

Załącznik nr 1

Dr inż. Mirosław Józef Wierzbicki
Instytut Mechaniki Górotworu
Polska Akademia Nauk
ul. Wł. St. Reymonta 27
30-059 Kraków

AUTOREFERAT

Kraków, luty 2014

1. Imię i nazwisko:

Mirosław Józef Wierzbicki

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:

- magister inżynier górnik specjalności Geotechnika Górnicza, uzyskany na Wydziale Górniczym Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, 1989r.,
- doktor nauk technicznych w zakresie górnictwa nadany Uchwałą Rady Naukowej Instytutu Mechaniki Górotworu PAN z dnia 18.12.2002r. Rozprawa doktorska pt.: *Wpływ warunków inicjacji na przebieg wyrzutu skalno-gazowego*. Promotor: dr hab. Juliusz Topolnicki, recenzenci: prof. dr hab. inż. Jakub Bodziony, prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk, Pracownia Mikromerytyki:

- 1994 – 2002 – asystent,
- 2003 – 2011 – adiunkt,
- 2009 – nadal – kierownik Pracowni Mikromerytyki,
- 2012 – nadal - pracownik badawczo-techniczny, specjalista.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595)

- a) Jako osiągnięcie naukowe wskazuję cykl sześciu publikacji zatytułowanych łącznie:

Właściwości fizyczne układu węgiel-gaz w aspekcie zagrożenia zjawiskami gazogeodynamicznymi

b) Lista publikacji składających się na osiągnięcie naukowe:

- I. Wierzbicki M., Młynarczyk M.: *Strukturalne badania mikroskopowe prób pobranych z mas powyrzutowych w chodniku transportowym D-6 w pokładzie 409/4 KWK „Zofiówka”*. Archiwum Górnictwa, Vol. 51, Issue 4, 577-588, 2006.
- II. Wierzbicki M., Dutka B.: *Wpływ zmian temperatury układu węgiel-metan na gazopojemność węgla odmienionego strukturalnie*. Archiwum Górnictwa, Vol. 55, Issue 3, 547-560, 2010.
- III. Wierzbicki M.: *Wpływ zmian temperatury na własności sorpcyjne na podstawie badań wybranych węgli z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Archiwum Górnictwa, Vol. 58, Issue 4, 1163–1176, 2013.
- IV. Wierzbicki M.: *Zmiany kinetyki procesów sorpcji/dyfuzji w układzie węgiel-metan wywołane zmianami temperatury i ciśnienia*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Tom 29, Zeszyt 4, 155-168, 2013.
- V. Wierzbicki M.: *Wpływ niektórych uproszczeń modelu uniporowego na wynik badania współczynnika dyfuzji na węglu*. Archiwum Górnictwa, Vol. 56, Issue 4, 761-776, 2011.
- VI. Wierzbicki M.: *Zastosowanie uniporowego modelu dyfuzji do określenia objętości gazu desorbowanego podczas pobierania prób węgla dla oceny metanonośności*. Przegląd Górniczy 12, 36-41, 2011.

c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

c.1. Wprowadzenie

Zjawiska gazogeodynamiczne należą do najbardziej niebezpiecznych zjawisk występujących w kopalniach podziemnych. Mogą one występować w węglu kamiennym¹, soli², w piaskowcach³ oraz w dolomitach⁴. Od pierwszych opisanych wyrzutów gazów i skał, które miały miejsce we Francji w 1843r.⁵ oraz Anglii⁶ upłynęło ponad półtora wieku, mimo

¹Lama, R.D., Bodziony J.: Outbursts of Gas, Coal and Rock in Underground Coal Mines. R.D. Lama & Associates, Wollongong, NSW, Australia, 1996

²Duchrow, G.: Untersuchungen in CO₂ : Rachelfeld der Gruben Menzengraben. Bergakademie 11, 586–594, 1958.

³Xiao-Zhao Li, An-Zeng Hua, Prediction and prevention of sandstone-gas outbursts in coal mines, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43, 2–18, 2006

⁴M. Wierzbicki, M. Młynarczyk, Structural aspects of gas and dolomite outburst in Rudna copper mine, Poland. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Volume 57, 113–118, 2013

⁵Cao Y., He D., Glick C. D.: Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults International Journal of Coal Geology 48, 47– 63, 2001

to rozpoznanie zjawiska wymaga nadal wielu prac, by zapewnić bezpieczeństwo górnikom. Dokładne wskazanie parametrów określających stan zagrożenia oraz ich wartości granicznych, gwarantujących bezpieczeństwo prowadzenia robót górniczych wydaje się być aktualnie niemożliwe. Badania prowadzone na przestrzeni lat przez wybitnych naukowców (i zespoły) jak^{7 8 9 10 11 12 13 14} oraz doświadczenia zbierane w kopalniach^{15 16}, pozwalają jednak na powiększenie stanu wiedzy w tym temacie oraz poszukiwanie czynników wpływających na zagrożenie oraz poszukiwanie relacji między nimi. Na wyrzut gazów i skał składa się bowiem szereg procesów fizycznych, do których zaliczyć możemy dyfuzję desorpcję i filtrację gazu, generowanie naprężeń związanych z obecnością i zmianami ciśnienia gazu w przestrzeni porowej, generowanie naprężeń wywołanych naruszeniem równowagi górotworu przez drążenie wyrobiska, zmiany w przepływie ciepła, zaburzenia strukturalne węgla (najczęściej wywołane budową geologiczną) i wiele innych czynników, wymienionych m. in. w pracy¹⁷. Wszystkie te parametry są ze sobą ściśle powiązane. Badania laboratoryjne opisane w monografii¹⁷ pokazały, że wyrzut węgla i gazu może następować w wyniku osiągnięcia krytycznego wyłączenia materiału, wywołanego istnieniem zmiennego w czasie i przestrzeni stanu naprężenia wywołanego nierównomiernym rozkładem ciśnienia

