International Conference
ENGINEERING MECHANICS 2010
Svratka, Czech Republic, May 10 – 13, 2010

EXTERNAL AERODYNAMICS OF RAIL VEHICLES

M. Schuster*

Summary: *This paper is a short overview of engineering approach to study rail vehicles aerodynamics and aerodynamic interaction between the trains and vicinity infrastructures. Short list of railway aerodynamic research topics is showed - aerodynamic effects of moving vehicles and passing trains, train slipstream effects, pressure pulses on train passage through a tunnel, cross-wind effect, etc. The contribution deals with an industrial application of the Computational Fluid Dynamics (CFD) method in this field. Chances and possibilities to simulate aerodynamic load of rail vehicles during various operating regimes and situations are shortly discussed.*

1. Úvod

Vývoj moderních kolejových vozidel v sobě nutně zahrnuje i výzkum v oblasti aplikované mechaniky. Aerodynamika kolejových vozidel přináší řadu úloh pro výzkumné a vývojové práce. V poslední době má stoupající tendenci zájem o sledování aerodynamických jevů souvisejících s provozem vozidel. Efekty spojené s prouděním a obtékáním přináší řadu podnětů pro jejich analýzu a pro výzkum jejich příčin a možných vlivů na konstrukci a provoz vozidel. Otázky spojené s jízdou vozidel za různých provozních režimů, s míjením protijedoucích vozidel, s vlivy na směrovou stabilitu a dynamiku vozidel jsou řešeny experimentálními a výpočetními metodami.

Rozvoj výpočetní techniky a výpočetních metod umožnil využití numerických simulací proudění v technickém výzkumu úzce spojeném s řešením inženýrských úkolů při návrhu a konstrukci vozidel. Simulace pomocí komerčních CFD systémů tak umožňují řešit komplexní úlohy na složitých tvarových geometriích výpočtových oblastí, navíc vše pro řadu variant tvarů a/nebo provozních parametrů. Cílem prací je přispět ke zvýšení bezpečnosti a komfortu jízdy a ke snížení negativních vlivů provozu na okolí.

Příspěvek je zaměřen na shrnutí současných poznatků výzkumu aerodynamiky vozidel a aerodynamické interakce vozidel a jejich okolí.

V příspěvku je uveden stručným přehled úloh řešených na pracovišti ŠKODA VÝZKUM s.r.o. pomocí CFD systému FLUENT v rámci dotovaných výzkumných projektů a na základě prací pro dopravní průmysl.

* Dr. Ing. Milan Schuster: ŠKODA VÝZKUM s.r.o.; Tylova 1/57; 316 00 Plzeň; tel.: +420.379 852 209, fax: +420.378 134 291; e-mail: milan.schuster@skodavyzkum.cz

2. Přehled jevů aerodynamiky kolejových vozidel

Příspěvek se věnuje problematice pozemních dopravních prostředků určených pro hromadnou dopravu, je zaměřen na železniční kolejová vozidla a na vozidla městských pouličních drah, je věnován výzkumu vysokorychlostních i tzv. pomalých vozidel a souprav. Obecně jsou současné výzkumy v oblasti aerodynamiky kolejových vozidel zaměřeny zejména na řešení aerodynamického zatížení vozidla a jeho konstrukčních prvků, na zkoumání vlivu jedoucího vozidla (vlaku) na okolí a na postupy vedoucí k vyšší bezpečnosti provozu a komfortu jízdy.

Současné postupy a stav ve výzkumu interakce a aerodynamických účinků na vozidla jsou dány zejména fyzikální podstatou zkoumaného jevu (obtékání, boční vítr, míjení) a druhem vozidla (tvar vozidla, jeho určení, cestovní rychlost, režim jízdy).

Experimentální výzkum je směrován na měření aerodynamických charakteristik vozidla. Měření jsou prováděna buď na skutečných vozidlech za provozu na trati nebo na modelech v různých měřítcích v experimentálních aerodynamických tunelech. Výzkum za pomoci počítačových simulací je zaměřen na modelování skutečných dějů za provozu (možnost variant tvaru vozidel, podmínek jízdy a vlastností okolního prostředí). Výzkumné modely vozidel jsou různě zjednodušených tvarů reálného vozidla nebo jednoduchého fiktivního tvaru hypotetického vozidla pro studijní účely.

