

dr inż. Norbert Skoczylas

**Instytut Mechaniki Górotworu
Polskiej Akademii Nauk**

ul. Reymonta 27
30-059 Kraków

AUTOREFERAT

Kraków, czerwiec 2016

1. Imię i nazwisko

Norbert Skoczylas

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:

- magister inżynier elektrotechniki, specjalność automatyka, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, 2003 r.
- **doktor nauk technicznych** w dyscyplinie **górnictwo i geologia inżynierska**, nadany Uchwałą Rady Naukowej Instytutu Mechaniki Górotworu PAN z dnia 14.12.2010 r. Rozprawa doktorska pod tytułem: *Wykorzystanie logiki rozmytej do oceny ryzyka wyrzutu metanu i skał w kopalniach węgla kamiennego* – obroniona z wyróżnieniem. Promotor: dr hab. Juliusz Topolnicki, prof. IMG PAN, recenzenci: prof. dr hab. inż. Andrzej Zorychta, AGH; prof. dr hab. inż. Wacław Trutwin, IMG PAN.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk,
Pracownia Mikromerytyki:

- 2003 – 2004 – stanowisko inżynierjno-techniczne,
- 2004 – 2011 – asystent,
- **2011 – nadal – adiunkt.**

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 ośmiu publikacji zatytułowanych łącznie:

***Nowe metody i narzędzia analizy układu skała-gaz
w kontekście oceny zagrożeń gazowych w kopalniach podziemnych***

b) Lista publikacji składających się na osiągnięcie naukowe:

- I. **Skoczylas N.**, *Coal seam methane pressure as a parameter determining the level of the outburst risk – laboratory and in situ research*, **Archives of Mining Sciences**, 2012, 57, 4, str. 861–869 (IF: 0,319; 20 pkt MNiSW)
- II. **Skoczylas N.**, *Laboratory study of the phenomenon of methane and coal outburst*, **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2012, 55, str. 102–107 (IF: 1,2; 40 pkt MNiSW)
- III. **Skoczylas N.**, Kudasik M., Wierzbicki M., Murzyn T., *Wyznaczenie desorbowalnej zawartości metanu w węglu oraz efektywnego współczynnika dyfuzji metanu na węglu metodą analogową*, **Przegląd Górniczy**, 2015, 71, 2, str. 66-71 (7 pkt MNiSW; udział własny 70%)

- IV. **Skoczylas N.**, Kudasik M., Wierzbicki M., Murzyn T., *New instruments and methods for analysing the coal-methane system*, **Studia Geotechnica et Mechanica**, **2015**, 37, 1, str. 85–91 (**12 pkt MNiSW; udział własny 70%**)
- V. **Skoczylas N.**, *Fast evaluation of the coalbed methane content of coal viewed as an element in improving safety conditions of mining operations*, **Mineral Resources Management**, **2016**, 32, 2, str. 5–30 (**IF: 0,603; 20 pkt MNiSW**)
- VI. **Skoczylas N.**, *Determining the gas permeability coefficient of a porous medium by means of the bubble-counting flow meter*, **Measurement Science and Technology**, **2015**, 26, 085004, str. 1-6 (**IF: 1,433; 30 pkt MNiSW**)
- VII. **Skoczylas N.**, *Analyzing the parameters of the coal-gas system by means of a low-cost device based on a flow meter*, **Adsorption Science & Technology**, **2015**, 33, 9, str. 769–782 (**IF: 0,704; 15 pkt MNiSW**)
- VIII. **Skoczylas N.**, Topolnicki J., *The coal-gas system – the effective diffusion coefficient*, **International Journal of Oil, Gas and Coal Technology**, (in press), **2016** (**IF: 0,508; 20 pkt MNiSW, udział własny 50%**).

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

c.1. Wprowadzenie

Eksploatacja węgla w kopalniach metanowych, zagrożonych występowaniem zjawisk gazogeodynamicznych wiąże się z dużym ryzykiem. Pracodawca ponosi odpowiedzialność za stan bezpieczeństwa w zakładzie pracy i jest zobowiązany chronić zdrowie i życie pracowników poprzez zapewnienie bezpiecznych warunków pracy, przy odpowiednim wykorzystaniu osiągnięć nauki i techniki. Bezpiecznej eksploatacji węgla nie sprzyjają liczne zagrożenia naturalne. Najpoważniejsze z nich skutkują zapaleniami i wybuchami metanu oraz wyrzutami gazu i skał. Z punktu widzenia prowadzenia robót górniczych, niezwykle istotna jest rzetelna i możliwie szeroka wiedza dotycząca parametrów opisujących górotwór, pozwalająca ocenić stopień zagrożenia, a co za tym idzie podjąć odpowiednie kroki w celu jego minimalizacji. Problem bezpośrednio dotyczy aspektów ochrony zdrowia i życia pracowników, odpowiedniego doboru parametrów sieci wentylacyjnych oraz pozostałych technicznych aspektów wydobywania, jak również względów ekonomicznych w dziedzinie minimalizacji wydatków ponoszonych na walkę z zagrożeniami.

