikosti 5 mm.

Vrstva prismatických buněk byla vygenerována po celé ploše tavicí pece a víka pece, na vnitřním povrchu odsávacího potrubí včetně přechodového kusu a v oblasti pod krytem víka pece. Výška prismatických buněk byla zvolena s ohledem na použití stěnových funkcí a s ohledem na velikost navazující polyhedrální sítě. Celkový počet výpočetních buněk byl 8,8 milionů.

U druhé varianty sítě byly generovány buňky o poloviční velikosti a jejich celkový počet dosahuje 30,7 milionů.

U obou variant výpočetních sítí bylo dosaženo hodnoty ukazatele ortogonální kvality sítě více než 0,2 a hodnoty ukazatele maximální šikmosti buněk (*skewness*) méně než 0,80. Maximální poměr stran buněk v obou úlohách (*aspect ratio*) byl méně než 40, což je hodnota adekvátní použití polyhedrální sítě.

NASTAVENÍ CFD SIMULACE

Nastavení základních parametrů výpočtu, jako jsou fyzikální vlastnosti proudící tekutiny a okrajové podmínky, vychází z předchozích dvou studií společností Vítkovice ÚAM [1] a Hatch [2].

Z povrchu taveniny se při procesu legování uvolňují odpadní plyny, jejichž vlastnosti jsou obtížně zjistitelné. Předpokládá se však, že dominantní složkou odpadních plynů je dusík, který zaujímá přibližně 79 % jejich objemu. Z toho vyplývá, že fyzikální vlastnosti směsi škodlivin se příliš neliší od vlastností vzduchu [1]. Ve výpočtu bylo uvažováno, že odpadní plyny jsou mírně lehčí než vzduch, s molární hmotností o 5 % nižší, viz tab. 1. Vzduch i směs odpadních látek byly simulovány jako dvě nezávislé složky, mezi nimiž dochází k přenosu tepla. Nejprve byly uvažovány jako nestlačitelné ideální plyny. Po problémech s konvergencí úlohy bylo přistoupeno k simulaci s uvažováním stlačitelnosti obou složek (ideální plyny) což vedlo k lepší konvergenci.

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti vzduchu a odpadních plynů

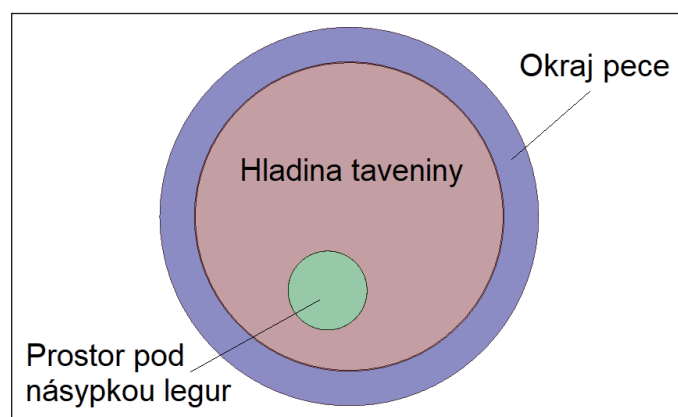
Tab. 1 Physical properties of air and waste gases

	c_p	μ	M_m
	[J/kg·K]	[Pa·s]·10 ⁵	[kg/kmol]
Vzduch	1006,4	1,815	28,97
Odpadní plyn	1006,4	1,789	27,52

S výpočetním modelem zařízení byla provedena řada simulací za účelem otestování použité metodiky a porovnání vlivu zvolených faktorů na účinnost odsávání. Výpočetní úlohy byly řešeny pro neizotermické ustálené proudění v gravitačním poli Země. Vliv turbulence byl aproximován s pomocí Reynoldsova rozkladu a průměrování Navier-Stokesových rovnic, tj. metodou RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) s využitím vybraného modelu turbulence $k-\varepsilon$. Byl uvažován vliv vztahu na rychlost disipace kinetické energie turbulence (*Full Buoyancy Effects*). Proudění v blízkosti stěn, tj. v oblasti mezních vrstev, bylo řešeno s pomocí rozšířených stěnových funkcí (*Enhanced Wall Functions*). Hodnota y^+ se na významných stěnách (např. stěna tavicí pece, víko pece, kryt víka, odsávací potrubí apod.) pohybovala v rozmezí od 20 do 116. Pro diskretizaci rovnice tlaku bylo zvoleno schéma PRESTO!, které je k dispozici pro simulaci směsí dvou a více složek a je doporučeno pro použití v úlohách s výrazným vlivem přirozené konvekce [3]. Pro konvektivní členy řešených rovnic bylo zvoleno protiproudé schéma druhého řádu (*Second Order Upwind*) a pro propojení tlakového a rychlostního pole v pohybových rovnicích algoritmus SIMPLE. Pro výpočet gradientů veličin v jednotlivých buňkách byla použita rekonstrukce založená na metodě nejmenších čtverců, která bez vyšších nároků na výkon počítače zajišťuje dostatečnou přesnost výsledků na polyhedrálních numerických sítích.