Aerodynamické zatížení a interakce je silové působení mezi tělesy zprostředkované nebo způsobené proudícím vzduchem. Z hlediska příčin vzniku a fyzikálního mechanizmu přenosu silových účinků lze děje aerodynamického působení rozdělit do hlavních skupin:

- pohyb a míjení vozidel,
- vliv větru, poryv, boční vítr,
- tlakové vlny,
- akustika.

Pro řešení je důležité, že se jedná o nestacionární, časově proměnné děje, u kterých významnou roli hraje pohyb vozidel, jejich směr a rychlost, směr a intenzita větru, prostorové poměry, úplav za vozidly aj.

Silové účinky aerodynamického namáhání a přídavné (tlakové) pulsní zatížení mají vliv na základní vlastnosti vozidla a na režim jeho jízdy, těmito vlivy jsou zejména ovlivněny:

- dynamika vozidel (zatížení konstrukčních prvků),
- směrová stabilita vozidla při účinku bočního větru,
- přídavné zatížení karoserie a detailů (pulsy),
- vznik aerodynamického hluku (vírový úplav ap.),
- výkon pohonné jednotky, spotřeba paliva.

3. Počítačové simulace pro technické úlohy aerodynamiky

Počítačové simulace aerodynamických jevů dovolují při vývoji vozidel relativně rychle a přesně řešit obrovské množství konstrukčních variant vozidla a různých provozních režimů. Komerční CFD výpočetní systémy umožňují řešit tvarově komplikované geometrie a nastavit potřebné podmínky úlohy tak, aby se velmi přiblížily reálné situaci a pracovním režimům, pro které je zkoumané zařízení projektováno.

Výpočtový model technické úlohy obsahuje všechny podmínky pro zadání numerické simulace a charakterizuje řešenou úlohu:

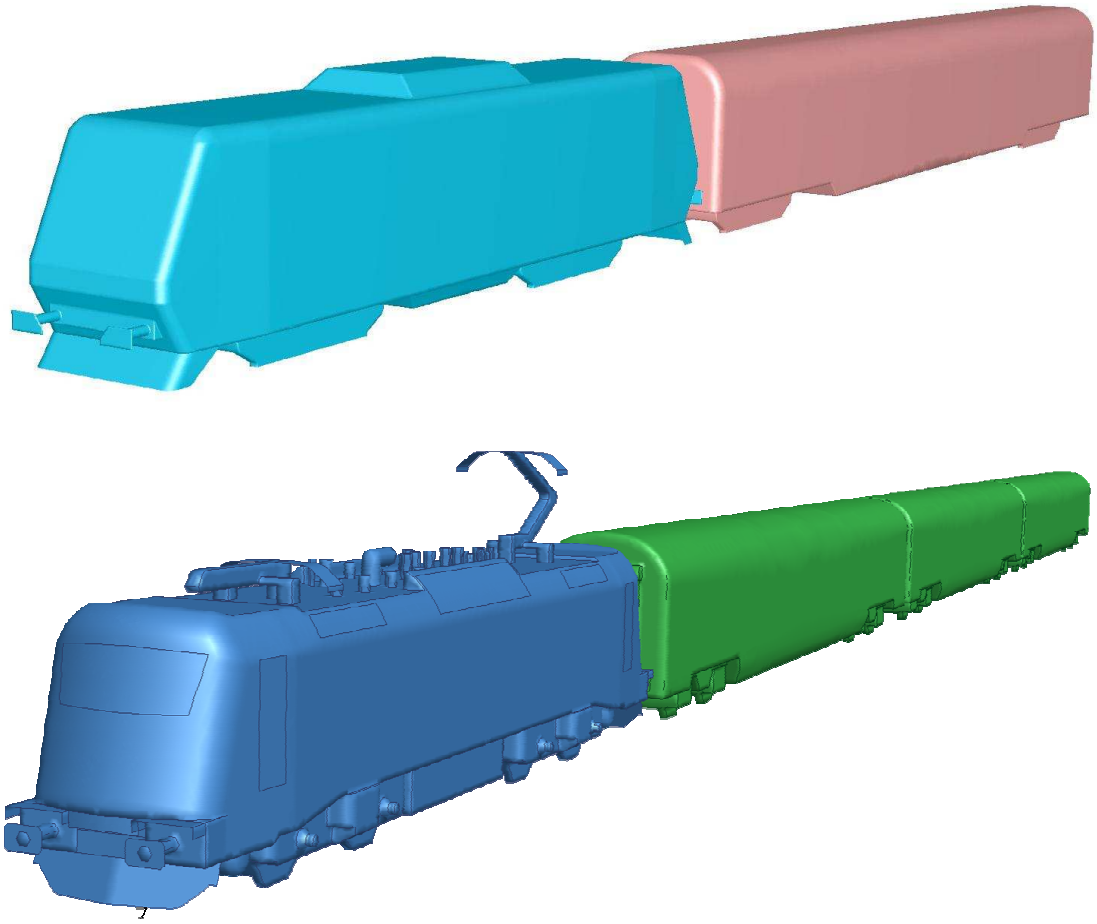
- geometrie tvaru výpočtové oblasti, výpočetní síť,
- typy a parametry okrajových a počátečních podmínek,
- materiálové vlastnosti proudících medií (v tomto případě většinou vzduch),
- zvolené numerické modely (turbulence, vícefázové proudění, přenos tepla ap.),
- parametry pro nastavení iteračního procesu a konvergenci výpočtu.