Moja praca naukowa w Instytucie Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk koncentruje się na opracowywaniu, badaniu i wdrażaniu nowych bądź udoskonalonych metod oraz narzędzi pomiarowych pozwalających precyzyjniej opisywać i obserwować szereg zjawisk i czynników mających wpływ na parametry układu skała-gaz. Większość opracowanych rozwiązań jest nowatorskim spojrzeniem na sposób prowadzenia badań, pozostałe stanowią udoskonalenie metod i narzędzi wykorzystywanych w górnictwie od lat. Prowadzone prace rozwojowe poprzedzone były badaniami podstawowymi, dotyczącymi opisu fizycznego obserwowanych zjawisk. Jedynie dokładne poznanie natury badanego zjawiska może być

podstawą do zaproponowania metod jego parametrycznego opisu, stąd duża część moich prac ma charakter badań podstawowych.

Cykl publikacji, powiązanych tematem „*Nowe metody i narzędzia analizy układu skała-gaz w kontekście oceny zagrożeń gazowych w kopalniach podziemnych*”, zawiera opis „*oryginalnych osiągnięć projektowych, konstrukcyjnych oraz technologicznych*”¹, a także wyników badań wykorzystujących opracowane metody. Osiągnięcia te stanowią mój wkład naukowy w rozwój dyscypliny górnictwo i geologia inżynierska.

c.2. Pomiary i interpretacja wartości ciśnienia złożowego metanu

Ciśnienie złożowe metanu to parametr równie trudny do wyznaczenia, co istotny dla oceny stanu zagrożenia metanowego oraz zjawiskami gazogeodynamicznymi. Pojęcie „ciśnienie złożowe metanu” definiowane jest najczęściej jako ciśnienie gazu panującego w porach i szczelinach węgla. Jego pomiar może odbywać się metodą bezpośrednią², poprzez badanie w warunkach *in situ*³, bądź metodami pośrednimi⁴. Pomiary bezpośrednie były wykonywane rutynowo w kopalniach Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego. Wiedza o wartości tego parametru była niezwykle istotna w tym zagłębiu z uwagi na występujący tam wysoki poziom zagrożenia wyrzutami węgla i gazu⁵. Doświadczenia światowe oraz nabyte w Dolnośląskim Zagłębiu Węglowym⁶ pokazują, że bezpośrednie pomiary ciśnienia złożowego w warunkach naturalnych są zadaniem niezwykle skomplikowanym. Trudności wynikają przede wszystkim z przyczyn technicznych i powodują, że parametr ten, mimo iż jest niezwykle istotny dla oceny bezpieczeństwa pracy, jest mierzony rzadko, zarówno w polskim, jak i światowym górnictwie.

Wartość ciśnienia złożowego pozwala wyznaczyć, na podstawie izotermy sorpcji, ilość metanu związanego sorpcyjnie w węglu oraz ocenić ilość gazu wolnego. Informacja o ciśnieniu złożowym jest punktem wyjścia wszelkich obliczeń i analiz dotyczących relacji pomiędzy wytrzymałością skały na rozciąganie, jako czynnikiem gwarantującym bezpieczeństwo, a energią gazu zgromadzonego w porach, jako czynnikiem dążącym do destrukcji skały.