⁶ Taylor T. J.: Proofs of subsistence of the firedamp at coal mines in a state of high tension in situ, *Trans. N. England Inst. Min. Engrs*, Vol. 1, 275-299, 1852-53

⁷ Litwiniszyn, J.: Wpływ porowatości na zjawisko wyrzutu mas skalno-gazowych. *Archiwum Górnictwa*, T. 26, Zeszyt 1, 3-15, 1981

⁸ Litwiniszyn J.: Gas emission from a crushed rock medium during its sudden outbursts. *Archives of Min. Sciences*: 32, 155-168, 1987

⁹ Gil H., Swidziński, A.: Wyrzuty gazów i skał, Politechnika Śląska. Skrypty Uczelniane, Nr 1366, Wyd. II Gliwice, 1988

¹⁰ Tarnowski J.: Obliczanie wyrzutów węgla i gazu, *Przegląd Górniczy*, 1995

¹¹ Lama, R.D., Bodziony J.: *Outbursts of Gas, Coal and Rock in Underground Coal Mines*. R.D. Lama & Associates, Wollongong, NSW, Australia, 1996

¹² Beamish B., Crosdale P.J.: Instantaneous outbursts in underground coal mines: An overview and association with coal type, *International Journal of Coal Geology* 35, 27-55, 1998

¹³ Kidybiński A., Krause E.: Current Developments in Coal and Gas Outbursts Research Aimed at Assessment and Limitation of the Hazard in Mines, 21st WMC & Expo 2008, 207-220, 2008

¹⁴ Kidybiński, A. : The effect of porosity and the strength of coal on the dynamics of coal and methane outburst - the BMP modeling. *Archives of Mining Sciences*, Vol. 56, no 3, 415-426, 2011

¹⁵ Jakubów A., Tor A., Tobczyk S.: Wyrzut metanu i skał w drążonej lunecie rurowej II na poziomie 1000m w KWK Pniówek okoliczności, przyczyny i skutki, Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Szczyrk, 2003

¹⁶ Jakubów A., Tor A., Wierzbicki M.: Zagrożenie wyrzutem metanu i skał przy drążeniu wyrobisk korytarzowych w pokładzie 409/4 partia D KWK „Zofiówka. *Prace Naukowe GiG Górnictwo i Środowisko*, nr IV, 263-273, 2007

¹⁷ Wierzbicki, M.: Zmiany stanu naprężenia i wyłączenia materiału w trakcie prowokowania i inicjacji laboratoryjnego wyrzutu skalno-gazowego, IMG PAN, Rozprawy, monografie, Nr. 4, 2003

porowego w materiale węglowym. Warunkiem koniecznym występowania zjawisk gazogeodynamicznych w tym wyrzutów metanu i skał jest obecność gazu pod ciśnieniem wyższym od ciśnienia panującego w wyrobisku górniczym¹⁸. W modelu laboratoryjnym jednym z najważniejszych zjawisk prowadzących do wyrzutu jest filtracja gazu. Prowadzi ona do generowania naprężeń „gazowych” wywołanych zmiennym w czasie i przestrzeni ciśnieniem porowym w węglu. Podobna sytuacja może występować w warunkach kopalnianych.

W południowej części GZW zjawiska gazogeodynamiczne występują w formie rozproszonej. Zaistniałe wyrzuty metanu i skał miały wyłącznie miejsce podczas drażenia wyrobisk korytarzowych. Przyczyną tych zjawisk była obecność zaburzeń geologicznych (stref uskoku), w których często występował węgiel odmieniony strukturalnie, o zwiększonej szczelinowatości i osłabionej strukturze. Rozpoznanie natury wyrzutu w warunkach *in situ* jest zdecydowanie trudniejsze w porównaniu z warunkami laboratoryjnymi. Działalność górnicza prowadzona jest bowiem w zmiennych warunkach naturalnych (uskoki, zmiany struktury węgla, rosnąca głębokość robót) i zmieniających się warunkach górniczych (krawędzie eksploatacji, resztki pokładów). Dodatkowe trudności w analizie układu węgiel metan w aspekcie zagrożenia zjawiskami gazogeodynamicznymi wprowadzają aktywne metody zwalczania zagrożeń.

c.2. Analiza strukturalna skał w aspekcie zagrożenia wyrzutami gazów i skał

Tematyka związana z badaniami wpływu zaburzeń mikrostrukturalnych węgla na zagrożenie wyrzutami metanu i skał występowała w Pracowni Mikromerytyki w pracach prowadzonych pod kierunkiem profesora Jakuba Bodzionego¹⁹. Zagadnienie to wróciło w trakcie badań podjętych dla wyjaśnienia przyczyn i okoliczności wyrzutu, jaki miał miejsce w kopalni „Zofiówka” w roku 2005. Strukturalne badania mikroskopowe zaplanowane i wykonane pod moim kierunkiem opierały się między innymi na stereologicznej analizie punktowej oraz liniowej, wykonanej na obrazach mikroskopowych zglądów z węgla pobieranego z mas powyrzutowych, ociosu wyrobiska oraz z sąsiedztwa zaburzenia