Inženýrsko-technická zjednodušení jsou fakticky oprávněna v oblasti:

- zahrnutí pouze aerodynamicky významných detailů povrchu nebo stěn interiérů vozidel,
- určení významných hodnot provozních parametrů nastavených pro simulace.

Inženýrským přístupem k řešení CFD úloh tedy chápejme souhrn úkonů, které zajistí v relativně snesitelném čase vyřešit s relativně snesitelným zjednodušením nebo omezením konkrétní technický úkol proudění a sdílení tepla s relativně snesitelnými výsledky.

Při simulacích vnějšího obtékání vozidel jsou plochy povrchu vozidel zjednodušeny na snesitelnou úroveň a upraveny pro potřeby CFD simulací, na obr. 1 jsou některé příklady.



Obr. 1: Modely povrchu kolejových vozidel pro CFD analýzu

Výpočetní síť musí adekvátním způsobem vyplnit prostor výpočtové oblasti. O tvaru a počtu elementů sítě rozhoduje tvarová členitost oblasti (povrch vozidla, interiéru), existence nutných detailů a rozměrové měřítko (velikost vstupních ventilačních otvorů na povrchu vozidla vzhledem k velikosti vozidla) ap. V příspěvku jsou uvedeny většinou 3D-úlohy tvarově komplikované, u kterých je použita vždy nestrukturovaná síť, která je tvořena 3D elementy typu čtyřstěn (homogenní síť), popř. heterogenní síť navíc ještě s elementy šestistěn a pyramida. Diagnostika výpočetní sítě obsahuje nástroje pro kontrolu tvaru, zkosení, hustoty popř. velikosti elementů sítě včetně hodnotových kritérií pro rozhodování o kvalitě elementů a sítě.

4. Zadání úloh aerodynamiky

Řešené úlohy z oblasti kolejových vozidel zahrnovaly širokou škálu provozních režimů a konstrukčních úprav. Zadání úloh odpovídalo jednak požadavkům výrobců a provozovatelů a také podmínkám norem nebo různým kontrolním scénářům pro ověření interoperability kolejových vozidel (ČSN EN 14067, předpisy TSI). Úlohy je možné rozdělit na dvě velké skupiny:

