

## MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ METANU V PORÉZNÍM PROSTŘEDÍ S JEDNÍM AKTIVNÍM ODPLYŇOVACÍM VRTEM POMOCÍ CFD PROGRAMU FLUENT

### **Abstrakt**

Článek reaguje na potřebu poznání přírodních procesů v dané oblasti, a proto se zabývá simulací a modelováním proudění metanu z podzemí na povrch skrze horninový masiv. Model přírodního prostředí odpovídá míře našeho poznání reálné situace a možnostem nástrojů používaných k tvorbě modelů. Ve zkoumaném modelu je masiv tvořen dvěma druhy hornin o různé plynopropustnosti a jedním aktivním odplyňovacím vrtem s perforací. Naším úkolem je zjistit, jakým způsobem bude metan proudící vrtem s perforacemi ovlivněn jednak změnami v okolí, z nichž nejdůležitější je změna barometrického tlaku a dále uplatněním a porovnáním několika přístupů v odvádění plynu z horninového masivu.

Exkluzivitou našeho přístupu je snaha vizualizovat a ukázat, jak se bude chovat plyn v porézním prostředí v námi testovaných modelových příkladech. Bez použití numerické technologie proudění, obecně označované jako CFD programy, prakticky nemůžeme nikdy zobrazit a poznat situaci v podzemí a právě díky využití programu Fluent můžeme teoreticky namodelovat a následně si uvědomit, jak mohou okolní vlivy měnit a ovlivňovat proudění z podzemí na povrch a měnit bezprostřední podmínky.

Pro vytvoření geometrického modelu pracovní oblasti byl použit softwarový nástroj Gambit, pro modelování proudění plynu bylo využito CFD software Fluent, ANSYS, Inc.

**Klíčová slova:** degazace horniny, modelování proudění, CFD, Fluent, odplyňovací vrt

### **Abstract**

Article responds to the need for knowledge of the natural processes in this field, and therefore it deals with simulation and modeling of methane flow from the underground to the surface through the rocks. The model of the natural environment corresponding with our understanding of realities and possibilities of the tools used to create models. In the analysis model, the rock material is composed by two types of solid rocks with different permeability and one active degassing borehole with perforations. Our task is to determine how the methane flowing through the borehole with perforations will be affected by changes in ambient barometric pressure and a comparison of several approaches to the extraction of gas from the rock mass.

Exclusiveness of our approach is to visualize and show how gas will behave in porous media model in our test examples. Without the use of numerical flow technology, generally known as CFD programs, we can almost never see and understand the situation in the underground. We can theoretically modeled and then

realize how environmental influences can influence the flow from the underground to the surface and immediate change conditions, only just by using Fluent program.

Software Gambit was used for creating a geometric model of the working area, for modeling the flow of gas it was used CFD software, Fluent from ANSYS, Inc..

**Key words:** degassing of rocks, flow modeling, CFD, Fluent, degasification borehole

## Úvod

Metan je nebezpečný plyn, který nekontrolovaně vystupuje z uhelných slojí a jeho koncentrace musí být patřičně hlídány z důvodu zamezení výbuchu tohoto plynu. Problémy související s metanem však nezanikají s končící těžbou v hlubinných uhelných dolech, ale přetrvávají i po ukončení těžby, a je tedy nutné provádět taková opatření, aby byl samovolný únik metanu z podzemí na povrch co nejvíce eliminován a případně kontrolován tak, aby nemohlo dojít k ohrožení života a majetku obyvatel na povrchu.

I přesto, že byl udělán velký pokrok v prevenci možného nebezpečí ohrožení lidských životů a majetku výskytem metanu, je důležité hledat nové technologie, které mohou vést ke zlepšení poznání přírodních dějů a prevenci nebezpečné situace a díky tomu předvídání rizikových stavů.

Jedním z prostředků, které lze využít pro poznání přírodních procesů je technologie numerického modelování proudění, globálně označovaná jako CFD programy. Pomocí modelování v prostředí CFD programu a následných simulací můžeme ověřit různé varianty dopadů konkrétních simulovaných opatření a nalézt efektivní varianty řešení.

V tomto článku se snažíme pomocí CFD programu Fluent zjistit, jakým způsobem ovlivňuje jednak proudění metanu z podzemí na povrch změna barometrického tlaku a také porovnání, jaké rozdíly budou v případě aktivního odplyňování metanu z modelované heterogenní oblasti.