¹⁸ Topolnicki J.: Wyrzuty skalno-gazowe w świetle badań laboratoryjnych i modelowych, Studia Rozprawy i Monografie, nr 67, IGSMiE, Kraków 1999

¹⁹ Bodziony J., Kraj W., Ratajczak T.: Zastosowanie stereologii w badaniach struktury węgla dolnośląskich. Górotwór jako ośrodek wielofazowy – wyrzuty skalno-gazowe, red. J. Litwiniszyn, Wyd. AGH Kraków, 1990

geologicznego. W ramach badań, opisanych w pracy **I**, w masach powyrzutowych, stwierdzono występowanie węgla odmienionego strukturalnie, o cechach kataklazy i mylonitu. W analizie punktowej na zglądach określono udziały skadników macerałowych węgla, struktury nienaruszonej oraz odmienionej, udziały spękań na tych strukturach oraz substancji nieorganicznych. Założono, że niezwykle ważną cechą strukturalną węgla, wpływającą na zawartość metanu „wolnego” (niezwiązanego sorpcją, zawartego w szczelinach węgla), jest stopień spękania. Określono więc udziały spękań na wszystkich wydzielonych grupach strukturalnych. Wyniki pokazały, że udział spękań na węglu odmienionym strukturalnie może przekraczać 40%. Wartość tego parametru była od 5 do 8 razy wyższa w porównaniu z wynikiem uzyskanym na węglu nieodmienionym. Z uwagi na sieć spękań ilość gazu wolnego zawartego w szczelinach węgla o cechach kataklazy może być kilkukrotnie większa od ilości gazu wolnego w węglu nieodmienionym strukturalnie. Kataklaza w węglu oznacza więc wyższy potencjał energetyczny gazu przy tym samym ciśnieniu co oznacza wyższy stan zagrożenia wyrzutami. Szczelinowatość skały oraz obecność gazu „wolnego” może również znacząco wpływać na stan zagrożenia wyrzutami metanu i skał w wyrobiskach drążonych w innych skałach niż węgiel²⁰.

Badania w zakresie wyrzutów gazów i skał pokazały, że wzrost porowatości skały wpływać może znacząco na wzrost zagrożenia wyrzutami gazów i skał. Podobne wnioski, uzyskane na podstawie badań modelowych, znajdziemy w pracy Kidybińskiego²¹. Wyniki badań wykorzystane zostały podczas prac komisji powołanej przez Prezesa WUG dla zbadania przyczyn i okoliczności wyrzutu, który kosztował życie trzech górników kopalni „Zofiówka”²². Stwierdzono wówczas, że przyczyną wyrzutu było zbliżenie się czoła przodka do „pułapki gazowej” jaką była strefa pokładu o odmienionej strukturze, silnym nasyceniu metanem, bardzo niskiej zwięzłości i dużej szczelinowatości.

²⁰ Wierzbicki M., Młynarczuk M.: *Structural aspects of gas and dolomite outburst in “Rudna” copper mine, Poland*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 57, 113 – 118, 2013

²¹ Kidybiński A., Krause E.: *Current Developments in Coal and Gas Outbursts Research Aimed at Assessment and Limitation of the Hazard in Mines*, 21st WMC & Expo 2008, 207-220

²² Sprawozdanie z prac komisji powołanej przez Prezesa WUG dla zbadania przyczyn i okoliczności wyrzutu metanu i skał oraz wypadku zbiorowego zaistniałego w dniu 22 listopada 2005r w KWK „Zofiówka” wchodzącej w skład JSA S.A., 2006

c.3. Sorpcja metanu na węglu w aspekcie zagrożenia zjawiskami gazogeodynamicznymi

Rzeczą powszechnie znaną jest to, iż metan znajdujący się w węglu występuje w dwóch zasadniczo różnych formach. Są nimi metan zasorbowany na powierzchni porów i mikroszczelin oraz metan wypełniający pory i szczeliny węgla (nie związany z jego powierzchnią), zwany gazem wolnym. Pomiędzy ilością metanu wolnego i zaadsorbowanego ustalony jest stan równowagi, wynikający z ciśnienia metanu, temperatury i objętości przestrzeni porowej. Gaz w postaci sorbowanej może stanowić od około 80% do ponad 90% całości gazu zawartego w węglu²³. Zdolności sorpcyjne węgla zależą m. in. od własności układu węgiel-gaz takich jak ciśnienie, temperatura, wilgotność, stopień metamorfizmu i skład macerałowy^{24 25}. Prace **II-V** przedstawiają wyniki badań własności układu węgiel kamienny-metan, a w szczególności wpływu budowy strukturalnej węgla oraz zmian temperatury układu węgiel-metan, na zmiany pojemności sorpcyjnej węgla oraz współczynnika dyfuzji (D_e).