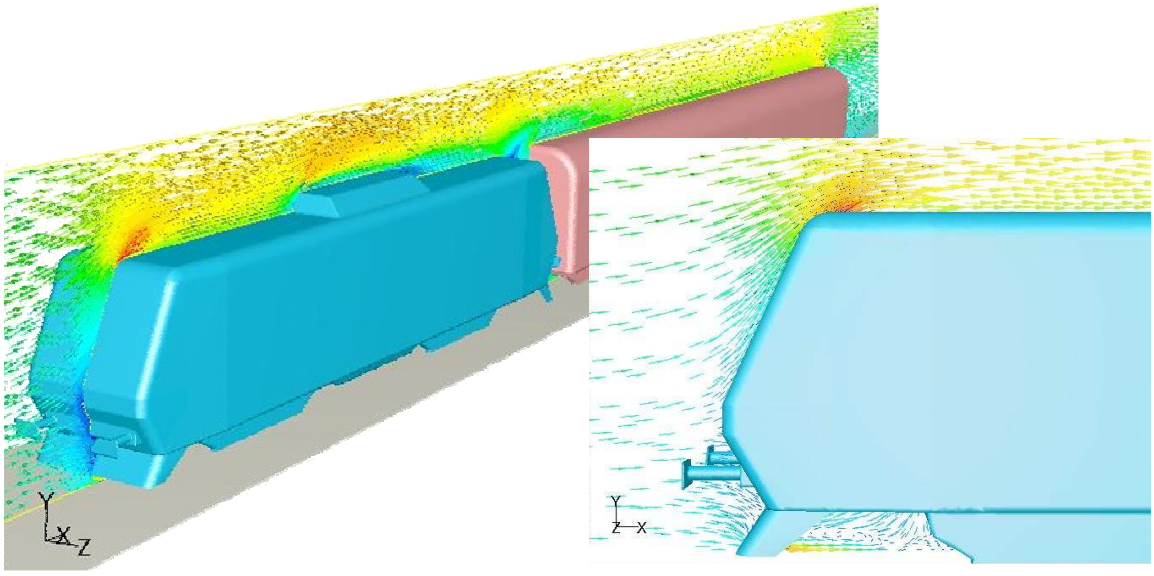
- obtékání vozidel (vnější aerodynamika).
- interakce vozidel s okolím.

5. Vnější aerodynamika

Vnější aerodynamika má vliv na jízdní vlastnosti a efektivitu provozu kolejových vozidel a vlakových souprav. Simulují se podstatné podmínky aerodynamického zatížení, které mohou nastat za různých provozních režimů. Aerodynamické síly, které vznikají při jízdě vozidla s cestovní rychlostí v rozmezí 150 - 250 km/h, ovlivňují velikost nutného výkonu pohonných jednotek, stabilitu vozidla, přídavné zatížení karoserie a detailů na povrchu vozidel.

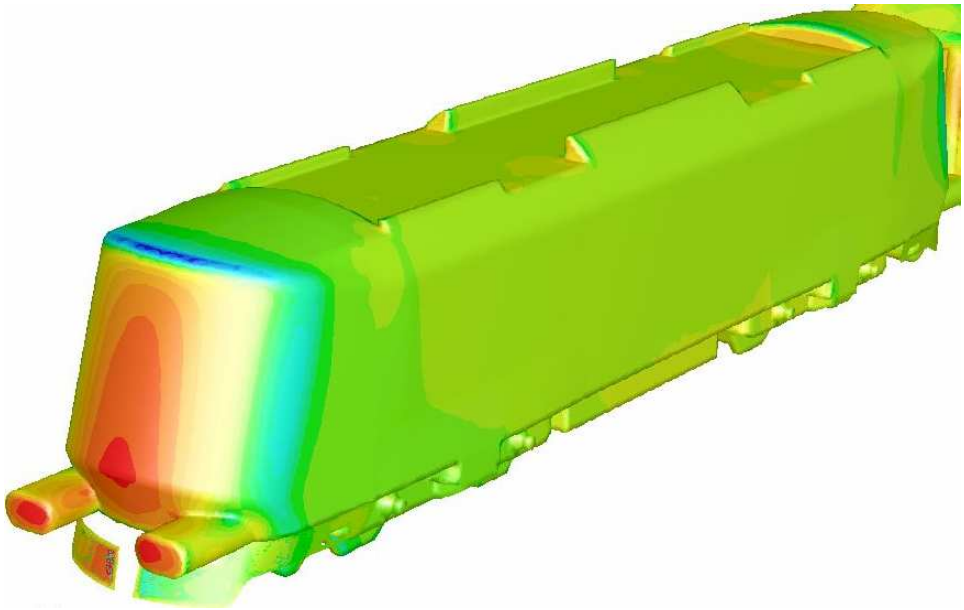
Simulace jízdy vozidla v otevřené krajině byly uspořádány ve formě virtuálního aerodynamického tunelu, tzn. model nepohyblivého vozidla byl umístěn ve výpočtové oblasti a relativní pohyb mezi vozidlem a okolním prostředím byl dán parametry okrajové podmínky na vstupní ploše výpočtové oblasti. Pro využití této metody jsou důležité parametry ovlivňující „upočítatelnost“ těchto úloh: velikost výpočtové oblasti a složitost povrchu vozidla.