Základní nastavení výpočetního modelu vychází z měření, které bylo provedeno při legování taveniny pomocí CaSi [2]. Byla definována naměřená teplota na vnějším povrchu tavicí pece 180 °C a teplota povrchu taveniny 1550 °C. Dále jsou definovány teploty povrchu potrubí 275 °C a víka pece 250 °C. Prostup tepla konstrukcí nebyl řešen, vzhledem k experimentálně stanoveným teplotám významných povrchů. Teplota podlahy a okolního vzduchu byla uvažována 25 °C. Vzhledem k velmi vysokým teplotám odpadních plynů byly ostatní povrchy modelu zařízení s nízkou teplotou uvažovány jako adiabatické. Jedná se především o nosné konstrukce. Toto zjednodušení by nemělo mít výrazný vliv na výsledky simulací.

V průběhu procesu legování dosahuje celkový hmotnostní tok odpadních plynů z povrchu taveniny maximální hodnoty 1,41 kg/s. Teplota uvolňo-



Obr. 4 Okrajová podmínka na hladině taveniny, znázorněno vyčlenění oblasti pod násypkou legur

Fig. 4 Boundary condition at the melted steel surface, with indication of the area under the alloy hopper

Tab. 2 Nastavení hmotnostních toků odpadních plynů z hladiny taveniny

Tab. 2 Mass flow rates of waste gasses from the melted steel surface

	Hladina pod násypkou legur	Hladina taveniny (zbývající)
Plocha dané oblasti	0,57 m ²	7,93 m ²
konstantní vývoj na hladině taveniny	0,09 kg/s	1,32 kg/s
intenzivní vývoj pod násypkou legur	1,27 kg/s	0,14 kg/s

vaných odpadních plynů je uvažována stejná jako teplota povrchu taveniny, tj. 1550 °C. Byly simulovány dva případy vývoje škodlivin. V prvním případě (*konstantní vývoj na hladině taveniny*) byl uvažován konstantní hmotnostní tok odpadního plynu po celém povrchu taveniny. V druhém případě (*intenzivní vývoj pod násypkou legur*) bylo uvažováno, že 90 % odpadních plynů vzniká pod ústím násypky legur a zbývajících 10 % ve zbytku plochy hladiny taveniny. Toto uspořádání by mělo lépe odpovídat skutečnosti [1], kdy při legování taveniny dochází k intenzivní reakci a uvolňování odpadních plynů právě pod násypkou legur. Okrajová podmínka na povrchu taveniny byla rozdělena do dvou oblastí, viz obr. 4.

Nastavení hmotnostních toků na jednotlivých plochách pro obě varianty je uvedeno v tab. 2. Byla použita okrajová podmínka hmotnostního toku (mass flow inlet). Turbulence vystupujícího proudu byla definována pomocí délkového měřítka (0,05 m) a intenzity turbulence (15 %).

Objemový průtok plynu byl nastaven ve čtyřech režimech: základní průtok 13 000 m³/h (tj. skutečný objemový průtok před optimalizací reálného odsávacího zařízení), 30 000 m³/h, 40 000 m³/h a 50 000 m³/h. Jednotlivé varianty byly vzájemně porovnány. Srovnávacím ukazatelem byla především účinnost odsávání. Ta byla definována jako poměr hmotnostního toku škodlivin odvedených odsávacím zařízením a hmotnostního toku škodlivin uvolňovaných z taveniny.

Vzhledem k experimentálně získaným teplotám, které byly definovány jako okrajové podmínky významných povrchů, a vzhledem k převládajícímu vlivu konvekce na proudění v řešeném prostoru byl ve výpočetní úloze zanedbán přenos tepla radiací. Toto zjednodušení by nemělo mít výrazný vliv na výsledek simulace, resp. stanovené účinnosti odsávání použité jako hlavní ukazatel pro porovnání řešených variant.

VARIANTNÍ STUDIE ÚČINNOSTI ODSÁVÁNÍ

Simulace odsávacího systému tavicí pece byly nejprve provedeny se základním objemovým tokem potrubím 13 000 m³/h, přičemž byl zkoumán vliv následujících faktorů na konvergenci simulace a na účinnost odsávání:

- ☐ hustota numerické sítě,
- ☐ model turbulence,
- ☐ otevřená/uzavřená násypka legur.