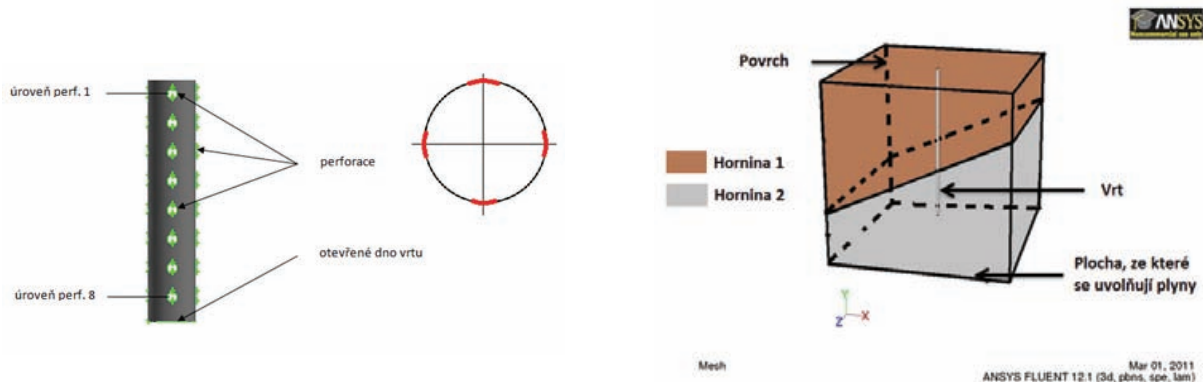
## Popis modelu oblasti

Při tvorbě modelu zkoumaného příkladu jsme vycházeli ze zkušeností získaných při řešení Grantového úkolu č. 105/98/KO45 GAČR a z měřených/monitorovaných dat pro ověřování navržených modelů a výsledků simulací.

Simulační model námi zkoumané oblasti je vytvořen v programu Gambit, což je v podstatě CAD program pro tvorbu výpočtové geometrie modelované oblasti, systému či zařízení a pro následné generování sítě modelu. Program je navržen tak, aby bylo možné použít námi vytvořenou síť v různých CFD programech. Zkoumaná modelovaná oblast byla zadána v rozměrech 20x20x20 metrů. Přesně uprostřed této oblasti je umístěn odplyňovací vrt o průměru 20 cm, který je dlouhý 16 metrů a přitom spodní 1 metr má perforovány na stranách otvory o průměru 4 cm tak, aby mohlo docházet k odvodu plynu z horniny, viz obr. 1.

Na obr. 1 je zobrazen detail spodní části odplyňovacího vrtu, kde jsou vytvořeny v osmi úrovních čtyři perforace po obvodu kruhu, tj. celkově 32 perforací.

Dno vrtu je otevřené, a tak je možné, aby plyn vstupoval z horniny do profilu vrtu i jeho dnem.



**obr. 1 – Detail odplyňovacího vrtu**

**obr. 2 – Schéma modelované oblasti**

Zkoumaná modelovaná oblast je koncipována jako heterogenní, to znamená, že je tvořena dvěma odlišnými druhy hornin o různých plynopropustnostech (permeabilitě), viz obr. 2.

Plynopropustnosti jednotlivých hornin byly zvoleny na základě zkušeností z řešení předešlého grantového úkolu. Pro vrchní část porézního prostředí označeného jako *Hornina 1* byla zvolena hodnota  $1 \cdot 10^{-8}$  [m<sup>2</sup>] a ve druhém oddílu, označeném jako *Hornina 2*, je hodnota plynopropustnosti  $1 \cdot 10^{-11}$  [m<sup>2</sup>]. Do tohoto porézního prostředí je zapažen odplyňovací vrt, jehož detail spodní části je uveden na obr. 1.

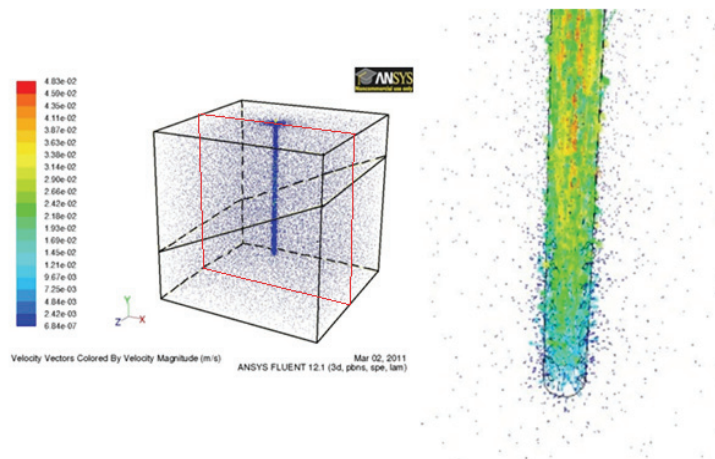
Pro základní modelování byly zvoleny následující hodnoty parametrů simulace, u barometrického tlaku vzduchu hodnota 101 325 [Pa] a složení vzduchu je zjednodušeno na hodnoty: O<sub>2</sub> = 21%, CO<sub>2</sub> = 1% a N<sub>2</sub> = 78%.