Pro ověření výběru vhodných typů a vhodného nastavení hodnot okrajových podmínek pro virtuální aerodynamický tunel byly provedeny jednoduché výpočetní testy zaměřené na porovnání způsobů modelování relativního pohybu mezi jedoucím vozidlem a obtékajícím vzduchem. Pro model stojícího vozidla byly porovnávány výsledky pro různé kombinace parametrů okrajové podmínky na stěnách výpočtové oblasti: „wall“, „moving-wall“, „pressure-outlet“, aj. Také byly porovnávány výsledky simulací jedoucího vozidla (podmínka „sliding-mesh“) a výsledky pro stojící ofukované vozidlo ve virtuálním tunelu.



Obr. 2: Obtékání modelu soupravy vlaku

(rozložení vektorů rychlosti v rovině symetrie – celek a detail)

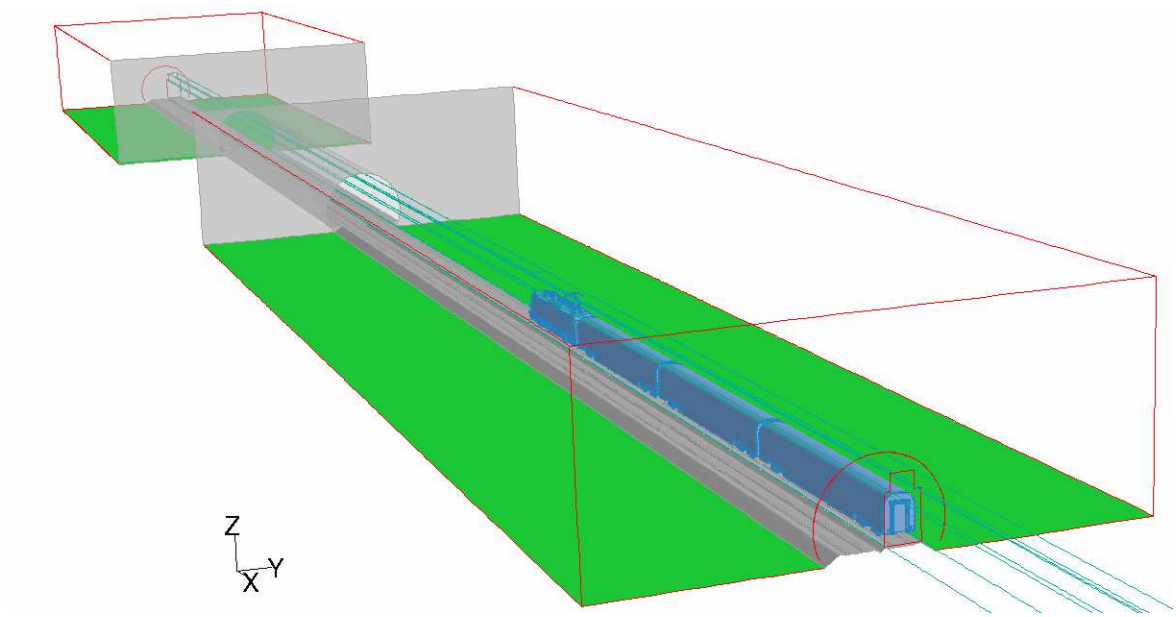


Obr. 3 Rozložení tlaku na povrchu zjednodušeného modelu prototypu lokomotivy

Výsledky simulací umožnily rozhodnout o vhodných tvarech čelní části kolejových vozidel (sklon ploch čela, přechody, zaoblení čelních ploch, tvarování detailů), vhodně umístit a tvarovat vstupy/výstupy klimatizace na povrchu vozidla, posoudit aerodynamické zatížení detailů na povrchu atd. Vybrané ilustrativní příklady jsou na obr. 2 a 3.