Pomiary ciśnienia gazu w górotworze metodą bezpośrednią realizowane są za pomocą sond wprowadzanych do otworów lub przy zastosowaniu rur obsadowych w otworach długich. Uszczelnianie rur obsadowych w otworze odbywa się poprzez zacementowanie lub wklejenie. Pomiar ciśnienia w takim przypadku odnosi się do całej długości wykonanego otworu. Procedura jest kosztowna i czasochłonna. W przypadku zastosowania sond

¹ Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki

² Lama R. D., Bodziony J., Management of outburst in underground coal mines, International Journal of Coal Geology, 1998, 35

³ Ostrowski L., Ülker B., In-situ Determination of Gas Threshold Pressure Helps Forecasting Gas Migration through Caprock in Underground Gas Storage and CO₂ Sequestration, Archives of Mining Sciences AMS, 2007, 52, 4

⁴ Dutka B., Walaszczuk J., Wierzbicki M., Określenie ciśnienia złożowego metanu na podstawie pomiarów metanonośności oraz badań sorpcyjnych węgla na przykładzie KWK "Krupiński", Górnictwo i Geoinżynieria, 2009, 33, 1, 145-151

⁵ Topolnicki J., Wierzbicki M., Skoczylas N., Rock and gas outbursts – laboratory tests and in-shaft measurements, Archives of Mining Sciences AMS, 2004, 49

⁶ Szewczyk K., Kaczkowski J., Występowanie i ewidencja wyrzutów gazów i skał oraz charakterystyka tego zagrożenia w dolnośląskich kopalniach węgla. Zbiór referatów, 1992 Konferencja nt. Kierunki zwalczania zagrożenia wyrzutami gazów i skał w kopalniach Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego, Sobótka

wprowadzanych do otworów badawczych⁷, uszczelnienie zapewnia zastosowanie elastycznych elementów rozporowych. Umożliwia to prowadzenie pomiarów i osadzanie sond w otworach na określonej odległości. Głównym problemem pomiaru ciśnienia złożowego gazu jest uzyskanie odpowiedniej szczelności, zapewniającej wiarygodność uzyskanych wyników.

Praca⁸ I (z listy publikacji składających się na osiągnięcie) zawiera opis konstrukcji autorskiej sondy do pomiarów ciśnienia złożowego oraz metodyki badawczej, a także wyniki obszernych badań kopalnianych i ich interpretacje w oparciu o dodatkowe badania laboratoryjne. Sonda, której jestem głównym projektantem, znamieną jest dużą długością odcinka uszczelniającego oraz zmienną geometrią gumowych elementów uszczelniających.

Zbudowana sonda pomiarowa w przeprowadzonych pomiarach zapewniała uszczelnienie otworu badawczego, nawet w przypadku obecności podłużnych spękań wzdłuż osi otworu. Procedura pomiarowa polega na umieszczeniu sondy w otworze badawczym na dowolnej jego głębokości. Następnie pompowany jest płaszcz uszczelniający do ciśnienia około 1,5 MPa. Wstępne badania pozwoliły ustalić, iż do właściwego uszczelnienia sondy względem otworu konieczne jest zastosowanie ciśnienia uszczelniania o około 0,2 MPa wyższego od ciśnienia mierzonego. Dzięki ciągłej kontroli ciśnienia uszczelniającego oraz mierzonego, w razie potrzeby istnieje możliwość zwiększenia wartości ciśnienia uszczelniającego. Po uszczelnieniu sondy względem otworu rozpoczyna się rejestracja ciśnienia metanu przetwornikiem ciśnienia.

Opisana konstrukcja sondy pozwoliła na wykonanie serii ponad 50 pomiarów ciśnienia złożowego, wraz z parametrami towarzyszącymi, w czterech kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Analiza literatury wskazuje, iż tak kompleksowe pomiary nie były wcześniej wykonywane w GZW. Każdy pomiar trwał nie krócej niż 20 minut. Zmiany ciśnienia rejestrowanego przez przetwornik, odpowiadające napływowi i sprężaniu metanu we fragmencie otworu przed początkiem sondy ciśnieniowej, miały charakter zbliżony do eksponencjalnego. Ciśnienie mierzone było w drażonych wyrobiskach chodnikowych, co najczęściej wiązało się z zatrzymaniem robót górniczych. W przypadku braku możliwości rejestrowania pełnego przebiegu narastania wartości mierzonego ciśnienia, wartość asymptotyczna pomiaru szacowana była na podstawie ekstrapolacji zarejestrowanego przebiegu. Z całą pewnością metoda pomiarowa nie daje możliwości zawyżania wyników. Podobne wartości ciśnień szacowane są metodą pośrednią, z jednoczesną analizą izotermi sorpcji i wartości metanonośności.