Pro tyto modelové výpočty byly simulovány čtyři různé varianty tlaků plynu působícího v oblasti unikání plynů z horniny, a tak můžeme porovnávat závislost měnícího se proudění na tlaku. Tlaková diference mezi plochou uvolňování se plynů z horniny a ústím vrtu, tedy povrchem, je: 250 Pa, 500 Pa, 750 Pa a 1 000 Pa. Složení plynů na vstupní ploše je: CH<sub>4</sub> = 35%, CO<sub>2</sub> = 1% a N<sub>2</sub> = 64%.

V případě varianty s odsáváním bylo použito jednak již dříve zmíněných rozdílů tlaku plynů mezi uvolňováním se plynů z horniny a ústím vrtu, povrchem, a ke každému takovému tlakovému rozdílu bylo dále použito tří hodnot podtlaku ve vrtu: 250 [Pa], 500 [Pa] a 750 [Pa], které nám vyvolává odsávání. To znamená, že pro případ s odsáváním jsme vytvořili 12 variant modelové situace.

### Experimentální výsledky modelování

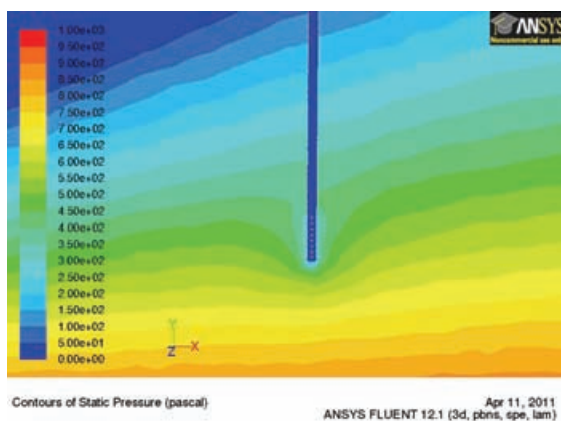
V této části článku jsou pomocí grafických výstupů CFD programu a numerických dat prezentovány základní výsledky modelování a simulace proudění plynů z podzemí na povrch především pak v oblasti odplyňovacího vrtu. Pro lepší interpretaci a vizualizaci získaných výsledků byl v oblasti vrtu udělán příčný řez modelem, viz obr. 3.



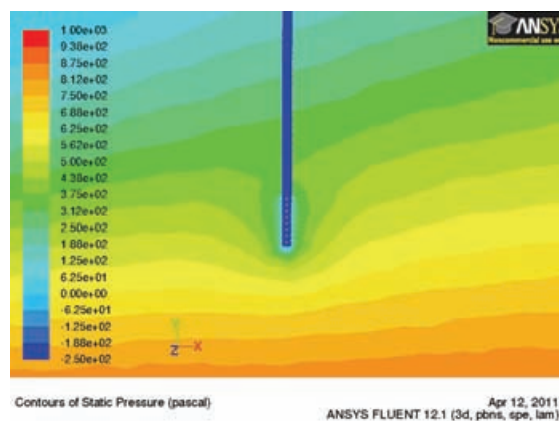
**obr. 3 – Vektory rychlosti proudící směsi; v pravé části detail vrtu v oblasti perforacemi**

Na obr. 3 lze vidět vektory rychlostí proudící směsi plynů. Obrázek v levé části ilustruje vektory rychlosti proudění pro celou modelovanou oblast, obrázek v pravé části pak zobrazuje detail perforované oblasti vrtu. Obrázek zachycuje stav, kdy je rozdíl tlaků 1 000 [Pa] a ve vrtu je vyvolán podtlak 750 [Pa].

Na následujících obrázcích, obr. 4, obr. 5, obr. 6 a obr. 7, můžeme zjistit, jak bude vypadat simulované rozložení tlaků v oblasti kolem vrtu v případě, kdy mezi průnikem plynů z horniny a ústím vrtu (povrchem) je rozdíl tlaků 1 000 [Pa].



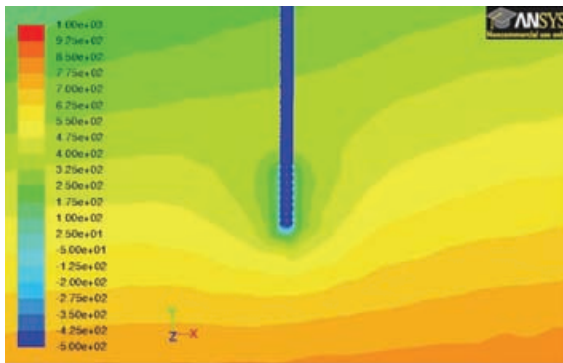
**obr. 4 – Rozložení tlaku v oblasti kolem vrtu při rozdílu tlaků mezi průnikem plynů z horniny a ústím vrtu 1 000 [Pa]**



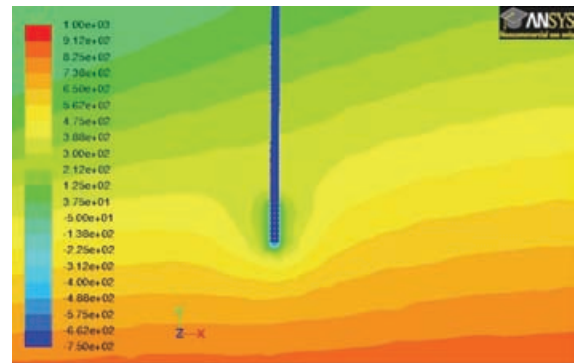
**obr. 5 - Rozložení tlaku v oblasti kolem vrtu při rozdílu tlaků mezi průnikem plynů z horniny a ústím vrtu 1 000 [Pa] a odsáváním ve vrtu s pod tlakem 250 [Pa]**

Na obr. 4 je ilustrována situace, kdy není využito sání ve vrtu. Tlak v oblasti kolem vrtu je rozložen do tvaru písmena V. Hodnota barometrického tlaku, který je ve vrtu ovlivňuje oblast asi 0,5 metrů pod vrtem, poté jsou izolinie tlaku téměř vodorovné. Hodnota tlaku v těsné blízkosti vrtu je zhruba o 300 [Pa] větší než tlak barometrický a v oblasti nad perforacemi je tlak o 400 [Pa] větší. Za situace, kdy je využito odsávání (podtlak 250 [Pa]), obr. 5, rozložení tlaků v oblasti kolem vrtu vytváří tvar písmena O. Ovlivněná oblast tlakem z vrtu je zhruba stejná, jako v případě bez

sání, tedy nějakého 0,5 metru. Hodnota tlaku v těsné blízkosti vrtu je zhruba o 125 [Pa] větší než tlak barometrický a nad perforacemi je větší o 312-375 [Pa].



Contours of Static Pressure (pascal) ANSYS FLUENT 12.1 (3d, pbnš, spe, lam) Apr 12, 2011



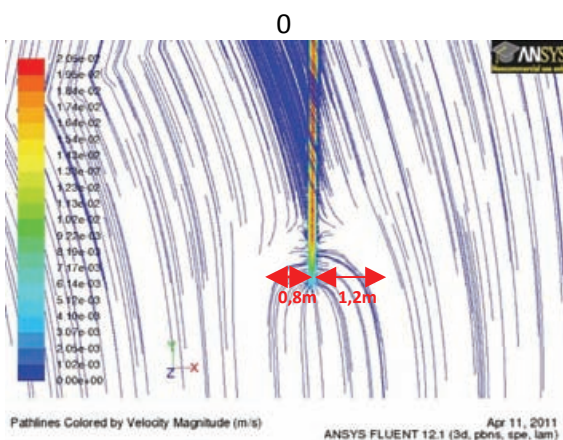
Contours of Static Pressure (pascal) ANSYS FLUENT 12.1 (3d, pbnš, spe, lam) Apr 11, 2011

**obr. 6 - Rozložení tlaku v oblasti kolem vrtu při rozdílu tlaků mezi průnikem plynů z horniny a ústím vrtu 1 000 [Pa] a odsáváním ve vrtu s podtlakem 500 [Pa]**

**obr. 7 - Rozložení tlaku v oblasti kolem vrtu při rozdílu tlaků mezi průnikem plynů z horniny a ústím vrtu 1 000 [Pa] a odsáváním ve vrtu s podtlakem 750 [Pa]**