Badania wpływu zmian temperatury na zmianę pojemności sorpcyjnej węgla kamiennego prowadzono dwoma metodami. Metodą wolumetryczną (**II**) oraz (uważaną aktualnie za najnowocześniejszą metodę badawczą) metodą grawimetryczną (**III**). Badania, wykonane na węglu kataklastycznym z rejonu wyrzutu na kopalni „Zofiówka” (**II**) oraz węgla o nienaruszonej strukturze wykazały, że wzrost temperatury wywołuje ograniczenie zdolności sorpcyjnych węgla względem metanu a zależność pomiędzy maksymalną pojemnością sorpcyjną wyznaczoną z izotermy Langmuira (a_m) a temperaturą układu węgiel-metan ma charakter liniowy. Współczynniki kierunkowe prostych dopasowanych do wyników pomiarów w układzie $a_m=f(T)$ wynoszą od $-0.094\text{cm}^3(\text{g}_{\text{CSW}}\text{K})^{-1}$ do $-0.074\text{cm}^3(\text{g}_{\text{CSW}}\text{K})^{-1}$. Największe zmiany stwierdzono dla węgla strukturalnie odmienionego. Badania pozwoliły również na określenie udziału gazu wolnego w całości gazu zawartego w węglu w funkcji ciśnienia równowagowego. Z uwagi na nieliniowy przebieg izotermy

²³ Gray J.: Reservoir Engineering in Coal Seams: Part 1-The Physical Process of Gas Storage and Movement in Coal Seams. SPE Reservoir Engineering, vol. 2, no 1, 1987.

²⁴ Charriere, D, Pokryszka, Z, Behra, P.: Effect of pressure and temperature on diffusion of CO₂ and CH₄ into coal from the Lorraine basin (France) International Journal of Coal Geology, Volume: 81, Issue 4, 373-380, 2010

²⁵ Ceglarska-Stefańska G., Brzóska K.: The effect of coal metamorphism on methane desorption. Fuel, Volume 77, Issue 6, 645-648, 1998

sorpcji Langmuira oraz liniową zależność między objętością gazu wolnego a ciśnieniem, udział gazu wolnego w całości gazu zawartego w węglu rośnie ze wzrostem ciśnienia. W pracy obliczono również potencjalne zmiany ciśnienia porowego metanu wywołane zmianami temperatury układu węgiel-metan wywołane gradientem geotermicznym. Przy metanonośności wynoszącej $16\text{m}^3/\text{Mg}_{\text{csw}}$ ciśnienie metanu na głębokości 1400m może być 2 razy większe od ciśnienia jakie występuje na głębokości 600m. Spadek zdolności sorpcyjnych węgla wywołany gradientem geotermicznym może prowadzić do wzrostu stanu zagrożenia wyrzutami metanu i skał ze wzrostem głębokości prowadzenia robót górniczych.

Analiza kinetyki akumulacji i uwalniania metanu z prób węgla stanowi w ostatnich latach jeden z kierunków badań dotyczących oceny stanu zagrożenia wyrzutami metanu i skał²⁶. Ponieważ proces sorpcji/desorpcji jest procesem natychmiastowym, o kinetyce akumulacji/uwalniania metanu decyduje przebieg dyfuzji^{27 28}. Do opisu procesu stosuje się najczęściej uniporowy model dyfuzji i na jego podstawie określana jest wartość efektywnego współczynnika dyfuzji D_e ²⁹.

Bardzo istotnym zagadnieniem poznawczym jest rozpoznanie zmienności kinetyki dyfuzji wywołanej zmianami temperatury oraz ciśnienia. Temat ten jest mało rozpoznany w literaturze światowej. Z wynikami takich badań nie spotkałem się w badaniach prowadzonych w Polsce lub na węglach pochodzących z polskich kopalń, co stało się przyczynkiem do ich wykonania w laboratoriach IMG PAN.

Wyniki tych badań, wykonanych w zakresie ciśnień do 1.7MPa i w pięciu temperaturach od 291K do 331K, przedstawione w pracy **IV** pokazują, że wartość efektywnego współczynnika dyfuzji zależna jest zarówno od ciśnienia jak i od temperatury układu węgiel-metan. Wzrost temperatury wywołuje liniowy wzrost wartości współczynnika D_e . Największe zmiany dyfuzyjności występują przy niskich ciśnieniach sorpcji i wynoszą około $6 \times 10^{-11} \text{cm}^2 \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$. Przyczyną wzrostu współczynnika dyfuzji z ciśnieniem może być

²⁶ Wierzbicki K.: Przebieg kinetyki adsorpcji metanu jako wskaźnik zmian strukturalnych pokładu w rejonie stref uskokowych. Przegląd Górniczy, T. 67, nr 6, 2011

²⁷ Gawor M.: Sorpcja i dyfuzja gazów. Archiwum Górnictwa, Vol. 38, Issue 3, 217-261, 1993

²⁸ Kawęcka J.: Sorpcja gazów i par a właściwości polskich węgla kamiennych jako układów dyspersyjnych. Zeszyty Naukowe AGH, Chemia Zeszyt 8, 1998

²⁹ Crank, J.: The Mathematics of diffusion, 2nd ed. Oxford Univ. Press, London, 1975

nieliniowość izotermy sorpcji. Badania pokazują, że efektywny współczynnik dyfuzji nie może być traktowany jako stała materiałowa. Przypuszczam, że zmienność współczynników dyfuzji wyznaczonych przy różnych ciśnieniach może być wywołana niespełnieniem założenia o liniowym charakterze izotermy sorpcji w rozważaniach Cranka. Stosując zmienne wartości współczynników izotermy sorpcji Henry'ego, wyznaczone na podstawie współczynników kierunkowych prostych, dopasowanych do izoterm Langmuira i zastosowaniu rozważań Timofejewa³⁰ uzyskano liniowe zależności pomiędzy współczynnikami dyfuzji a ciśnieniem sorpcji. W przypadku wyższych temperatur współczynnik dyfuzji z rozważań Timofejewa zdaje się być prawie niezależny od ciśnienia.