Ciśnienie złożowe determinuje energię gazu w porach skały, będąc podstawowym czynnikiem powodującym ich destrukcję w przypadku zaistnienia wyrzutu. W celu jakościowego oszacowania kierunków zmian stanu zagrożenia wyrzutami metanu i skał w zależności od wartości ciśnienia złożowego, przeprowadzone zostały badania laboratoryjne prowokacji mikrowyrzutów, przy różnych wartościach zwięzłości węgla f i ciśnienia nasycania metanem P . Zwięzłość wybrana została jako parametr typowy dla GZW, reprezentujący

⁷ Borowski J., Określenie ciśnienia gazu w pokładach węgla, Przegląd Górniczy, 1976, 9

⁸ Skoczylas N., Coal seam methane pressure as a parameter determining the level of the outburst risk – laboratory and in situ research, Archives of Mining Sciences, 2012, 57, 4, 861–869

czynnik wytrzymałościowy węgla, przeciwdziałający energii gazu. Metodyka badań została opracowana w sposób umożliwiający kontrolowanie intensywności prowokacji wyrzutu. Głównym celem tak zaproponowanych badań stało się poszukiwanie minimalnej intensywności prowokacji wyrzutu w warunkach laboratoryjnych (podatności wyrzutowej), przy której prowokacja kończyła się skutecznym wyrzutem. Tak rozumianą podatność wyrzutową można traktować jako umowną miarę stanu zagrożenia wyrzutowego dla danych warunków górniczych, w tym przypadku reprezentowanych parą parametrów (f , P). Materiałem badawczym były brykiety węglowe, które można w powtarzalny sposób formować tak, by w zależności od porowatości determinować ich zwięzłość. Przydatność brykietów w tego typu badaniach omówiłem szerzej w pracy⁹. Prowokacja wyrzutu polegała na nagłym obniżaniu ciśnienia przed czołem brykietu, w kontrolowany sposób. Otrzymane minimalne stałe czasowe spadku ciśnienia w komorze przed brykietem, niezbędne dla skutecznej inicjacji wyrzutu, informują jaka intensywność prowokacji wyrzutu jest niezbędna, by w danych warunkach mechaniczno-gazowych reprezentowanych parą parametrów (f , P), skutecznie zainicjować wyrzut. Po znormalizowaniu tych wartości do 100%, traktuję je jako umowną miarę stopnia zagrożenia wyrzutowego. Tak skonstruowane badania stanowią mój wkład w rozwijane od kilku dekad w Instytucie Mechaniki Górniczej PAN badania wyrzutów w warunkach laboratoryjnych. Dokładny opis procedury badawczej znajduje się w **pracy¹⁰ II**.

Opisana procedura laboratoryjna, wykonana dla siatki parametrów (f , P), pozwoliła na nakreślenie wykresu warstwicowego, będącego w istocie przestrzenią stanu zagrożenia wyrzutowego. Analiza wykresu warstwicowego z naniesionymi wartościami zmierzonego *in situ* ciśnienia złożowego, wraz z odpowiadającymi mu zwięzłościami, stanowi interesujący przykład połączenia wyników pomiarów kopalnianych (ciśnienia złożowe) z pracami laboratoryjnymi (przebieg stanu zagrożenia). Najważniejsze wnioski ilościowe, wynikające z przeprowadzonych badań, można zawrzeć w obserwacjach:

- najwyższy zarejestrowany poziom zagrożenia wyrzutowego sięgał 50% (wg badań laboratoryjnych) i odpowiadał zmierzonym w kopalni parametrom $f=0,34$ oraz $P=0,75$ MPa;
- wartość najwyższego zmierzonego ciśnienia metanu sięgała $P=1,43$ MPa – mimo tak wysokiego ciśnienia, badania laboratoryjne wskazują, iż występował minimalny stan zagrożenia wyrzutowego, do czego przyczyniła się bardzo wysoka, jak na warunki GZW, zwięzłość $f=1,66$;
- najbardziej dynamiczny wzrost zagrożenia wyrzutowego, wraz ze wzrostem ciśnienia nasycania występuje dla zwięzłości mniejszej od 0,6;
- przy zwięzłości węgla mniejszej, bądź bliskiej 0,3, poziom zagrożenia wyrzutowego przekracza 50% już przy wartości ciśnienia metanu na poziomie 0,6 MPa;
- wysoka zwięzłość węgla ($>0,8$) jest gwarantem bezpieczeństwa, mimo wysokiego ciśnienia metanu.