Následně byla řešena variantní studie vlivu průtoku plynu odsávacím potrubím na účinnost odsávání, a to ve čtyřech případech nastavení úlohy:

- ☐ různé nastavení vývoje škodlivin z povrchu taveniny (*konstantní vývoj na hladině taveniny* vs. *intenzivní vývoj pod násypkou legur*),
- ☐ zjednodušení geometrie pod krytem víkem, viz obr. 2 (*model s nosnými traverzami* vs. *model bez traverz*).

Výsledky simulací byly vyhodnoceny shodným způsobem a v rámci jednotlivých studií vzájemně porovnány.

Vliv hustoty numerické sítě

Výpočet se základním objemovým tokem potrubím byl proveden pro dvě varianty numerické sítě, které jsou popsány výše – základní síť (hrubá síť)

a síť s buňkami o poloviční velikosti (jemná síť). Byly porovnány účinnosti odsávání, viz tab. 3. Dále byly porovnány obrazy proudění v obou úlohách.

Tab. 3 Porovnání účinnosti odsávání s hrubou a jemnou numerickou výpočetní sítí

Tab. 3 Comparison of the gas removal efficiency with coarse and fine numerical mesh

Varianta	Počet buněk	Účinnost odsávání
Hrubá síť	8,8·10 ⁶	39,6 %
Jemná síť	30,7·10 ⁶	40,8 %

Účinnost odsávání byla v obou případech přibližně stejná a obrazy proudění v řešeném prostoru nevykazovaly výraznější rozdíly. Je proto možné konstatovat, že výsledky jsou nezávislé na hustotě numerické sítě (tzv. *grid independent results*). Pro další simulace byla s ohledem na dostupnou výpočetní kapacitu a výrazně rychlejší průběh simulace použita síť s menším počtem buněk, tj. hrubá síť.

Vliv modelu turbulence

Důležitým faktorem při numerických výpočtech CFD simulací proudění kolem silných zdrojů tepla je zvolený způsob řešení turbulence. Existuje několik ověřených metod, jak přistupovat k výpočtu turbulentního proudění. V praktických výpočtech v oboru techniky prostředí se nejčastěji uplatňuje metoda RANS. Touto metodou jsou přímo počítány pouze střední hodnoty parametrů proudění a vliv turbulentních fluktuací je stanoven na základě některého z řady modelů turbulence. Pro tuto metodu byla postupně vyvinuta celá řada modelů turbulence lišících se výpočetní náročností a přesností. Přesto však neexistuje univerzální model, který by mohl být použit ve všech aplikacích [4].

Souhrn běžně využívaných modelů turbulence $k-\varepsilon$ uvádí např. Zhai et al. [4]. Základní $k-\varepsilon$ model (tzv. model $k-\varepsilon$ *Standard*) byl navržen Laundrem a Spaldingem [5] a je vhodný pro proudění o vyšších hodnotách turbulentních Reynoldsových čísel. Model turbulence dle Yakhota a Orszaga [6] (tzv. model RNG $k-\varepsilon$) poskytuje o něco lepší výsledky při simulaci uzavřených prostor. Model turbulence dle Shiha et al. [7] (tzv. model $k-\varepsilon$ *Realisable*) je pak vhodný pro simulace prostředí s vířivým či konvekčním prouděním a pro simulace odtržení proudu.

Byla provedena variantní studie vlivu těchto tří základních modelů turbulence $k-\varepsilon$ na konvergenci simulace. Byla porovnána rezidua rovnice kontinuity, která dosahovala ve všech simulacích nejvyšších hodnot, viz tab. 4.

Tab. 4 Porovnání hodnot reziduí rovnice kontinuity

Tab. 4 Comparison of the continuity equation residual values

Model turbulence	Hodnota rezidua
$k-\varepsilon$ <i>Standard</i>	8,02·10 ⁻²
$k-\varepsilon$ <i>RNG</i>	Úloha divergovala
$k-\varepsilon$ <i>Realisable</i>	2,05·10 ⁻³

Hodnoty reziduí rovnice kontinuity u základního modelu $k-\varepsilon$ *Standard* dosahovaly řádu 10⁻², což je nedostačující (požadovaný řád hodnot by měl být alespoň 10⁻³). Model $k-\varepsilon$ *RNG* není možné pro řešení dané úlohy použít, výpočet bezprostředně po spuštění simulace divergoval. Pro daný případ je nejvíce vhodný model turbulence $k-\varepsilon$ *Realisable*, který byl použit v následujících simulacích.