6. Aerodynamická interakce

Mezi významné vlivy na aerodynamické zatížení jedoucích kolejových vozidel mimo vlastního odporu vzduchu při jízdě patří jevy dané aerodynamickou interakcí s okolím. Vzájemné míjení vlaků, míjení okolních staveb, nástupišť, vjezd a průjezd tunelem, vlivy bočního větru, jízda okolo protihlukových bariér nebo terénním zářezem a další, specifikují způsob aerodynamického zatížení nejvíce exponovaných částí vozidla. Nemalou důležitost hraje naopak účinek projíždějícího vozidla na okolí, např. tlakové pulsy působící na osoby nebo předměty v blízkosti tratě, v neposlední řadě také generace aerodynamického hluku.

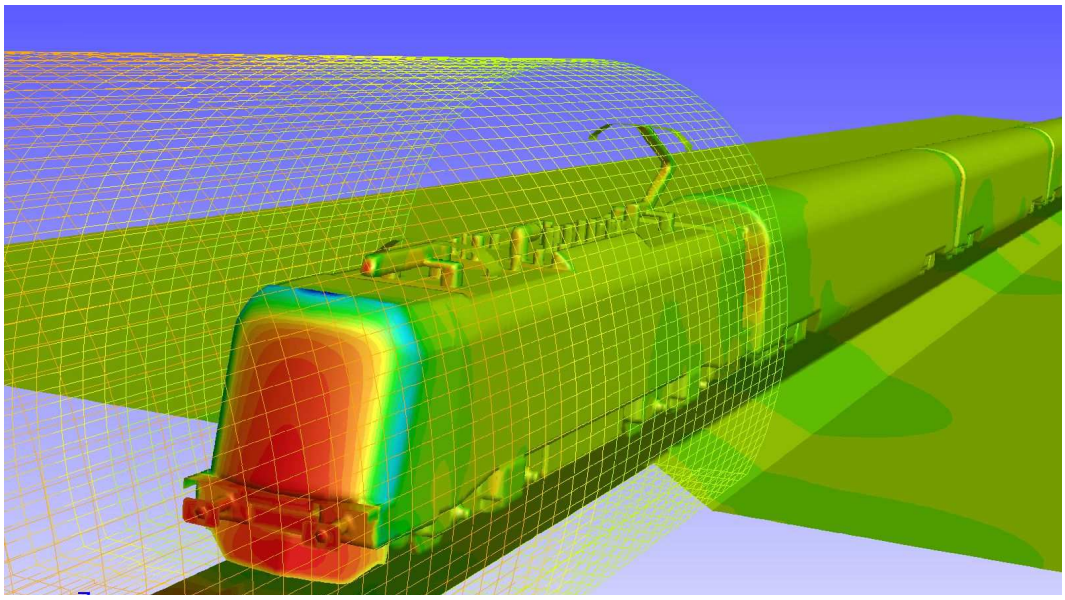


Obr. 4 Výpočtová oblast pro řešení průjezdu vlaku tunelem

Pro řešení simulací interakce jedoucího vozidla (míjení okolních staveb, průjezd tunelem) byla použita podmínka „sliding-mesh“ a parametry nastavení nestacionárního výpočtu byly předmětem odladění pro konkrétní situaci. Velikost rozměrů výpočtové oblasti a velikost časového kroku (jako hodnoty poměru rychlosti jízdy a velikosti elementů výpočetní sítě na povrchu vozidla) byly určující pro délku výpočetního času.

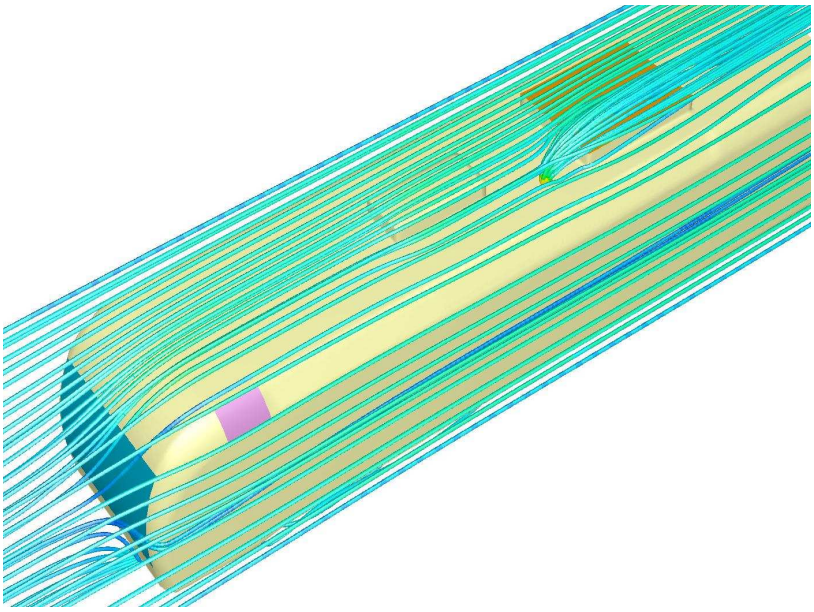
CFD systémem FLUENT byly řešeny následující úlohy aerodynamických interakcí:

- míjení stojícího vlaku jedoucí lokomotivou,
- průjezd vlaku dvojkolejným tunelem délky 100 m (obr. 4) nebo jednokolejným tunelem o délce 638 m (obr. 5),
- průjezd vlaku podél nástupiště,
- míjení objektů kolejiště v blízkosti jedoucího vlaku,
- rozptyl spalin z motorového vozu za jízdy obr. 6,
- generování aeroakustických jevů detaily povrchu jedoucího vozidla.



Obr. 5 Vjezd vlaku do jednokolejného tunelu – rozložení povrchového tlaku

Výsledky provedených simulací uvedených úloh aerodynamických interakcí byly využity ve formě tlakových polí na povrchu vozidel nebo časových průběhů tlakových pulsů ve vybraných místech na vozidle (čelní sklo, boční dveře, otvory pro vstupy chlazení strojovny atd.) a nebo v určitých místech v okolí trati (klenba tunelů, osoby na nástupišti nebo v kolejišti ap.). Zjištěné výsledky umožnily úpravu konstrukce vozidel nebo jejich částí a posouzení vlivů jedoucích vozidel na okolí podle předpisů provozovatele nebo mezinárodních norem (UIC, TSI).



Obr. 6: Rozptyl spalin z motorového vozu – pohled na střechu přední části vozu, zobrazeny proudnice spalin a obtékajícího vzduchu

7. Závěr

Příspěvek představuje pokus o přehled řešených úloh aerodynamiky kolejových vozidel a o základní úvahu nad možnostmi využití komerčního CFD programu pro simulace, zpřesnění jejich výsledků a porovnání s experimenty. Výsledky dosažené numerickými simulacemi pro vybrané provozní podmínky a jízdní režimy jsou využitelné v technické praxi.

8. Poděkování

V příspěvku jsou uvedeny také výsledky výpočtů, které připravili moji kolegové Jana Váchová, Pavel Šturm, Jan Klesa a Jakub Novák a které publikovali v interních technických zprávách nebo na různých konferencích.

Příspěvek vznikl v rámci řešení úkolů Výzkumného centra kolejových vozidel, které je podporováno MŠMT ČR (projekt č. 1M0519).

9. Literatura

Schuster, M. (2001) Využití programu Fluent pro simulaci proudění v částech dopravních prostředků. in: *Sborník 7. uživatelská konference FLUENT 2001*, TechSoft Eng., Třešť.

Schuster, M. (2004) Simulace aerodynamického zatížení kolejových vozidel. in: *Sborník 20. konference "Výpočtová mechanika 2004"*, ZČU Plzeň, Nečtiny.

Schuster, M. (2007a) Klimatizace kabiny strojvůdce lokomotivy. in: *Sborník 18. medzinárodná konferencia "Súčasné problémy v koľajových vozidlách" PRORAIL 2007*, Žilinská univerzita, Žilina.

Schuster, M. (2007b) Simulations of heat transfer through the cabin walls of rail vehicle. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Vol. 1, No. 1,pp. 273-280

Schuster, M. (2008a) Inženýrský přístup k simulacím prostupu tepla stěnou. in: *Sborník 7. konference "Energetické stroje a zařízení, termomechanika a mechanika tekutin*", ZČU, Plzeň.

Schuster, M. (2008b) Simulace aerodynamiky kolejových vozidel. in: *Sborník 14. ANSYS CFD konference 2008* (CD), SVS FEM Brno, Luhačovice.

Schuster, M. (2009) Aerodynamical characteristic of vehicle model. in: *Proc. 25th Conf. on Computational Mechanics 2009* (CD with extended abstracts), University of West Bohemia, Plzeň.