⁹ Skoczylas N., Dutka B., Sobczyk J., Mechanical and gaseous properties of coal briquettes in terms of outburst risk. Fuel, 2014, 134, 45–52

¹⁰ Skoczylas N., Laboratory study of the phenomenon of methane and coal outburst, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012, 55, 102–107

Zwięźłość, jako parametr określający właściwości wytrzymałościowe węgla, wykorzystywana jest rutynowo w górnictwie polskim, rosyjskim, ukraińskim oraz chińskim¹¹. W celu uogólnienia uzyskanych wyników laboratoryjnych, przeprowadziłem badania zależności pomiędzy porowatością brykietów biorących udział w laboratoryjnych prowokacjach wyrzutu, a ich wytrzymałością R_c w teście jednoosiowego ściskania. Dzięki temu możliwe było wyznaczenie analogicznej przestrzeni stanu zagrożenia wyrzutami w funkcji parametrów R_c , P . Uzyskane izolinie stanu zagrożenia są zgodne z intuicją, zagrożenie rośnie wraz ze wzrostem P , natomiast maleje wraz ze wzrostem R_c . Dla węgla bardzo słabych, o $R_c < 3$ MPa, wysoki stan zagrożenia pojawia się już przy minimalnych wartościach ciśnienia złożowego. Tego typu wytrzymałości na ściskanie posiadają węgle strukturalnie odmienione, obecne w rejonach zaburzeń geologicznych. Miejsca te są szczególnie silnie narażone na występowanie zjawisk gazogeodynamicznych. Węgłe stosunkowo wytrzymałe, o R_c powyżej 10 MPa, gwarantują bezpieczeństwo nawet przy wysokich ciśnieniach – minimalny stan zagrożenia wyrzutowego występuje dla ciśnień złożowych metanu sięgających 1,0 MPa. Tak wysokie wartości ciśnienia w warunkach GZW występują stosunkowo rzadko.

c.3. Metoda badania układu węgiel-metan w warunkach kopalnianych – Analogowy Rejestrator Emisji Metanu AREM oraz Cyfrowy Rejestrator Emisji Metanu CREM

Metan występujący w pokładach węgla kamiennego utrudnia prowadzenie robót górniczych. Odpowiednia profilaktyka oraz dobre planowanie prac skutecznie obniżają stan zagrożenia metanowego i wyrzutowego. Czynności te wymagają jednak systematycznych i rzetelnych pomiarów parametrów układu węgiel-metan. W szczególności informacje dotyczące zawartości metanu w pokładzie oraz tempa jego emisji z węgla są kluczowe w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa.

Metanonośność to niewątpliwie najistotniejszy wskaźnik stanu zagrożenia metanowego oraz wyrzutami metanu i skał. Często stanowi podstawę kategoryzacji zagrożenia wyrzutowego. Wartości kryterialne dla wybranych krajów kształtują się na średnim poziomie $9 \text{ m}^3/\text{Mg} \pm 1 \text{ m}^3/\text{Mg}$ ^{12,13}: Australia – $9 \text{ m}^3/\text{Mg}$, Bułgaria – $9 \text{ m}^3/\text{Mg}$, Chiny – $10 \text{ m}^3/\text{Mg}$, Polska – $8 \text{ m}^3/\text{Mg}$, Ukraina – $8 \text{ m}^3/\text{Mg}$, Węgry – $8 \text{ m}^3/\text{Mg}$, Czechy – $9 \text{ m}^3/\text{Mg}$. W pracy Lama¹⁴ wskazuje, że wyrzuty występują w węglach o gazonośności przekraczającej $8 \text{ m}^3/\text{Mg}$.

Przybliżona zawartość metanu w węglu określana jest często na podstawie metod desorbometrycznych¹⁵. Istnieje silna korelacja pomiędzy wskazaniem desorbometru

¹¹ Skoczylas N., Wierzbicki M., Evaluation and Management of the Gas and Rock Outburst Hazard in the Light of International Legal Regulations, Archives of Mining Sciences, 2014, 59, 4

¹² Lama R.D., Bodziony J., Outbursts of Gas, Coal and Rock in Underground Coal Mines. R.D. Lama & Associates, 1996, 499, Wollongong, NSW, Australia

¹³ Beamish B., Crosdale P.J., Instantaneous outbursts in underground coal mines: An overview and association with coal type, International Journal of Coal Geology, 1996, 35, 27–55

¹⁴ Lama R.D., Management and control of high gas emissions and outbursts in underground coal mines International Symposium cum Workshop: Westonprint in Kiama 1995, 618, Wollongong, NSW, Australia

¹⁵ PN-G-44200:2013-10, Górnictwo – Oznaczanie metanonośności w pokładach węgla kamiennego – Metoda zwiercinowa, 2013

manometrycznego, a metanonością^{16,17}, jednak należy pamiętać, iż tradycyjne metody desorbometryczne zakładają obserwacje tylko krótkiego fragmentu emisji metanu z węgla. W rezultacie tak prowadzonej obserwacji otrzymujemy parametr, który zależy głównie od dwóch czynników: desorbowalnej zawartości metanu w węglu, która w istocie jest asymptotą przebiegu emisji metanu z węgla oraz współczynnika dyfuzji, którego przybliżeniem jest stała czasowa determinująca tempo emisji. Istnieje więc możliwość, iż badając węgiel o wysokiej zawartości metanu, lecz niskim współczynnikiem dyfuzji, otrzymamy umiarkowany wynik wskaźnika intensywności desorpcji, niższy niż w przypadku węgla o niskiej zawartości metanu, lecz wysokim współczynnikiem dyfuzji.

Od roku 2005 brałem udział w laboratoryjnych badaniach emisji metanu z ziarnistych próbek węgla prowadzonych w Instytucie Mechaniki Górniczej PAN. Przebieg procesów dyfuzji i sorpcji analizowałem za pomocą wagi sorpcyjnej IGA 001 (Hiden Isochema). Sprawdzałem zgodność wyników pomiarów z rozwiązaniami modelowymi. Badałem wpływ parametrów prowadzenia obserwacji, takich jak: klasa ziarnowa, ciśnienie nasycenia oraz temperatura na uzyskiwane wyniki. Jednocześnie wielokrotnie brałem udział w określaniu podstawowych parametrów opisujących stan zagrożenia wyrzutowego oraz metanowego w kopalniach węgla kamiennego. Efektem rozważań na styku skali laboratoryjnej i kopalnianej są autorskie pomysły na nowatorskie metody i urządzenia metrologiczne. Proponowane przeze mnie pomysły okazały się na tyle interesujące, iż w roku 2012 zostałem laureatem prestiżowego konkursu „Lider” i otrzymałem finansowanie przez NCBiR projektu „Nowe urządzenia i metody analizy układu węgiel-metan”. W efekcie trzyletnich prac powstały trzy wersje przyrządów metrologicznych realizujących zaproponowane metody pomiarowe zgodne z moimi koncepcjami.

Analogowy Rejestrator Emisji Metanu **AREM**, pomimo iż pozornie wydaje się zbliżony do desorbometru manometrycznego¹⁸, prezentuje całkowicie odmienne podejście do prowadzonej obserwacji emisji gazu z próbki. W miejsce krótkich pomiarów, rejestrowany i analizowany jest praktycznie pełen proces uwalniania metanu z węgla. Możliwość taką daje zastosowanie niższej klasy ziarnowej niż obecnie wykorzystywana w ocenie metanoności i intensywności desorpcji. Według wyliczeń teoretycznych oraz badań laboratoryjnych, przy klasie ziarnowej 0,20–0,25 mm, pełen czas prowadzenia pomiaru wynosi około 1 doby. Dzięki ekstrapolacji przebiegu, z wykorzystaniem modelu procesu dyfuzji, przybliżone wyniki można poznać już po kilku godzinach. W **pracy**¹⁹ III szczegółowo prezentuję prototyp urządzenia AREM. Podstawowym elementem funkcjonalnym jest kanał pomiarowy rozgałęziony w swym początku, hermetycznie łączący się z pojemnikami na próbkę i ciecz znacznikową. Przesiany do

¹⁶ Szlązak N., Borowski M., Korzec M., Obracaj D., Swolkień J., Sposób określania metanoności w pokładach węgla kamiennego, *Górnictwo i Geoinżynieria* 2011, 4, 35

¹⁷ Dutka B., Skoczylas N., Wierzbicki M., Wyznaczenie metanoności pokładów na podstawie pomiarów wskaźnika intensywności desorpcji na przykładzie wyników z wybranej kopalni węgla kamiennego, *Przegląd Górniczy*, 2015, 2, 1107

¹⁸ Stączek, A., Simka, A., Graniczny wskaźnik intensywności desorpcji gazu z węgla jako podstawowy parametr zagrożenia wyrzutowego charakteryzujący stopień nasycenia gazem pokładów węgla, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 2004, 42, 12

¹⁹ Skoczylas N., Kudasik M., Wierzbicki M., Murzyn T., Wyznaczenie desorbowalnej zawartości metanu w węglu oraz efektywnego współczynnika dyfuzji metanu na węglu metodą analogową, *Przegląd Górniczy*, 2015, 71, 2, 1107

odpowiedniej klasy ziarnowej węgiel umieszcza się w pojemniku i zakręca do urządzenia. Metan emitujący z próbki, transportowany jest wzdłuż kanału pomiarowego. Następnie wkręca się przygotowany pojemnik z cieczą znacznikową, której centymetrowy odcinek pojawia się w kanale pomiarowym. Emisja metanu powoduje transport fragmentu cieczy znacznikowej wzdłuż kanału pomiarowego. Położenie cieczy znacznikowej w wyskalowanym kanale pomiarowym oznacza chwilową wartość pomiaru. Podstawowe różnice pomiędzy urządzeniem AREM, a desorbometrem manometrycznym DMC-2 dotyczą:

- obniżenia badanej klasy ziarnowej do przedziału 0,20–0,25 mm,
- prowadzenia pomiaru przez około dobę (w trakcie pomiaru obserwowany jest pełen proces uwalniania metanu, nie tylko jego niewielki okres),
- pomiar jest quasi-izobaryczny (mierzymy przemieszczenie niewielkiego odcinka cieczy w miejsce pomiaru nadciśnienia za pomocą U-rurki),
- bezpośrednimi wynikami pomiaru są rozłączne parametry: desorbowalna zawartość metanu w węglu oraz współczynnik dyfuzji, gdzie klasyczne metody desorbometryczne (np. DMC-2) dają jeden parametr, będący pochodną zarówno zawartości metanu, jak i współczynnika dyfuzji.

Desorbowalna zawartość metanu jest w krajowym górnictwie parametrem obecnie nieoznaczanym, jednak w moim mniemaniu parametr ten posiada ogromny potencjał informacyjny. W istocie określa on maksymalną ilość metanu jaka może się uwolnić z węgla do atmosfery wyrobiska. Ponadto jest silnie skorelowany z metanonością, w skład której, prócz zawartości desorbowalnej, wchodzi także pojemność sorpcyjna przy ciśnieniu barycznym oraz gaz wolny. Dla węgla z GZW wartość pojemności sorpcyjnej przy ciśnieniu barycznym dla temperatury złożowej zawiera się w przedziale od około $1,8 \text{ m}^3/\text{Mg}_{\text{CSW}}$ do ok. $2,3 \text{ m}^3/\text{Mg}_{\text{CSW}}$. Zawartość gazu wolnego determinowana jest porowatością węgla oraz wartością ciśnienia złożowego. Typowa porowatość węgla z GZW²⁰ mieści się w przedziale 5–10%, co przy najczęstszych wartościach ciśnienia złożowego 0,2–0,6 MPa daje ilość metanu²¹ w przedziale $0,067\text{--}0,400 \text{ m}^3/\text{Mg}_{\text{CSW}}$, przy czym górna granica przedziału dotyczy węgla o najwyższej porowatości, przy najwyższym ciśnieniu złożowym. Można więc przyjąć, że oszacowanie metanoności na bazie pomiaru desorbowalnej zawartości metanu wymaga podniesienia jej wartości o około $2,25 \text{ m}^3/\text{Mg}_{\text{CSW}}$, przy czym statystycznie czynnik ten wygeneruje niepewność pomiarową nieprzekraczającą $(\pm 0,4) \text{ m}^3/\text{Mg}_{\text{CSW}}$. Rozumowanie to wskazuje, iż pomiar desorbowalnej zawartości metanu ma kluczowe znaczenie w ocenie wartości oraz zmienności metanoności w pokładzie węgla.

Prowadzenie pomiaru za pomocą urządzenia AREM wymaga odnotowania kilku początkowych wartości, które służą do kompensacji strat metanu, który wydzielił się z próbki pomiędzy czasem rozpoczęciem wiercenia fragmentu otworu, z którego pobrane zostały zwierciny, a rozpoczęciem obserwacji za pomocą urządzenia. Pomiar kolejnych wartości pośrednich pozwoli na określenie efektywnego współczynnika dyfuzji. Jeśli istotna jest dla nas

²⁰ Orzechowska-Zięba A., Nodzeński A., Chłonność sorpcyjna węgla kamiennego względem węglowodorów C₆–C₈, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 2008, 24, 3/3

²¹ Dutka B., Walaszczyk J., Wierzbicki M., Określenie ciśnienia złożowego metanu na podstawie pomiarów metanoności oraz badań sorpcyjnych węgla na przykładzie KWK „Krupiński”, Górnictwo i Geoinżynieria 2009, 33, 1, 145–152

tylko informacja o desorbowalnej zawartości metanu w węglu, zapisane powinny być pomiary do około 10 minuty oraz wartość końcowa.

Urządzenie pomyślnie przeszło testy zarówno laboratoryjne, jak i kopalniane. Zaobserwowano dobrą korelację pomiędzy rejestrowanymi pomiarami, a metanonośnością wyznaczaną metodą bezpośrednią otworową, zgodnie z normą²².

Opisywana metoda pomiarowa oraz urządzenie zostały zastrzeżone wnioskiem patentowym²³. Urządzenie zostało nagrodzone złotym medalem na międzynarodowych targach wynalazczości i innowacyjności w Macao²⁴ (Chiny) w 2015 r.

W roku 2012 opracowałem założenia kolejnego unikatowego przyrządu metrologicznego i metodyki pomiarowej oraz złożyłem indywidualny wniosek patentowy²⁵. Zaproponowana koncepcja elektronicznego przyrządu pomiarowego oceniającego desorbowalną zawartość metanu w węglu oraz efektywny współczynnik dyfuzji, stanowiła równoległą z wersją analogową urządzenia ścieżkę projektu Lider (NCBiR, 2013-2015), którego byłem kierownikiem. Metoda pomiarowa oraz urządzenie opisane zostały w **pracy**²⁶ **IV**.

Cyfrowy Rejestrator Emisji Metanu CREM mierzy ilość metanu emitowanego z próbki węgla na podstawie rejestracji zmian ciśnienia w komorze o znanej objętości. Konstrukcja analizatora znamienna jest następującymi cechami:

- przyrząd posiada dwie komory, pomiędzy którymi mierzone jest ciśnienie różnicowe,
- wykorzystany jest różnicowy przetwornik ciśnienia o bardzo wysokiej czułości oraz dwa miniaturowe elektrozawory, łączące pneumatycznie komory przyrządu z otoczeniem.

Przyrząd podczas pomiaru wykonuje cyklicznie sekwencję, której początek stanowi hermetyczne zamknięcie pojemnika z węglem nasyconym metanem w komorze pomiarowej. Następnie oba elektrozawory zostają na ułamek sekundy otwarte, co prowadzi do zerowania ciśnienia różnicowego między komorami. W kolejnym kroku oba elektrozawory są zamykane, a w wyniku emisji gazu z próbki węgla ciśnienie różnicowe w komorze z próbką narasta, względem komory odniesienia, co rejestruje przetwornik ciśnienia. W momencie osiągnięcia wartości ciśnienia różnicowego bliskiego zakresowi pomiarowemu przetwornika ciśnienia różnicowego (około 1kPa) ponownie otwierane są elektrozawory, co skutkuje wyzerowaniem ciśnienia różnicowego i powrotem do początku cyklu. Każdy z omówionych cykli odpowiada zarejestrowaniu przez system wyemitowanej z węgla powtarzalnej porcji metanu. Koncepcja dwukomorowa z cykliczną pracą przyrządu umożliwia zastosowanie precyzyjnego przetwornika ciśnienia różnicowego oraz zapewnia quasi-izobaryczne warunki prowadzenia pomiaru. Pozwala także na pracę urządzenia w szerokim zakresie pomiarowym przetwornika

²² PN-G-44200:2013-10, Górnictwo – Oznaczanie metanonośności w pokładach węgla kamiennego – Metoda zwiercinowa, 2013

²³ Patent P-409736: Skoczylas N., Kudasik M., Wierzbicki M., Murzyn T., Analogowy analizator zawartości gazu desorbowalnego i kinetyki emisji gazu z węgla wykorzystujący ciecz znacznikową przemieszczającą się w kanele pomiarowym, zgłoszony 2014.10.09, udział Skoczylas N.: 30%

²⁴ Wyróżnienie Golden medal Macao International Innovation & Invention Expo, 2015: Skoczylas N., Kudasik M., Wierzbicki M., Murzyn T., Analogue Methane Emission Recorder AMER, Macao Innovation and Invention Association

²⁵ Wniosek patentowy 398973: Skoczylas N., