

David ŠEVČÍK*

PROPUSTNOST ZÁVALOVÉHO PROSTORU STĚNOVÉHO PORUBU

PERMEABILITY OF A LONGWALL GOB

Abstrakt

Jedním z nejzávažnějších rizik hlubinného dobývání uhlí je bezesporu riziko samovznícení uhlí. Z tohoto důvodu je věnována nemalá pozornost řešení otázek souvisejících se vznikem, včasným zjišťováním, prevencí a potlačováním samovznícení. S touto problematikou úzce souvisí aerodynamika závalových prostor stěnových porubů, ve kterých často dochází k samovzněcovacím procesům. Jedním z nejvýznamnějších a rovněž nejobtížněji určitelných parametrů aerodynamiky závalu je jeho propustnost. Cílem tohoto článku bylo kompilovat informace z oblasti propustnosti hornin a popsat využití těchto podkladů k matematickému modelování aerodynamiky závalu.

Abstract

One of the most serious risks of the underground coal mining is indisputably the risk of the coal spontaneous combustion. For this reason a not inconsiderable attention is devoted to solving of questions connected with the rise, timely finding out, prevention and restraining of spontaneous combustion. With these problems the aerodynamics of gob areas of longwall headings in which there frequently comes to the spontaneous combustion processes is closely connected. One of the most important and also hardly determinable parameters of the gob area aerodynamics is its permeability. The goal of this article was to compile information from the sphere of the rocks permeability and to describe the making use of these documents for mathematical modeling of the gob area aerodynamics.

Key words: permeability of a rocks, permeability of a gob, longwall gob.

Úvod

Problematicou filtrace kapalin se zabýval autor H. Darcy v letech 1852 – 1855. Výsledky jeho prací byly zobecněny v podobě závislosti představujících zákon odporu filtrace, pojmenovaný jako Darcyho zákon [1]:

$$v_f = -k_f \frac{dh}{dl} = -k_f i. \quad (1)$$

Koeficient úměrnosti k_f byl nazván koeficientem filtrace [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. Je mírou propustnosti pórovitého prostředí pro tekutinu o dané kinematické viskozitě. Koeficient filtrace je tedy komplexním parametrem charakterizujícím jak propustnost pórovitého prostředí, tak i vlastnosti proudící tekutiny. Za proměnnou h se dosazuje pokles piezometrické výšky [m] na dráze l [m]. Znaménko „mínus“ vyjadřuje inverzní orientaci směru rychlosti filtrace ke směru nárůstu tlakové ztráty.

Koeficient charakterizující (za určitých podmínek) pouze propustnost pórovitého prostředí je označován jako koeficient propustnosti k_p [m^2] a je mírou absolutní propustnosti pórovitého prostředí. Koeficient

* Ing., Institut hornického inženýrství a bezpečnosti, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba

propustnosti je pro stabilní a izotropní prostředí s relativně dostatečně velkými póry považován za geometrickou konstantu prostředí, nezávislou na povaze filtračního prostředí. Koeficient propustnosti k_p je s koeficientem filtrace k_f ve vztahu

$$k_p = k_f \frac{\mu}{\rho g}, \quad (2)$$

kde:

μ – dynamická viskozita, [Pa.s],

g – tíhové zrychlení, [m.s⁻²],

ρ – měrná hmotnost, [kg.m⁻³].

Při matematickém modelování aerodynamiky závalu se často používá měrný aerodynamický odpor závalu r [kg.m⁻³s⁻¹], tj. [N.s.m⁻⁴]. Měrný aerodynamický odpor vyjadřuje odpor krychle filtračního prostředí o hraně 1m. Vztah mezi měrným aerodynamickým odporem r , koeficientem propustnosti k_p a koeficientem filtrace k_f je

$$r = \frac{\mu}{k_p}, \quad (3)$$

$$r = \frac{\rho g}{k_f}. \quad (4)$$

V současnosti se pro modelování proudění kapalin ve velké míře využívají výpočetní programy označované zkratkou CFD (Computational Fluid Dynamic). Jedním z nejrozšířenějších programových produktů je program Fluent, který je rovněž na VŠB-TU Ostrava. Tento program pracuje s veličinou viskózního aerodynamického odporu r_k [m⁻²], což je inverzní hodnota koeficientu propustnosti k_p .

Propustnost nerozrušených hornin

Subkapitola se zabývá propustností hornin v rostlém, tedy nerozrušeném, stavu. Propustnost nerozrušeného horninové masivu je relativně nízká a je závislá na hodnotě efektivní pórovitosti. Propustnost masivu je dána jeho strukturními vlastnostmi, intenzitou porušení a hodnotou a orientací lokálního napětového pole.

Hodnoty propustnosti mají velký význam například v hydrogeologii. Tento obor respektuje klasifikaci propustnosti hornin podle autora J. Jetele [2]. Tato klasifikace propustnosti je uvedena v tabulce 1.

Tabulka 1: Klasifikace propustnosti hornin podle [2]

| Koeficient propustnosti k_p [m ²] | Třída propustnosti | Označení hornin dle stupně propustnosti | Koeficient filtrace k_f [m.s ⁻¹] |
|---|--------------------|---|--|
| nad 1.10^{-9} | I | velmi silně propustné | nad 1.10^{-2} |
| 1.10^{-9} - 1.10^{-10} | II | silně propustné | 1.10^{-2} - 1.10^{-3} |
| 1.10^{-10} - 1.10^{-11} | III | dosti silně propustné | 1.10^{-3} - 1.10^{-4} |
| 1.10^{-11} - 1.10^{-12} | IV | mírně propustné | 1.10^{-4} - 1.10^{-5} |
| 1.10^{-12} - 1.10^{-13} | V | dosti slabě propustné | 1.10^{-5} - 1.10^{-6} |
| 1.10^{-13} - 1.10^{-14} | VI | slabě propustné | 1.10^{-6} - 1.10^{-7} |
| 1.10^{-14} - 1.10^{-15} | VII | velmi slabě propustné | 1.10^{-7} - 1.10^{-8} |
| pod 1.10^{-15} | VIII | nepatrně propustné | pod 1.10^{-8} |

S veličinou propustnosti hornin často pracují specialisté při těžbě ropy a zemního plynu. Z praktických zkušeností vyplývá, že za velmi silně propustné jsou pro daný účel považovány kolektory s hodnotami propustnosti v rozmezí $1,6.10^{-12}$ - 1.10^{-13} m² [3], [BUJOK, P., Osobní sdělení, 26.11. 2003, Ostrava].

Konkrétní hodnoty koeficientů filtrace pro filtrace vody některých hornin v ČR uvádí literatura [2]:

- pískovce, arkózy (permokarbon v podloží české křídý, hl. 200 m)
 $k_f = 1.10^{-6}$ m.s⁻¹, tj. $k_p = 1.10^{-13}$ m²,
- pískovce, arkózy (dtto, hloubka 1000 m)
 $k_f = 7.10^{-10}$ m.s⁻¹, tj. $k_p = 7.10^{-17}$ m².

Literatura [4] uvádí koeficienty filtrace vody některých hornin svrchního karbonu. Široké rozpětí uvedených hodnot koeficientu filtrace vymezuje charakteristické oblasti propustnosti předmětných hornin:

- neporušené horniny $k_f = n \cdot 10^{-8}$ až $n \cdot 10^{-12}$ m.s⁻¹, tj. $k_p = n \cdot 10^{-15}$ – $n \cdot 10^{-19}$ m²,
- z toho pelity $k_f \ll n \cdot 10^{-11}$ m.s⁻¹, tj. $k_p \ll n \cdot 10^{-18}$ m²,
- porušené horniny $k_f = n \cdot 10^{-6}$ až $n \cdot 10^{-8}$ m.s⁻¹, tj. $k_p = n \cdot 10^{-13}$ – $n \cdot 10^{-15}$ m².

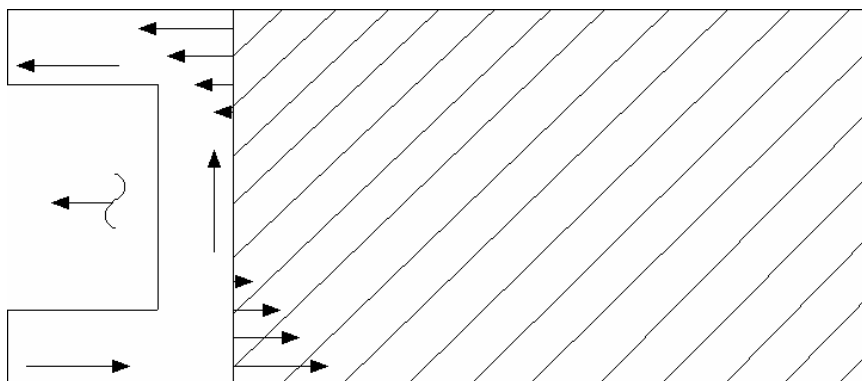
Propustností horninové struktury pro plyny za laboratorních podmínek trojosého hydrostatického zatížení vzorku se zabývá [5]. Takto zjištěná propustnost byla velmi nízká a pohybovala se při 15 MPa bočního tlaku v hodnotách:

- prachovce $k_p < 10^{-20}$ m²,
- pískovce až slepence $k_p < 10^{-16}$ m².

Propustnosti hornin se zabýval také autor literatury [6]. Práce uvádí laboratorně naměřené součinitele propustnosti k_p rozrušených nadložních hornin o relativně malé velikosti částic (0,5 – 6,0 mm). Uvedená práce rovněž uvádí stanovení koeficientu propustnosti a koeficientu filtrace pomocí výpočtu z průměru částic filtračního prostředí. Vypočtené hodnoty však nepotvrdily hodnoty laboratorně naměřené (odchylka až 276 %). Porovnávané hodnoty se potvrdily pouze pro pravidelné kulovité částice prostředí (odchylka 8 – 16%).

Propustnost závalového prostoru stěnového porubu

Závalový prostor stěnového porubu je oblast, která je tvořena rozrušenými horninami bezprostředního a přímého nadloží za postupujícím porubem. Půdorys stěnového porubu, větraného systémem „U“, dobývaného z pole, je uveden na obr.1. Zával porubu vytváří aerodynamický systém, jehož parametry závisí na několika základních faktorech. Jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňující jeho aerodynamiku je stupeň konsolidace. S rostoucí odrubanou délkou dochází v závalu k postupné konsolidaci zavalených hornin vlivem tlaku nadloží, a tedy ke zvyšování aerodynamického odporu.



Obr. 1: Zjednodušené schéma proudění vzdušín stěnovým porubem

Proudění větrů porubem je vyvoláno tlakovou depresí mezi horní a dolní úvrati porubu. Na zálomové hraně dochází z úvodní strany porubu k pronikání části průchodního větrního proudu do závalu, tedy ke ztrátám větrů závalem. Tyto ztráty, které se v zahraniční literatuře často označují jako propustnost závalu (permeability of a gob), se pohybují v karbonských podmínkách OKR v rozmezí 15 – 40% z PVP porubu (průchodního větrního proudu), v některých případech až 60% [7], [8]. V černouhelném revíru v Lotrinsku (H.B.L.- Houilleres du Bassin de Lorraine, Francie) byly například pro účel optimalizace inertizace závalu plynným dusíkem stanoveny tři kategorie propustnosti závalu stěnových porubů - I. ztráty větrů závalem 10 - 15%, II. ztráty větrů závalem 15 - 30% a III. ztráty větrů závalem 35% a více [9].

Problematikou propustnosti závalového prostoru se zabývala řada autorů [6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Vzhledem k odlišným podmínkám a především vzhledem k odlišné skladbě nadložních hornin zkoumaných závalových prostor jsou v citovaných literárních pramenech uvedené výsledky velmi rozdílné.

Literatura [10, 11, 12] uvádí tzv. lineární matematický model aerodynamiky závalového prostoru. Tento matematický model vychází z Darcyho zákona (1) a Laplaceovy rovnice aplikované pro neztřídlivé tlakové pole.

Jedním z výsledků rámcového řešení modelu je vztah pro výpočet měrného aerodynamického odporu závalu podle [10], který lze dle vztahu (3) přepočíst na koeficient propustnosti dle vztahu

$$r = 0,371 \frac{m(p_1 - p_2)}{Q_{vz}}, \quad (5)$$

kde:

- r – měrný aerodynamický odpor závalu stěnového porubu, [N.s.m⁻⁴],
- m – dobývaná mocnost v porubu, [m],
- $(p_1 - p_2)$ - deprese na porubu, [Pa],
- Q_{vz} – větrné ztráty závalcem, [m³.s⁻¹].

Daný matematický model lze omezeně využít pro účely praktických výpočtů, neboť je zatížen odchylkami vyplývající z konstantního měrného aerodynamického odporu v celé ploše závalu. V matematických modelech simulujících daný závalový prostor je vhodné stanovit distribuci propustnosti v ploše závalového prostoru, což je dosud v OKR nedořešená problematika.

Práce [13] se zabývá srovnáním praktických měření propustnosti závalu s různými způsoby distribuce propustnosti v ploše závalového prostoru. Tato práce je velmi zajímavá, zvláště, používáme-li pro výpočet propustnosti závalu již výše zmíněný matematický model aerodynamiky závalového prostoru, viz vztah (5). Měřením bylo zjištěno, že hodnoty propustnosti se v hloubce závalu 20-100 m pohybují v rozmezí 1.10⁻⁶ – 1.10⁻⁷ m². Uvedené hodnoty propustnosti byly měřeny v podmínkách porubu vedeného do pole.

Rovněž práce [11] uvádí hodnoty měrných aerodynamických odporů měřených „in situ“ v porubech vedených do pole. Přepočtem podle vztahu (3) obdržíme hodnoty propustnosti v různých vzdálenostech od porubní fronty v závalu pro filtraci vzduchu:

$$\begin{aligned} 50 \text{ m} & \dots k_p = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2, \\ 100 \text{ m} & \dots k_p = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2, \\ 150 \text{ m} & \dots k_p = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2. \end{aligned}$$

V práci [18], zabývající se diagnostikou teplotního pole odvalu, byla jako jeden z parametrů určována propustnost odvalů. Tato propustnost byla počítána podle Blake-Kozenyho vztahu [19]

$$k_p = \frac{d_s^2}{150} \frac{P^3}{(1-P)^2}, \quad (6)$$

případně ze vztahu, který byl ověřen na odvalech [20]

$$k_p = 2,952 \cdot 10^{-3} P^{2,31} d_s^2, \quad (7)$$

kde P je pórovitost odvalu a d_s je ekvivalentní průměr zrn [m], který lze určit z relace

$$d_s = \frac{\sum_i n_i l_i^3}{\sum_i n_i l_i^2}. \quad (8)$$

Ve vztahu (7) je n_i počet částic dané velikosti a l_i je charakteristický rozměr dané částice [m]. Oba tyto parametry bylo nutno stanovit granulometrickou analýzou. Pro odval v Němcích u Kladna byly stanoveny hodnoty propustnosti [18]:

$$\begin{aligned} k_p &= 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \quad \dots \quad \text{vztah (6)}, \\ k_p &= 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \quad \dots \quad \text{vztah (7)}. \end{aligned}$$

Velmi zajímavé výsledky uvádí práce [14], která byla zaměřená na měření propustnosti pomocí modelu puklinového prostředí. Měřením byly zjištěny hodnoty propustnosti uvedené v tabulce 2.