W ramach badań opisanych w pracy **IV** wykonano również pomiary desorpcji metanu w różnych ciśnieniach i temperaturach. Wykonano również pomiary dyfuzji metanu w procesie desorpcji. Porównując wartości uzyskane w procesach sorpcji i desorpcji w tych samych zakresach zmian ciśnienia zauważa się, że przy niskich ciśnieniach sorpcja jest procesem zachodzącym nieco szybciej niż desorpcja. Wraz ze wzrostem ciśnienia kinetyki procesów zdają się wyrównywać.

Innym zagadnieniem związanym z rozpoznaniem układu węgiel-metan jest zagadnienie wpływu wielkości i kształtu ziarn na wartość i niepewność wyznaczenia współczynnika dyfuzji. Model uniporowy posiada wiele założeń wstępnych. Należą do nich między innymi założenia o kulistości ziaren sorbentu i stałej, znanej ich średnicy. W przypadku węgla kamiennego założenie to nie może być spełnione. Badania prowadzone są bowiem na ziarnach określonej klasy ziarnowej o kształtach znacznie odbiegających od kul. Porównując ziarno kuliste i nieregularne o tych samych objętościach możemy spodziewać się, że uwalnianie gazu z nieregularnego ziarna przebiegać będzie szybciej niż z ziarna kulistego, chociażby ze względu na korzystniejszy stosunek powierzchni do objętości. W pracy **V** pokazano jak zmieni się wartość wyznaczonego współczynnika dyfuzji dla badań wykonanych na próbach ziarnowych opisanych różnymi funkcjami składu ziarnowego. W celu poznania rzeczywistej funkcji składu ziarnowego w obrębie rozpatrywanej klasy ziarnowej przeprowadzone zostały odpowiednie badania. Wykonano serię zdjęć ziarn znanej klasy ziarnowej, losowo rozsypanych na szklanej płycie. Ziarna te zostały opisane za pomocą pól rzutów oraz średnic kół wpisanych w ziarna i opisanych na

³⁰ Timofejew D.P.: Adsorption kinetic. 335str., Leipzig, 1967

ziarnach. Odpowiednie histogramy oraz analiza numeryczna pozwoliły na górne i dolne oszacowanie wpływu kształtu ziarn na kinetykę procesu odgazowania próbki oraz na wyznaczenie granicznego względnego błędu wyznaczenia wartości współczynnika dyfuzji. Okazało się, że wśród analizowanych przyczyn niepewności wyznaczania współczynnika dyfuzji z zastosowaniem założeń modelu uniporowego, kształt ziarn może powodować znaczne odstępstwa od rzeczywistej wartości tego parametru.

Rozpoznanie zagadnienia jakościowych oraz ilościowych zależności pomiędzy takimi parametrami układu węgiel-metan jak temperatura, ciśnienie, pojemność sorpcyjna, kinetyka dyfuzji ma znaczenie zarówno poznawcze jak i użyteczne. Podane zależności mogą być przyczynkiem do bilansowania metanu na podstawie znajomości metanonośności i pojemności sorpcyjnej oraz przełożenia wyników pomiarów w temperaturze laboratoryjnej na warunki *In situ*. Pozwala ono na określenie zmian ciśnienia równowagowego metanu w pokładach węgla wywołanych np. gradientem geotermicznym. Znajomość porowatości, temperatury oraz pojemności sorpcyjnej w funkcji ciśnienia pozwala również na oszacowanie udziału gazu wolnego w całości gazu zawartego w węglu, co pokazano w pracy³¹. Innym zagadnieniem, niezwykle ważnym ze względów bezpieczeństwa pracy górniczej jest określanie metanonośności pokładów. Znajomość metanonośności jest jednym z najważniejszych parametrów dla prognozy zagrożenia metanowego, projektowania wentylacji wyrobisk chodnikowych i ścianowych w kopalniach, projektowania odmetanowania górotworu oraz prognozowania zagrożenia wyrzutami metanu i skał. Aktualnie stosowane metody oznaczania metanonośności opierają się na wynikach prac Borowskiego³² oraz Tarnowskiego³³ z lat 60-tych i 70-tych ubiegłego stulecia. Z uwagi na zmiany warunków górniczych i geologicznych zachodzące ze zmieniającą się głębokością prowadzenia robót, metodyka oznaczania metanonośności wzbudzała dyskusję dotyczącą niepewności wyznaczania tego niezwykle ważnego dla bezpieczeństwa pracy parametru. Największe zastrzeżenia wzbudzało określanie strat gazu w czasie pobierania próbki zwiercin do zbiorników hermetycznych, które to straty uważano za zaniżone. Efektem tej dyskusji było

³¹ Dutka B., Walaszczyk J., Wierzbicki M.: *Określenie ciśnienia złożowego metanu na podstawie pomiarów metanonośności oraz badań sorpcyjnych węgla na przykładzie KWK „Krupiński”*. *Górnictwo i Geoinżynieria*, Rok 33, Zeszyt 1, 145–152, 2009

³² Borowski J.: *Badanie gazonośności pokładów węglowych z zastosowaniem nowych metod*. Prace GIG, Komunikat nr 583, Katowice, 1973

³³ Tarnowski J.: *Desorbometryczne metody pomiaru ciśnienia gazu w pokładach węgla*. *Przegląd górniczy* nr 1, 1968

m. in. powołanie przez Prezesa WUG zespołu rzeczoznawców do wykonania badań porównawczych metanoności³⁴. W pracy (VI) zaprezentowałem nowatorskie podejście, wykorzystujące numeryczne rozwiązanie modelu uniporowego, do wyznaczenia objętości metanu jaki uwalnia się podczas pobierania prób do badań metanoności. Pokazałem, że znajomość współczynnika dyfuzji oraz wielkości ziarn pozwala na wyznaczenie objętości uwolnionego metanu w dowolnym przedziale czasowym. Obliczyłem modelowe przebiegi odgazowania próbek dla węgla o różnych dyfuzyjnościach a następnie (wykorzystując stałą desorbometru manometrycznego) procentowe straty metanu w czasie dwóch minut od pobrania próbki. Wyniki pokazują, że aktualnie stosowane poprawki na stratę gazu desorbowlanego nie są zaniżane. Może występować sytuacja odwrotna. Ze wzrostem stopnia uwęglenia (a taki wzrost występuje wraz ze wzrostem głębokości eksploatacji) obniża się współczynnik dyfuzji a to może powodować, że „strata” metanu będzie aktualnie mniejsza niż wynikająca z prac Tarnowskiego. Publikacja VI pokazuje również, możliwości wykorzystania narzędzi i doświadczeń z prac badawczych w zastosowaniach dla bezpieczeństwa pracy podziemnej.

c.4 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Po ukończeniu studiów na Wydziale Górniczym Akademii Górniczo-Hutniczej podjąłem pracę na kopalni „Śląsk” w Rudzie Śląskiej (aktualnie Ruch Śląsk kopalni „Wujek-Śląsk”). Od początków pracy zawodowej (na stanowisku geofizyka w Dziale Tępań Obudowy i Kierowania Stropem) zajmowałem się tematyką zagrożeń naturalnych w górnictwie. Praca ta pozwoliła mi na poznanie pracy górniczej oraz szacunku dla sił natury a to m. in. za sprawą wybuchu metanu, jaki miał miejsce w pierwszym roku mojej pracy (18 grudnia 1989r) oraz tąpnięć jakie wystąpiły w kopalni „Śląsk” w okresie, kiedy tam pracowałem.

W 1994 przeprowadziłem się do Krakowa, gdzie rozpocząłem pracę w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN, z którym jestem związany do dnia dzisiejszego. Pracę naukową rozpocząłem jako asystent w Pracowni Mikromerytyki kierowanej przez profesora Jakuba Bodzionego. W Pracowni prowadzono wówczas dwa kierunki badawcze: „wyrzutowy” i „stereologiczny”. Zainteresowałem się pierwszym z nich, i zająłem się badaniami podstaw

³⁴ Ryszka M., Sporysz G.: Weryfikacja bezpośredniej metody oznaczania metanoności pokładów węgla stosowana w polskim górnictwie węgla kamiennego. Cz. II: Porównania międzylaboratoryjne oznaczania metanoności węgla. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, Nr 9/2008

fizycznych zjawiska nagłych wyrzutów metanu i skał w kopalniach. Prace naukowe prowadzone były wówczas w warunkach kontrolowanych (laboratoryjnych) na stanowisku tzw. „rury wyrzutowej”. Efektem moich prac było 10 publikacji z lat 1997-2002 a zwieńczeniem tego okresu było przygotowanie i obrona (z wyróżnieniem Rady Naukowej) pracy doktorskiej pod tytułem: „*Wpływ warunków inicjacji na przebieg wyrzutu skalno-gazowego*” w roku 2002. W ramach pracy doktorskiej dokonałem analizy wpływu czynników takich jak ciśnienie porowe, kinetyka zmian ciśnienia, porowatość i wytrzymałość brykietu na możliwość zainicjowania wyrzutu. W pracy podałem również, sprawdzone w warunkach laboratoryjnych kryterium wyężeniowe uwzględniające występowanie naprężeń „rezydualnych” oraz „gazowych”, wynikających z nierównomiernego rozkładu ciśnienia porowego gazu. Warto zaznaczyć, że tematyka wyrzutów metanu i skał w kopalniach węgla kamiennego była wówczas tematyką niepopularną. Twierdzono bowiem, że zjawisko przeszło do historii wraz z likwidacją Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego. Kilka miesięcy przed obroną „natura pokazała swoją siłę...” jak napisał jeden z recenzentów mojej pracy doktorskiej. W kopalni „Pniówek” wystąpił bowiem pierwszy od kilkunastu lat wyrzut w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym.

Zjawiska związane z obecnością gazu w węglu a w szczególności zjawiska gazogeodynamiczne pozostały głównym obszarem moich zainteresowań naukowych do dzisiaj. **Po obronie pracy doktorskiej** zajmowałem się badaniami związanymi z układem węgiel-gaz, zagrożeniem metanowym oraz wyrzutami metanu i skał, jak np. filtracja gazów przez ośrodki mikroporowate, sorpcja gazów na węglu, kinetyka dyfuzji, transport mas powyrzutowych, dopływ metanu do otworów odmetanowania, badania piknometryczno-mikroskopowe dolomitów z rejonu „pułapki gazowej”.

Badania laboratoryjne wykonane na specjalnie zbudowanym stanowisku pomiarowym, polegające na pomiarach filtracji gazów przez materiał mikroporowaty jakim jest węgiel i brykiety węglowe pokazały, że zjawisko to nie zachodzi w sposób liniowy. Przyczyną nieliniowości przepływu są prawdopodobnie zjawiska związane z występowaniem warstwy przyściennej oraz/lub efektu Klinkenberga w ośrodku mikroporowatym jakim jest węgiel kamienny. Badania przeprowadzone zostały w różnych temperaturach a ich efektem

były publikacje^{35 36}. Badania opisane w pracy³⁶ wykonane zostały w warunkach trójosiowego obciążenia w ramach współpracy międzynarodowej prowadzonej między Instytutem Mechaniki Górotworu PAN a Instytutem Geoniki w Ostrawie.

W roku 2006 (po wyrzucie na kopalni „Zofiówka”) zainteresowałem się szczegółowo badaniami stanu zagrożenia wykonywanymi przez służby kopalniane. Przeprowadzona przeze mnie analiza zmienności wskaźników stanu zagrożenia wyrzutowego w warunkach *In situ* pokazała, że podczas kolejnych pomiarów występują bardzo duże wahania ich wartości³⁷. Zmienność ta może być wywołana zmiennością własności pokładu w rejonie sąsiadującym z czołem przodka, błędami losowymi pomiarów lub dwoma tymi czynnikami występującymi jednocześnie. Zaproponowałem wówczas ograniczenie niepewności pomiarowej przez zastosowanie metody średnich ruchomych o różnych okresach i wprowadzenie analizy trendów (bieżącego, lokalnego i regionalnego). Badania pokazały, że w profilaktyce wyrzutowej bardzo istotna jest nie tylko aktualna wartość wskaźnika stanu zagrożenia ale również analiza trendów zmian.

W ramach projektu badawczo-rozwojowego została zaprojektowana i zbudowana sonda do pomiarów ciśnienia równowagowego metanu w pokładach węgla kamiennego IMG-CZ³⁸. Urządzenie pozwoliło na przeprowadzenie pomiarów ciśnienia w warunkach *in situ*. Ciśnienie złożowe jest jednym z najważniejszych czynników (poza własnościami mechanicznymi) wpływających na stan zagrożenia wyrzutami metanu i skał. Uzyskane wyniki pomiarów pozwoliły na określenie wartości zwięzłości węgla, metanonośności oraz ciśnienia metanu przy których drażenie wyrobisk było bezpieczne. Wiedza ta pozwoliła na przeprowadzenie próby jej implementacji do zbudowanego w Pracowni Mikromerytyki systemu eksperckiego szacującego zagrożenie wyrzutami metanu i skał z zastosowaniem narzędzi opartych na

³⁵ Topolnicki J., Wierzbicki M., Skoczylas N.: Pomiary temperaturowej zależności współczynników opisujących filtrację niestacjonarną gazów poprzez brykiet węglowy. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 5, Nr 2, 305-314, 2003

³⁶ Kozusnikova A., Wierzbicki M.: Srovnani propustnosti uhelných briket z mylonitizované a neporusené zony ve sliji 409/4 na dole KWK "Zofiówka". Documenta Geonica, Institute of Geonics, Ostrava Czechy, 119-128, 2009

³⁷ Wierzbicki M.: Analiza zmienności wskaźnika desorpcji z zastosowaniem metody średnich ruchomych. WUG, Bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie, Nr 3 (139), 22-27, 2006

³⁸ Kudasik M., Skoczylas N., Topolnicki J., Wierzbicki M.: Sonda "IMG-CZ" do pomiaru ciśnienia złożowego gazu w górnictwie. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko; Nr 4, 234-240, 2010

zbiorach rozmytych³⁹ w ramach projektu badawczo-rozwojowego⁴⁰, w którym byłem głównym wykonawcą. System ten został wdrożony w kopalni węgla kamiennego „Pniówek” i wspomaga służby wentylacyjne kopalni w ocenie stanu zagrożenia wyrzutami metanu i skał. Możliwości zastosowania systemu eksperckiego w szacowaniu poziomu zagrożeń w kopalniach pokazany został również w pracy⁴¹ wykonanej w ramach projektu badawczo-rozwojowego⁴², którym kierowałem w latach 2007-2010. Za pracę tą (będącą jednym z wyników projektu badawczo-rozwojowego wykonywanego pod moim kierunkiem w IMG PAN) Autorzy otrzymali nagrodę im. Profesora Henryka Czczotta.

Innym, interesującym z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy w górnictwie rud metali, doświadczeniem naukowym było przeprowadzenie badań na próbkach dolomitu pobranych z mas powyrzutowych w OZG Rudna. Wyrzut dolomitu i gazu miał miejsce w tej kopalni w roku 2009 a zdarzenie to można nazwać ewenementem na skalę światową. W literaturze fachowej trudno odszukać wzmianki o wyrzucie z udziałem skały, której wytrzymałość na ściskanie przekracza 100MPa. Analizy przestrzeni porowej dolomitu wykonano na dwóch rodzajach próbek. Jednym z nich były próbki pobrane z mas powyrzutowych a drugim, próbki pobrane z ociosu wyrobiska. Warty podkreślenia jest pomysł zastosowania w badaniach przestrzeni porowej skały dwóch różnych metod i narzędzi w celu uzyskania większej ilości informacji. Określenie porowatości metodą piknometrii helowej oraz quassicieczowej pozwoliło na określenie porowatości porów „otwartych” o dowolnych rozmiarach. Zastosowanie metody optycznej pozwoliło na określenie udziału porów o średnicach powyżej 0.003mm (nazywane w pracy makroporami) oraz rozkładu wielkości porów. Ponieważ analizie mikroskopowej poddano szlify cienkie impregnowane

³⁹ Skoczylas N., Wierzbicki M.: Potencjalne możliwości zastosowania logiki rozmytej w ocenie zagrożenia wyrzutowego w kopalniach. *Przegląd Górniczy* 12, 12-17, 2006

⁴⁰ Młynarczyk M., Dziurzyński W., Wierzbicki M., Topolnicki J., Florkowska L., Godyń K.: *Narzędzia wspomagania służb wentylacyjnych kopalni w zwalczaniu zagrożenia metanowego i wyrzutowego, oparte na wiedzy i doświadczeniu eksperckim*. Sprawozdanie z realizacji Projektu Rozwojowego nr NR09-0038-06, 2011

⁴¹ Praca zbiorowa pod redakcją prof. dr hab. inż. Wacława Dziurzyńskiego: *Model bezpiecznej eksploatacji górniczej w warunkach kumulacji i koincydencji zagrożeń wentylacyjnych, metanowych i pożarowych*. Rozdział: *Budowa systemu eksperckiego szacującego skojarzone zagrożenia górnicze pochodzące od wybranych grup czynników wentylacyjnych, metanowych i pożarowych opartego na logice rozmytej*. Instytut Mechaniki Górotworu PAN, 29-81, 2011

⁴² Projekt badawczo rozwojowy: *Model bezpiecznej eksploatacji górniczej w warunkach kumulacji i koincydencji zagrożeń wentylacyjnych, metanowych i pożarowych*, 0573/R/T02/2007/03.

barwnikiem oraz zgłądy nieimpregnowane, możliwe było określenie udziałów makroporów porów otwartych oraz zamkniętych na badanych próbkach. Dolomit pobrany z ociosu wyrobiska posiadał średnią porowatość ok. 8% i była to głównie mikroporowatość. W przypadku mas powyrzutowych oprócz podobnej objętości mikroporów występowały również pory o średnicach rzędu milimetra, stanowiące ok. 18% objętości. W pracy pokazano również, że możliwe jest określenie objętości gazów powyrzutowych na podstawie oznaczenia porowatości porów zamkniętych oraz gazonośności resztkowej. Wyniki opisano w renomowanym czasopiśmie⁴³.

Kierunkiem podjętym przeze mnie w badaniach w ostatnich latach (2011-2013), są badania prowadzone w celu zrozumienia mechanizmu zjawiska sorpcji wymiennej CH₄-CO₂. Badania takie, prowadzone były na zaprojektowanej i zbudowanej do tego celu unikatowej aparaturze pomiarowej. Eksperymenty polegały na wprowadzeniu ditlenku węgla do brykietu węglowego, wypełnionego pierwotnie metanem. Mierzono wydatek oraz skład mieszaniny gazowej wypływającej z brykietu. Eksperymenty prowadzono przy różnych ciśnieniach w warunkach izotermicznych. Bilansowanie gazu pozwoliło na opisanie przebiegu procesu wymiany sorpcyjnej oraz określeniu zasięgu tej strefy. Określono skuteczność wymiany sorpcyjnej, która wynosiła od 76% do 91%. Efektywność ta była wyższa przy niższych ciśnieniach zatłaczania CO₂⁴⁴.

Interesującym doświadczeniem w pracy zawodowej była praca w zespołach ds. analizy przepisów w zakresie prowadzenia robót górniczych w warunkach zagrożenia wyrzutami metanu i skał oraz stosowanej profilaktyki zwalczania tego zagrożenia (rok 2006) oraz w Zespole powołanym przez Prezesa WUG dla opracowania przepisów prawa, dotyczących zagrożenia wyrzutowego w kopalniach eksploatujących rudy miedzi (rok 2011). Praca ta wymagała wykorzystania wiedzy teoretycznej, wynikającej z pracy naukowej, oraz doświadczenia górniczego (pięć lat pracy w kopalni i wiele badań wykonanych w warunkach *in situ*), do wykorzystania praktycznego w rozwiązaniach prawnych. Doświadczenia te pozwoliły na uczestnictwo Instytutu Mechaniki Górotworu (i moje osobiste jako kierownika części zadania badawczego) w zadaniu badawczym nr 1: „*Opracowanie nowej kategoryzacji*

⁴³ Wierzbicki M., Młynarczyk M.: Structural aspects of gas and dolomite outburst in Rudna copper mine, Poland. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 57, 113–118, 2013

⁴⁴ Dutka B., Kudasik M., Pokryszka Z., Skoczylas N., Topolnicki J., Wierzbicki M.: Balance of CO₂/CH₄ exchange sorption in a coal briquette, *Fuel Processing Technology*, 106, 95–101, 2013

zagrożeń naturalnych w podziemnych zakładach górniczych wraz z jej doświadczalną weryfikacją” Strategicznego Projektu Badawczego: „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”.

Moje dalsze plany badawcze związane są z pomiarami, urządzeniami i metodami rozpoznania układu węgiel-metan dla poprawy bezpieczeństwa pracy w górnictwie i pozyskiwaniu surowców energetycznych.