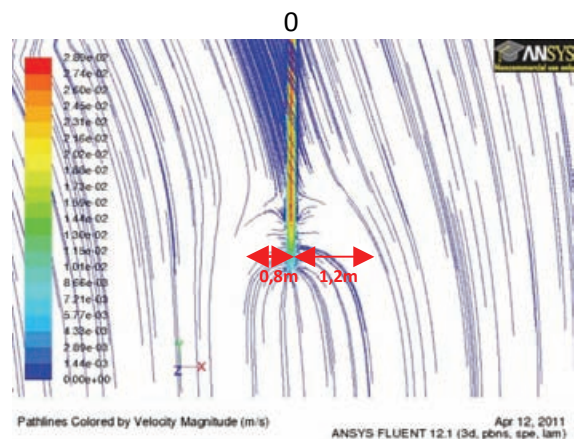
Na obr. 6 je ilustrována situace, kdy je využito sání ve vrtu o podtlaku 500 [Pa]. Tlak v oblasti kolem vrtu je rozložen do tvaru písmena „O“. Hodnota barometrického tlaku, který je ve vrtu ovlivňuje oblast necelého 0,5 metrů pod vrtem, poté jsou izolinie tlaku téměř vodorovné. Hodnota tlaku v těsné blízkosti vrtu je zhruba o 250 [Pa] větší než tlak barometrický a v oblasti nad perforacemi je tlak o 400 [Pa] větší. Za situace, kdy je využito odsávání o podtlaku 750 [Pa], obr. 7, nám rozložení tlaků v oblasti kolem vrtu vytváří také tvar písmena „O“. Ovlivněná oblast tlakem z vrtu je zhruba stejná, jako v případě tedy nějakého 0,5 metru. Hodnota tlaku v těsné blízkosti vrtu je zhruba o 40-125 [Pa] větší než tlak barometrický a nad perforacemi je větší o 212 [Pa].

Je vhodné poznamenat, že v modelovaných příkladech je na obrázcích uveden statický tlak, což pro interpretaci výsledků znamená, že je nutné tyto hodnoty přičíst k tlaku atmosférickému, který činí 101 325 [Pa].



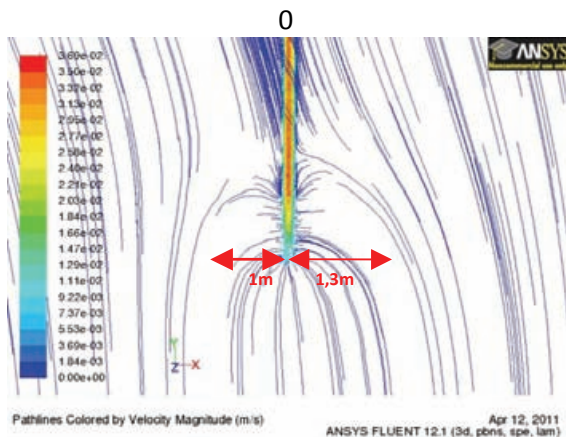
**obr. 8 – Trajektorie vykreslené pomocí hodnot rychlosti pro rozdíl**

**tlaků mezi průnikem plynů z horniny a ústím vrtu 1 000 [Pa]**

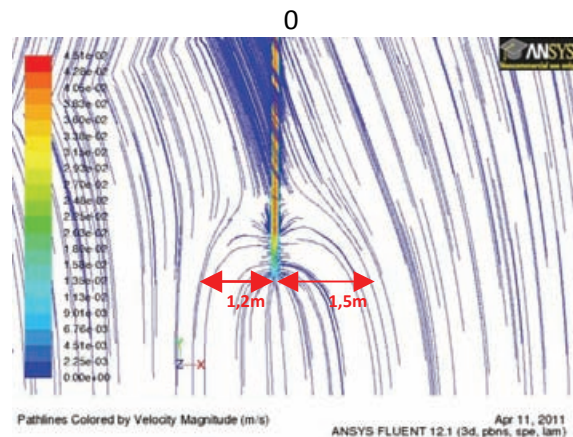




**obr. 9 - Trajektorie vykreslené pomocí hodnot rychlosti pro rozdíl tlaků mezi průnikem plynů z horniny**



**a ústím vrtu 1 000 [Pa] a odsáváním ve vrtu s pod tlakem 250 [Pa]**



**obr. 10 - Trajektorie vykreslené pomocí hodnot rychlosti pro rozdíl tlaků mezi průnikem plynů z horniny a ústím vrtu 1 000 [Pa] a odsáváním ve vrtu s pod tlakem 500 [Pa]**

**obr. 11 - Trajektorie vykreslené pomocí hodnot rychlosti pro rozdíl tlaků mezi průnikem plynů z horniny a ústím vrtu 1 000 [Pa] a odsáváním ve vrtu s pod tlakem 750 [Pa]**

Obrázky 8, 9, 10 a 11 ilustrují izoliny rychlosti proudění, tedy po jaké dráze se plyn v hornině v okolí vrtu pohybuje a na jakou oblast má vlastně daný odplyňovací vrt vliv. V daných obrázcích je pak zvýrazněno a doplněno číselným údajem, jak se nám zvětšuje oblast nasávání důlních plynů v porézním prostředí. Ve všech případech je vidět, že nasávání plynů z pravé strany vrtu je vždy vyšší než z levé. Je to určitě dáno rozložením tlaků v oblasti, což souvisí s přechodem, rozhraním mezi horninami, které není vodorovné, viz obr. 2.