Tabulka 2: Hodnoty koeficientu propustnosti pukliny s hladkou a drsnou stěnou [14]

| Rozevření [mm] | Koeficient propustnosti [$\cdot 10^{-9} \text{ m}^2$] | |
|----------------|---|-------------------------------------|
| | Hladká stěna | Drsná stěna 40–50 [μm] |
| 0,45 | 18,9 | 3,9 |
| 0,20 | 11,9 | 2,6 |
| 0,10 | 5 | 1,2 |

| | | |
|------|-----|-----|
| 0,06 | 4,4 | 1,1 |
|------|-----|-----|

Závěr

Výše uvedené hodnoty propustnosti hornin v nerozrušeném stavu nemají pro studium závalového prostoru stěnového porubu velký význam a mají charakter spíše orientační. Slouží spíše k ověření hodnot propustností získaných pomocí již zmíněných matematických modelů.

V závěru je také nutno uvést, že z analogie výše uvedených souvisejících hodnot propustnosti hornin a rovněž z řady výpočtů měrného aerodynamického odporu podle vztahu (5) pro podmínky OKR se hodnoty propustnosti, vyjadřující průměrnou propustnost celého objemu závalového prostoru stěnového porubu dobývaného na zával v karbonských podmínkách, pohybují řádově v hodnotách blízkých $k_p = 10^{-6} - 10^{-7} \text{ m}^2$.

Literatura

- [1] KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J., *Hydraulika. Praha, SNTL, 1983, 474 s.*
- [2] JETEL, J.: Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech. *Praha, Academie, 1982, 246 s.*
- [3] DAVIDSON, B.M.: A case history of hydraulic fracture treatments for high permeability wells in Columbia. *Hart's Petroleum Engineer International, July, 1997, s. 25-30.*
- [4] DOPITA, M. et al.: Geologie české části hornoslezské pánve. *Praha, Ministerstvo životního prostředí ČR, 1997, 278 s.*
- [5] KOŽUŠNÍKOVÁ, A., KONEČNÝ, P. jun.: Changes in gas permeability of sedimentary rocks in the process of their deformation and in view of their porosity and structure. In *Proceedings International Conference Geomechanics, Rotterdam, 1996.*
- [6] CHROBÁČEK, K.: Vlastnosti koeficientu filtrace závalových prostorů. *HoÚ ČSAV Ostrava, 1989.*
- [7] ADAMUS, A.: Plynová inertizace závalových prostor stěnového porubu. Disertační práce. *Ostrava, VŠB, 1993, 155 s.*
- [8] ADAMUS, A.: Kolik N₂ do závalu. *Záchranář., 6, 1994.*
- [9] AMARTIN, J.P. (2001-1), Optimisation of nitrogen injection for inertisation of longwall face goaf in CdF coal mines. In *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress, Cracow, Poland, 17-22 June 2001, s. 849-853.*
- [10] ADAMUS, A., LAMPART D.: Matematické modelování ovlivnění propustnosti závalu stěnového porubu inertní pěnou. In *6. mezinárodní seminář Zpevňování a těsnění hornin a stavebních konstrukcí na počátku 21. století, VŠB-TU Ostrava, 15-16.2. 2001, s. 55-60.*
- [11] GLUZBERG, E.I., GRAŠČENKO, N.F., ŠALAJEV, V.S. : Komplexnaja profilaktika gazovoj i požarnoj opasnosti v ugolnych šachtách. *Moskva, Nědra, 1988, 180 s.*
- [12] WACLAWIK, J.: A numerical simulation of spontaneous combustion of coal in goaf. In *Proceedings of The 6th International Mine Ventilation Congress, Pittsburgh, USA, May 17-22 1997, s. 313-316.*
- [13] SZLAZAK, J., SZLAZAK, N.: Permeability of longwall gob. In *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress, Cracow, Poland, 17-22 June 2001, s. 623-629.*
- [14] BILAN, J. et al.: Návrh větrání porubu s ohledem na minimalizaci ztrátových větrů vyrubaným prostorem. *Zpráva VŠB Ostrava, 1987, 45 s.*
- [15] MICHAYLOV, M., VLASSEVA, E.: On void aerodynamice in a porous media of a gob area. In *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress, Cracow, 17-22 June 2001, Poland, s. 275-280.*
- [16] BANIK, J., McPHERSON, J., TOPUZ, E.: Ventilation kontrol of self-heating in retreating longwall coal mines. In *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress, Cracow, Poland, 17-22 June 2001, s. 353-358.*

- [17] DZIURZYNSKI, W.: Prognozowanie procesu przewietrzania kopalni glebinowej w warunkach pożaru podziemnego. *Krakow, Polska akademia nauk, 1998, 136 s.*
- [18] KUBÍČEK, P. et al.: Diagnostika části teplotního pole odvalu v Němcích u Kladna. *Neperiodická zpráva projektu VaV GAČR č. 105/03/0658, VŠB-TU Ostrava, listopad 2003, 37 s.*
- [19] BIRD, R.B., STEWARD, W.E., LIGHTFOOT, E.N.: Přenosové jevy. Sdílení hybnosti, energie a hmoty. *Praha, Academia, 1968, 799 s.*
- [20] SARANČUK, V.I.: Borba i gorenje porodnych otvaloch. *Kijev, Naukovaja dumka, 1978, 165 s.*

Summary

The article deals with the permeability as one of the main factors affecting the liquids flowing through the porous environment. The basic parameters characterizing the substances permeability are the filtration coefficient and permeability coefficient. For mathematical modeling of the liquids flowing through the rock environment also the aerodynamics resistance is very important the relation of which to the permeability coefficient and filtration coefficient is mentioned in the article.

As already stated above, the gravity center of this article consists in the information collection from the sphere of the rocks permeability and subsequent utilization of this information for modeling of the gob area aerodynamics.

The mentioned compilation of the rocks permeability values is based on the rocks in non-disintegrated state. Permeability of these rocks is relatively low and depends on value of effective porosity. These permeability values have a great importance mainly in hydrogeology which respects the permeability classification according to the author J. Jetel [2] and in the sphere of the oil and natural gas exploitation. Concrete values of the filtration coefficient, res. permeability of some rocks in the Czech Republic are given e.g. in [2, 4, 5, 6].

The main attention of the article author is devoted to the permeability of the gob area of longwall headings. In winds flowing through the heading there comes, from the introductory side of heading, to penetration of a part of passing wind flow into the gob area, so to the winds losses due to gob. These losses are identified as the gob permeability. This permeability can be calculated according to the so called linear mathematical models [10, 11, 12] and also according to the relations used for dumps [19, 20]. A certain disadvantage of these approaches is the loading with the deviation following from constant aerodynamics resistance in the whole area of the gob. For practical calculations then, it is still necessary to determine the permeability distribution in the gob area, see e.g. [13]. The further possibility of finding out of the rock environment permeability is then the measuring of permeability with the help of models of crack environment [14].

In conclusion, it is possible to state that from analogy of the above mentioned values of the rocks permeability and also from a whole number of calculations of aerodynamics resistance, in conditions of OKD, the permeability values of longwall headings mined by advancing system and by caving method fluctuate in values close to $k_p = 10^{-6} - 10^{-7} \text{ m}^2$.

Recenzenti: Ing. Petr Schreiber, Ostrava,
Ing. Václav Pošta, HBZS, Ostrava-Radvanice.