Pro další zlepšení konvergence by bylo vhodné úlohu řešit v nestacionární stavu, což bylo ovšem v daném případě velmi problematické,

s přihlédnutím k dostupným výpočetním kapacitám ve Strojírenském vědeckotechnickém parku Buštěhrad (příliš dlouhý průběh výpočtu srovnatelně rozsáhlých úloh, nevhodný pro následné využití CFD simulací při projekční praxi a potřebu dosažení výsledků v rozumném časovém horizontu).

Vliv uzavření násypky legur

Účinnost odsávání odpadních plynů může být dále ovlivněna otevřením (popř. uzavřením) násypky legur, přes kterou by mohla část škodlivin unikat do volného prostoru. Simulace v základním nastavení byla provedena pro oba případy – otevřená a uzavřená násypka legur. Výsledné účinnosti odsávání jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Účinnost odsávání pro otevřenou a uzavřenou násypku legur

Tab. 5 Gas removal efficiency for open and closed alloy hopper

Násypka legur	Účinnost odsávání
Otevřená	37,9 %
Uzavřená	39,6 %

Účinnost odsávání je v případě uzavření násypky legur o 1,7 % vyšší. Lze tedy konstatovat, že část objemového toku škodliviny uniká skrz násypku do volného prostoru, přestože otevření násypky legur nemá významný vliv. Vzhledem ke snaze zvýšit účinnost systému byly další výpočty řešeny s uzavřenou násypkou legur.

Vliv nastavení okrajové podmínky vývoje škodlivin a průtoku

Správné nastavení hmotnostního toku škodlivin uvolňovaných z hladiny taveniny může mít vliv na účinnost odsávání odpadních plynů. Studie vlivu tohoto faktoru byla provedena pro čtyři různé objemové průtoky plynu v rozmezí 13 000 m³/h až 50 000 m³/h.

Byly porovnány simulace s uvažováním *konstantního vývoje škodlivin na hladině taveniny* (při kterém úloha lépe konverguje) se simulacemi s *intenzivním vývojem škodlivin pod násypkou legur*, viz tab. 6.

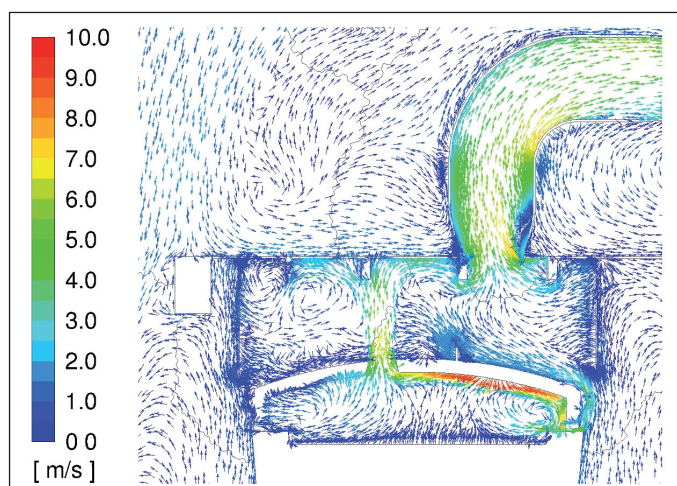
Tab. 6 Účinnost odsávání při konstantním vývoji škodlivin na hladině taveniny a při intenzivním vývoji škodlivin pod násypkou legur

Tab. 6 Gas removal efficiency for constant generation of pollutants on the melted steel surface and for intensive development of pollutants under the alloy hopper

Objemový průtok plynu [m ³ /h]	Účinnost odsávání	
	Konstantní vývoj na hladině taveniny	Intenzivní vývoj pod násypkou legur
13 000	39,7 %	32,6 %
30 000	60,0 %	47,3 %
40 000	67,8 %	58,9 %
50 000	77,8 %	64,6 %

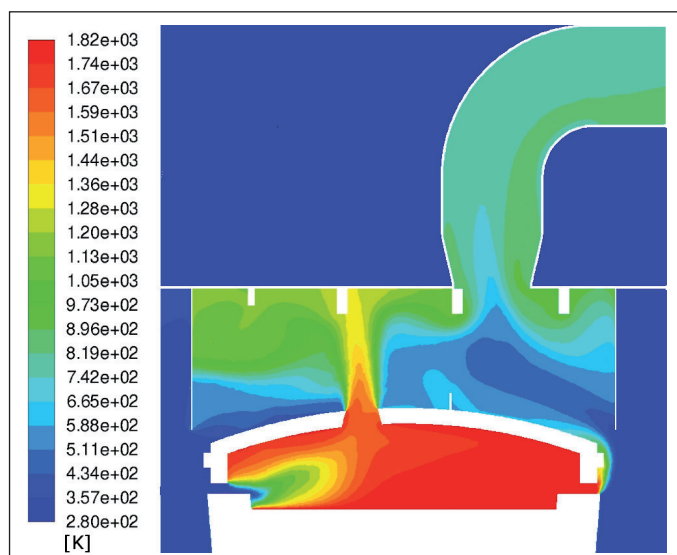
Z výsledků je patrné, že nastavení okrajové podmínky definující vývoj škodlivin na hladině taveniny má výrazný vliv na výsledek simulace. Při uvažování konstantního vývoje škodlivin na hladině taveniny je účinnost odsávání vyšší o 7 až 13 %. Rozdíl v účinnosti je nejvýraznější při objemovém průtoku 30 000 m³/h. Vzhledem k dosažení správných výsledků proto nelze vývoj škodlivin uvažovat konstantní a v dalších úlohách byl brán v úvahu intenzivní vývoj škodlivin pod násypkou legur.

Model byl validován při základním objemovém průtoku větracím systémem 13 000 m³/h (při kterém probíhalo měření) pro případ intenzivního vývoje škodlivin pod násypkou legur. Hodnota účinnosti odsávání reálného zaří-



Obr. 5 Vektory rychlostí v prostoru nad tavicí pecí

Fig. 5 Velocity vectors in the space above the steel processing ladle



Obr. 6 Teplotní pole v prostoru nad tavicí pecí

Fig. 6 Temperature field in the space above the steel processing ladle

zení pro tento případ byla stanovena na základě předchozího měření [2] a činí 33,5 %. V provedené simulaci byla účinnost odsávání 32,6 %, což odpovídá účinnosti reálného odsávacího systému v řešeném zařízení.

Teplotní pole a vektory rychlostí pro tuto variantu jsou pro ukázkou znázorněny na obr. 5 a obr. 6. Je možné pozorovat všesměrový charakter odsávacího otvoru a význam krytu víka, do kterého je zachycen únik škodlivin mezerou mezi tavicí pecí a víkem pece na pravé straně zařízení.

Dále byl prokázán vliv objemového průtoku plynu na účinnost odsávání. Bylo ověřeno, že se vzrůstajícím objemovým průtokem účinnost odsávání stoupá.

Vliv zjednodušení geometrie pod krytem víka

Na proudění odsávacím systémem a účinnost odsávání může mít vliv i geometrie zařízení, například dimenze potrubí nebo překážky. V tomto případě je pozornost zaměřena na geometrii oblasti pod krytem víka, do které zasahují nosné traverzy konstrukce. Ty byly pro jednu sérii výpočtů odstraněny s cílem zjistit, jak tato geometrická úprava ovlivní účinnost odsávání. Ve výpočetních úlohách byl uvažován intenzivní vývoj škodlivin pod násypkou legur a čtyři různé objemové průtoky potrubím.

Z výsledků v tab. 7 je patrné, že při nižším objemovém toku (první a druhý případ) je vliv zjednodušení geometrie pod krytem víka zanedbatelný. Se zvyšujícím se průtokem (třetí a čtvrtý případ) rozdíl v účinnosti odsávání narůstá. Výsledné účinnosti se nicméně liší o max. 2 %, a je proto možné konstatovat, že traverzy zasahující pod kryt víka nemají na účinnost odsávání výrazný vliv.

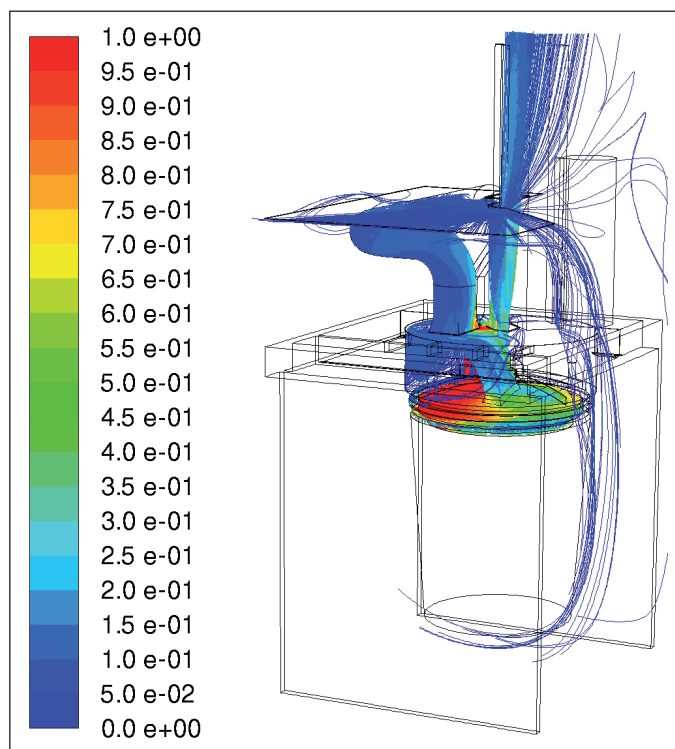
Tab. 7 Účinnost odsávání při zachování a odstranění nosných traverz pod krytem víka pece

Tab. 7 Gas removal efficiency while retaining and removing supporting girders under the cover of the furnace lid

Objemový průtok plynu [m³/h]	Účinnost odsávání	
	Zachované traverzy pod krytem víka	Odstarané traverzy pod krytem víka
13 000	32,4 %	32,6 %
30 000	47,5 %	47,3 %
40 000	56,7 %	58,9 %
50 000	66,5 %	64,6 %

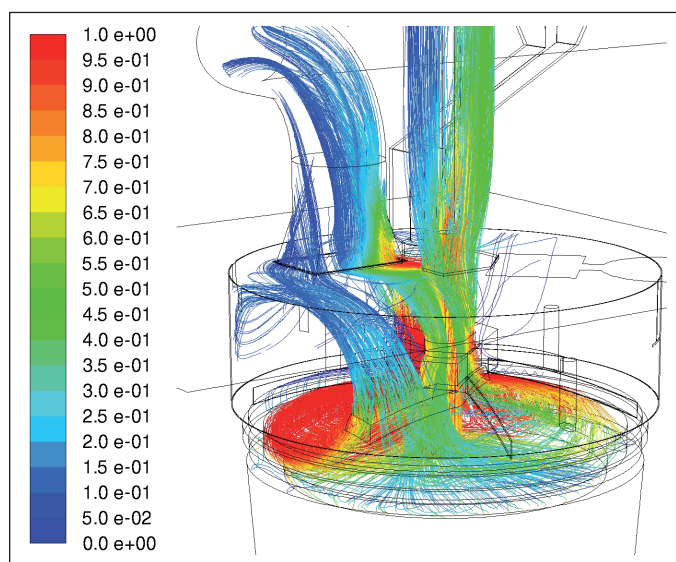
Nejvyšší dosažená účinnost odsávání v případě *intenzivního vývoje škodlivin pod násypkou legur* (který byl uvažován jako bližší skutečnosti) byla dosažena při průtoku plynu 50 000 m³/h a činí 66,5 %. Tato účinnost je však nedostatečná – dle platných norem by měla být účinnost odsávání alespoň 90 % [8]. Odsávací systém by měl být dále optimalizován. Výsledky simulace při daném objemovém průtoku byly proto vyhodnoceny graficky za účelem návrhu dalších úprav zařízení.

Na obr. 7 je zobrazeno šíření odpadních plynů uvolňovaných z povrchu taveniny. Na obr. 8 je v detailu zobrazen prostor mezi krytem víka a víkem tavicí pece. Větší část škodlivin vstupuje do odsávacího potrubí. Je však možné pozorovat významný únik odpadních plynů do prostoru průmys-



Obr. 7 Šíření uvolňovaných škodlivin (barevně rozlišen hmotnostní podíl odpadních plynů)

Fig. 7 Propagation of released pollutants (colours indicate mass fraction of waste gases)



obr. 8 Detail šíření škodlivin z krytu víka (barevně rozlišen hmotnostní podíl odpadních plynů)

Fig. 8 Detail of released pollutants propagation from the cover of the lid (colours indicate mass fraction of waste gases)

lového provozu, a to otvorem pro technologické sondy v prostoru krytu víka pece. Odpadní plyny dále stoupají vlivem vzlakových sil ke stropu místnosti, část z nich je zachycena pod pochozí plošinou zařízení. Bylo by vhodné tento otvor alespoň částečně zakrýt a únik škodlivin tak omezit.

Účinnost odsávání by mohla být zvýšena využitím vstupního nástavce odsávacího potrubí, ústícího přímo do oblasti hlavního proudu odpadních plynů, který stoupá otvory ve víku tavicí pece.

ZÁVĚR

Prezentované výsledky jsou součástí probíhající analýzy stávajícího odsávacího systému v průmyslovém provozu mimopecního zpracování oceli společnosti US Steel Košice. Získaná metodika bude sloužit pro navazující práci ve Strojírenském vědeckotechnickém parku Buštěhrad v oblasti CFD simulací obdobných průmyslových provozů.

Bylo vypracováno několik numerických CFD studií se zaměřením na faktory, které mohou mít vliv na simulaci odsávacího systému daného zařízení.

V první části výzkumu byly provedeny simulace se základním objemovým průtokem plynu 13 000 m³/h, tj. s reálným nastavením před optimalizací skutečného odsávacího systému v řešeném průmyslovém provozu.

Byly stanoveny optimální parametry výpočetní sítě a byla ověřena nezávislost výsledků simulace na její hustotě. Bylo ověřeno, že je možné použít hrubší výpočetní síť o celkovém počtu 8,8 milionů buněk.

Byly srovnávány simulace se třemi běžnými modely turbulence $k-\epsilon$ (Standard, RNG, Realisable). Vyhodnocení bylo zaměřeno na konvergenci výsledků jednotlivých úloh, srovnávacím kritériem byly hodnoty reziduí rovnice kontinuity. Pro daný typ úlohy je nejvhodnější model $k-\epsilon$ Realisable, který vykazoval nejnižší hodnoty reziduí a nejlepší konvergenci při výpočtu úlohy a byl použit pro všechny následné simulace. Pro další zlepšení konvergence by bylo vhodné úlohu řešit v nestacionární stavu, což bylo ovšem v daném případě velmi problematické, s přihlédnutím k dostupným výpočetním kapacitám.

Ze studie vlivu uzavření násypky legur je patrné, že vyšší účinnosti systému je dosaženo při jejím uzavření. Rozdíl účinností odsávání je nicméně pouze 1,7 % a otevření násypky legur tedy nemá významný vliv na účinnost odsávání.

Následná část výzkumu byla zaměřena na vliv nastavení okrajové podmínky definující vývoj škodlivin na hladině taveniny, nastavení objemového průtoku odsávacím potrubím a členitosti geometrie pod krytem víka. Všechny simulace byly provedeny pro 4 různé objemové průtoky plynu v rozsahu od 13 000 do 50 000 m³/h, reálně dosažitelné v řešeném zařízení.

Z výsledků je patrné, že správné nastavení okrajové podmínky vývoje škodlivin z taveniny má významný vliv na výsledek simulace. Při uvažování konstantního vývoje škodlivin na hladině taveniny je účinnost odsávání vyšší o 7 až 13 %. Vzhledem k dosažení správných výsledků musí být brán v úvahu intenzivní vývoj škodlivin pod násypkou legur (tj. vývoj škodlivin nelze uvažovat konstantní na celé hladině).

Bylo zjištěno, že se zvyšujícím se objemovým průtokem výrazně narůstá i účinnost odsávání. Dále bylo zjištěno, že členitost geometrie pod krytem víka pece (přítomnost nosných traverz konstrukce zařízení) nemá na účinnost odsávání významný vliv.

Model by validován při základním objemovém průtoku větracím systémem 13 000 m³/h pro případ intenzivního vývoje škodlivin pod násypkou legur. Hodnota účinnosti reálného zařízení pro tento případ byla stanovena na základě předchozího měření [2] a činí 33,5 %. V provedené simulaci byla účinnost odsávání 32,6 %, což řádově odpovídá účinnosti reálného odsávacího systému v řešeném zařízení.

Nejvyšší dosažená účinnost odsávání v případě intenzivního vývoje škodlivin pod násypkou legur byla dosažena při průtoku plynu 50 000 m³/h a činí 66,5 %. Tato účinnost je však nedostatečná. Dle platných norem by měla být účinnost daného zařízení alespoň 90 % [8] a zařízení by mělo být dále optimalizováno. Na základě grafického vyhodnocení CFD simulace byly navržena dvě možná opatření, která by mohla vést k dalšímu zvýšení účinnosti odsávání a dosažení účinnosti dle platných norem:

- ☐ směrový vstupní nástavec do odsávacího potrubí,
- ☐ částečné zakrytí otvoru pro technologické sondy.

V návaznosti na tuto práci budou provedeny variantní simulace zohledňující výše uvedená opatření. Dále budou řešeny simulace s uvažováním vlivu prachových částic.

Kontakt na autora: kristyna.svandova@pzse.cz

Poděkování: Tato studie je řešena za finanční podpory Evropské unie, Evropského fondu pro regionální rozvoj, v rámci projektu Operačního programu Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost č. CZ.01.1.02/0.0/0.0/16_054/0009226 „Odsávání škodlivin v průmyslových provozech“.

Použité zdroje:

- [1] Vítkovice ÚAM. *Technická zpráva: Analýza ventilačního systému mimopecního zpracování oceli*. Archivní číslo V3127, 2015.
- [2] HATCH. *Technická zpráva LM2-2: Analysis of Ventilation System Performance – Final Report*. Archivní číslo H347406-0000-05-124-0001, Rev. A, 2014.
- [3] ANSYS. *Ansyst Fluent 18.0 Documentation*. ANSYS, 2017.
- [4] ZHAI, Z. J., ZHANG, Z., ZHANG, W., YAN, Q. Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 1 — Summary of Prevalent Turbulence Models. *HVAC&R Research*. 2007, vol. 13, no. 6, pp. 853–870.
- [5] LAUNDER, B. E., SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Energy*. 1974, no. 3, pp. 269–289.

- [6] YAKHOT, V., ORSZAG, S. A. Renormalization group analysis of turbulence. *Journal of Scientific Computing*. 1986, vol. 1, pp. 3–51.
- [7] SHIH, T., LIOU, W., SHABBAR, A., YANG, Z., ZHU, J. A new eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*. 1995, vol. 24, pp. 227–238.
- [8] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU o průmyslových emisích pro výrobu železa a oceli [online]. Dostupné z: <https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/%24%24OpenDominoDocument.xsp?documentId=69F6D3CD-18B5566DC1258010004242E6&action=openDocument>

Seznam označení:

c_p	měrná tepelná kapacita při stálém tlaku [J/kg·K]
k	kinetická energie turbulence [m^2/s^2]
M_m	molární hmotnost [kg/kmol]
y^+	bezrozměrná vzdálenost od stěny [-]
ε	rychlost disipace kinetické energie turbulence [m^2/s^3]
μ	dynamická viskozita [Pa·s]

Ze zahraniční literatury

Kazak, J. K. a J. van Hoof:

Decision Support Systems for a Sustainable Management of the Indoor and Built Environment

(Systémy pro podporu rozhodování pro udržitelnou správu vnitřního a zastavěného prostředí)

Indoor and Built Environment, 2018, 27(10), s. 1303–1306

S pokračujícím zvyšováním výpočetního výkonu a neustálým rozvojem informačních a komunikačních technologií se běžnou součástí našich životů postupně stávají skutečnosti, které by v ještě relativně nedávné minulosti odpovídaly spíše představám autorů vědeckofantastického žánru než právě realitě.

Chytré mobilní telefony a další podobná zařízení zaujímají v rámci této společnosti stabilní místo. Jejich (v případě některých jedinců takřka neustálé) používání se pro řadu z nás stalo takovou přirozeností, jakou jsou v našich zeměpisných končinách každodenní východy a západy slunce.

Podstatně složitější a komplexnější záležitostí jsou koncepce tzv. chytrých domácností a chytrých měst. V rámci nich se uplatňují vysoce sofistikované postupy, jež jsou navázány na hlubší poznatky z nejrůznějších vědeckých a technických disciplín.

Aby však mohly být správně navrženy a následně pracovaly skutečně efektivně, neobejdou se bez systémů, které svým uživatelům poskytují podporu v rámci rozhodovacích procesů. Co se pod tímto, na první pohled možná hůře uchopitelným slovním spojením skrývá? Tzv. **DSSs** (z anglického **Decision Support Systems** neboli **systémy pro podporu rozhodování**; v našem konkrétním případě pak takové DSSs, které slouží udržitelné správě vnitřního a zastavěného prostředí) jsou počítačové systémy, které jsou v krátkém časovém období schopné analyzovat obrovská kvanta vstupních dat a na výstupu za ně „na oplátku“ poskytnou návrhy možných přístupů k řešení a realizaci souvisejících problémů (pro bližší popis a vysvětlení této oblasti čtenáře odkazujeme na originální článek, z něhož jsme čerpali, a případně také na další odbornou literaturu vztahující se k této problematice).

A tak tedy – právě s využitím těchto technologií – dnes již dokážeme velice dobře predikovat například také to, jakým uspořádáním a nastavením vytápěcích, ventilačních a vzduchotechnických systémů dosáhnout v konkrétní obytné místnosti optimální teploty a vlhkosti vzduchu, jak vyvážit různou kvalitu mikroklimatu ve velkých vnitřních prostorách, v nichž je zcela běžnou záležitostí nerovnoměrné rozložení různě „kvalitního“ vzduchu, či jakou energetickou náročnost budovy lze očekávat po specifickém způsobu rekonstrukce její fasády, navíc třeba i spojené s výměnou oken.

Potenciál těchto úžasných nástrojů dost možná leží až za horizontem našich, v současnosti nejbujnějších představ. I nadále však v celém procesu hraje stěžejní a rozhodující úlohu člověk. Nakonec je to on, který z variant předložených programem vybere tu, která se bude realizovat.

(Kom)

DESIGN DO VAŠÍ KOUPELNY

KORALUX A KORATHERM AQUAPANEL



- široký sortiment typů a rozměrů
- v provedení pro teplovodní i kombinované vytápění
- krajní či středové připojení
- více než 200 barevných odstínů ze vzorníku RAL
- vyrobeno z kvalitní oceli s prodlouženou zárukou 5 let



KORADO®