Jak bylo zmíněno, jde o trajektorie proudění vykreslené pomocí hodnot rychlosti. Vlevo u každého obrázku je zobrazena škála hodnot, kde nejvyšší hodnoty jsou vykreslovány barvou červenou, nejmenší pak modrou barvou. Lze tedy vidět, že rychlosti proudění dané směsi se ve vrtu pro dané modely zvětšují. Maximální rychlost proudění směsi ve vrtu je v modelu bez sání  $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ , zatímco v případě vyvolání nejvyššího podtlaku je tato hodnota  $4,51 \cdot 10^{-2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ .

V následující části se zaměříme na numerická data, která jsme získali v průběhu modelování a simulace zkoumaných jevů. Převážně nás zajímá fakt, jakým způsobem je ovlivněna rychlost proudění směsi a průtokové množství vycházejících plynů z ústí odplyňovacího vrtu v případech měnícího se barometrického tlaku a v případech vyvolání podtlaku za účelem sání.

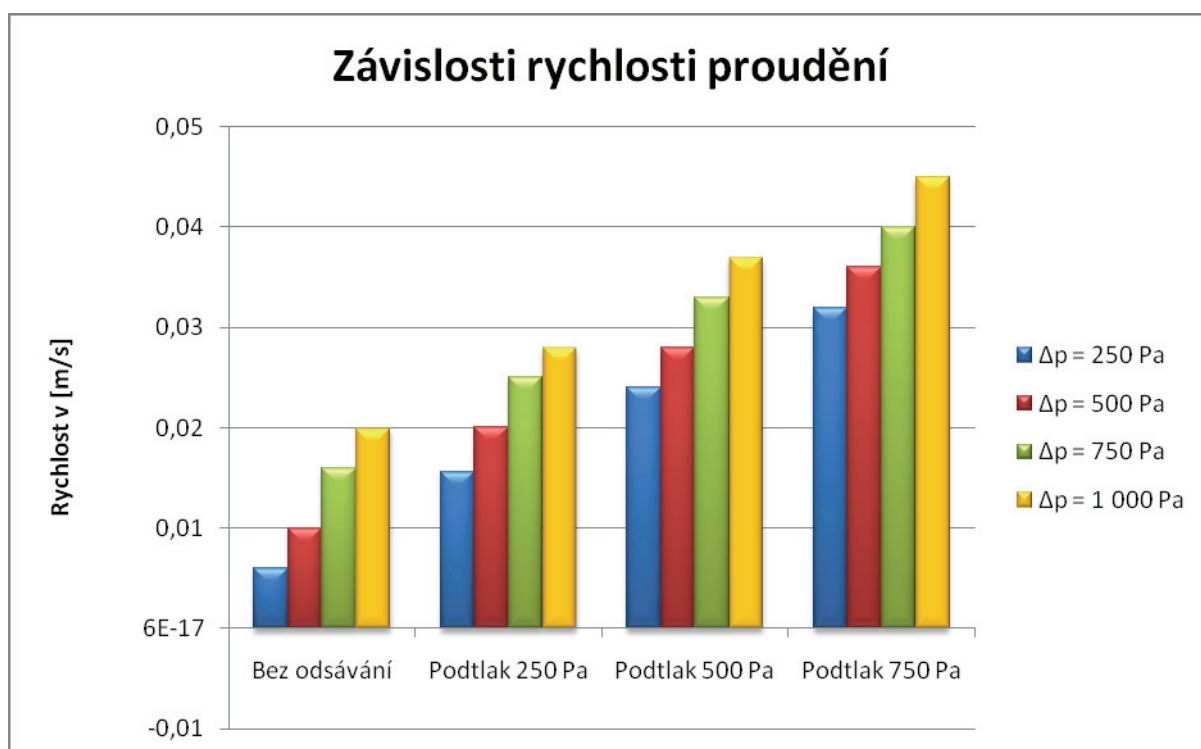
**tab. 1 – Rychlosti proudění plynů v ústí vrtu; v [m/s]**

Rozdíl tlaků	Bez odsávání	Podtlak 250 Pa	Podtlak 500 Pa	Podtlak 750 Pa
250 Pa	0,006	0,0156	0,024	0,032
500 Pa	0,01	0,02	0,028	0,036

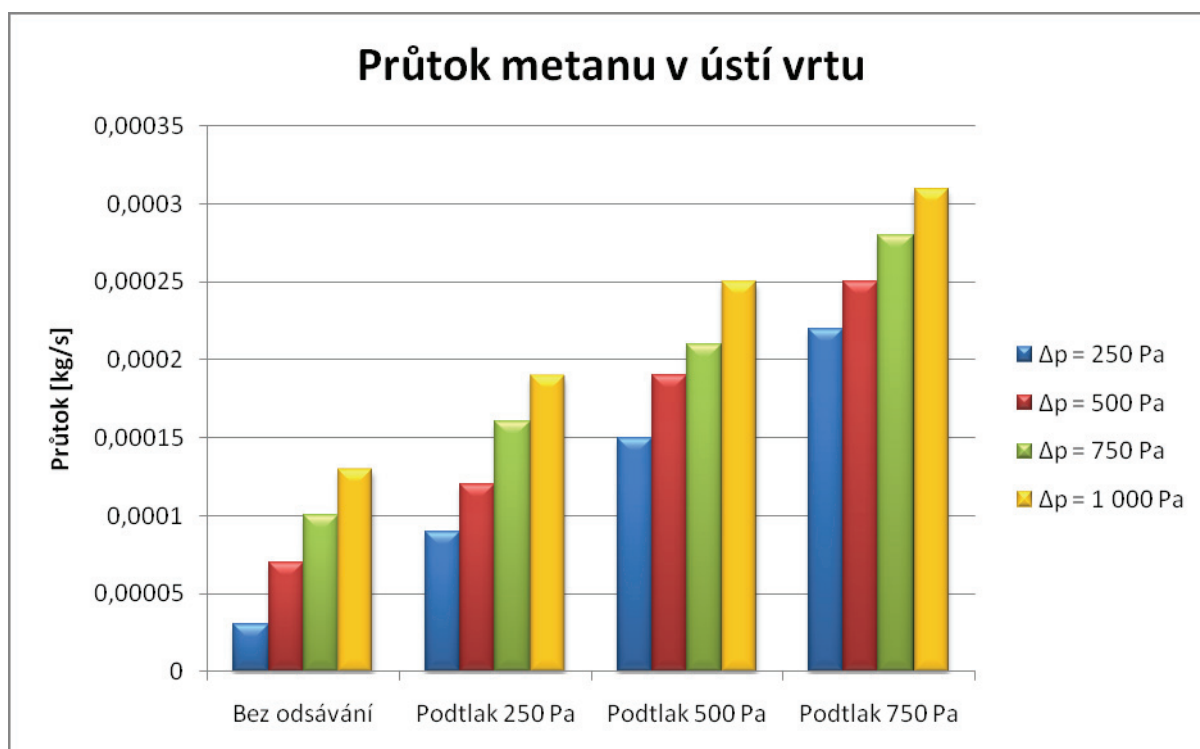
<b>750 Pa</b>	0,016	0,025	0,033	0,04
<b>1 000 Pa</b>	0,02	0,028	0,037	0,045

**tab. 2 – Průtok metanu v ústí vrtu; v [kg/s]**

<b>Rozdíl tlaků</b>	<b>Bez odsávání</b>	<b>Podtlak 250 Pa</b>	<b>Podtlak 500 Pa</b>	<b>Podtlak 750 Pa</b>
<b>250 Pa</b>	0,00003	0,00009	0,00015	0,00022
<b>500 Pa</b>	0,00007	0,00012	0,00019	0,00025
<b>750 Pa</b>	0,0001	0,00016	0,00021	0,00028
<b>1 000 Pa</b>	0,00013	0,00019	0,00025	0,00031



**graf 1 – Závislosti rychlosti proudění na okolních vlivech**



**graf 2 – Závislost průtoku metanu na okolních vlivech**

Z grafu 1 je zcela patrný známý fakt, že rychlost proudění plynů na výstupu z vrtu roste se vzrůstajícím rozdílem tlaků mezi uvolňováním se plynů z horniny a ústím vrtu, povrchem, a také další fakt, že v případě využití odsávání se pochopitelně zvyšuje rychlost proudění plynů a tím pádem i účinnost odvodu plynu z podzemí. Za situace, kdy je ve vrtu vyvolán nejvyšší podtlak, tj. 750 [Pa] při jakékoliv změně barometrického tlaku, jsou rychlosti vystupujícího plynu z ústí vrtu nejvyšší.

Z grafu 2 nám vyplývá podobně známá skutečnost jako v případě závislosti rychlosti proudění na okolních vlivech, a to konkrétně to, že hmotnostní průtok metanu v ústí vrtu nám roste se vzrůstajícím rozdílem tlaků mezi oblastí, ze které se důlní plyny uvolňují z horniny, a barometrickým tlakem. Za neměnných podmínek v případě rozdílu tlaků se nám se vzrůstajícím pod tlakem ve vrtu zvyšuje účinnost odplyňování horninového masivu.

#### **Závěr**

Tento článek se zabývá modelováním proudění plynů, zejména metanu, z podzemí na povrch pomocí CFD programu Fluent za měnícího se barometrické tlaku a také porovnává odplyňování bez sání a se sáním.

Význam prací podobného typu je zcela nepochybně vysoký, neboť nám na základě modelování a simulace umožní nahlédnout blíže na námi zkoumaný jev a to bez vynaložení technických a finančních prostředků na nákladné testování a simulaci v reálném prostředí. Ve své podstatě snad není měření na určitém reálném modelu, simulující jakým způsobem se plyn v porézním prostředí bude chovat, ani technicky proveditelné. Můžeme jen zjistit závislosti, nikoliv blíže nahlédnout pod pokličku zkoumaného jevu.



Obecně je práce s CFD programy ve většině případů interdisciplinární úloha, neboť člověk zabývající se touto problematikou modelování proudění tekutin musí mít znalosti hydromechaniky, termomechaniky, částečně matematiky a chemie a dalších věd podle aplikační oblasti, složitosti a druhu zkoumaného problému. V tomto případě se jedná o geologii a znalosti související s hornictvím.

Účelem článku bylo vytvořit model horninového prostředí, v tomto případě s jedním aktivním odplyňovacím vrtem, a prokázat vliv odvětrávání na snížení nebezpečí výbuchu nekontrolovatelně unikajícího metanu z podzemí uzavřených dolů na povrch. Horninové prostředí uzavřených dolů je totiž i po ukončení těžby nasyceno metanem a ten ve všech případech uniká nekontrolovanými cestami do ovzduší a vytváří tak potencionální možnost výbuchu.

V předcházející kapitole bylo s pomocí simulačních modelů tedy zcela prokázáno, že bude-li barometrický tlak klesat, tak se nám bude do ovzduší dostávat větší množství plynů z podzemí. Dále bylo také pomocí modelování a simulace proudění důlních plynů z podzemí na povrch v CFD programu Fluent dokázáno, že v případě neměnicího se barometrického tlaku a zvyšování podtlaku v odplyňovacím vrtu, bude množství unikajícího plynu vyšší. Tento zřejmý fakt je ilustrován tabulkami a grafy v předcházející kapitole.

Je nutné poznamenat, že článek se zabýval modelováním situací za zjednodušených podmínek. Modelování aplikací z oblasti hornictví, kde vstupujeme do kontaktu s přírodou, je obecně velmi složitou záležitostí, poněvadž nikdy nemůžeme mít kompletně informace o modelovaném prostředí a to nejen z důvodu, že horninový masiv je do značné míry narušen předcházející hornickou činností. V tomto prvním kroku nám šlo především o ověření a prokázání vhodnosti aplikace CFD programu pro modelování a simulaci přírodních dějů ovlivňujících měnící se množství odvětrávaného metanu z podzemí za měnících se atmosférických podmínek.

V následujících krocích se budeme snažit zahrnout další podstatné vlivy a především namodelovat situace, se kterými se setkáváme v hornické praxi tak, aby mohlo dojít k další verifikaci namodelovaných výsledků.

### **Seznam použité literatury**

[1] Gottfried, J., Hummel, M., Shimada, H., Staša, P.: *Modeling Pressure Ratios and Gas Flow in Rock Materials with the CFD Software*; Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2008, Fukuoka, Japan; ISBN: 978-4-9902356-9-7

[2] Kozubková, M.: *Modelování proudění tekutin: FLUENT, CFX*, Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní; Ostrava 2008, <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>.

[3] Staša, P.: *Modelling basic fluid flow using by CFD program Fluent (CZ)*; XXXV. Seminář ASŘ 2010, Ostrava; ISBN: 978-80-248-2191-7

[4] Internal reports of Czech science foundation project number 105/09/1366

[5] Fluent 6.3: User's Guide, September 2006. <URL: [http://spc.vsb.cz/portal/cz/documentation/manual/doc.vsb.cz/Aplikacni%20software/Fluent\\_6.3.26/pdf/ug/pdf-pdf-download.htm](http://spc.vsb.cz/portal/cz/documentation/manual/doc.vsb.cz/Aplikacni%20software/Fluent_6.3.26/pdf/ug/pdf-pdf-download.htm)>

[6] Kebo, V., Strakoš, V.: *The Utilization of Virtual Reality in the Control of Objects and Technology*, Paper No. B-11) In Proceedings of CINEST Symposium 2009, ISBN 978-4-9902-356-0-4, Fukuoka, Japan, 5pp (221-225)

[7] Strakoš, V.: *Zkušenosti z řešení grantového úkolu METAN*; Projekt realizace ochrany atmosféry před únikem metanu z uzavřených dolů v ostravské aglomeraci, Grantový úkol č. 105/98KO45

[8] Staša, P., Kebo, V.: *Modeling of ventilation and methane behavior at coalface area of underground coal mines using by CFD program* (Reviewed Paper); Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2010, Fukuoka, Japan; CINEST 10-48; pages: 253-258; ISBN: 978-4-9902356-0-4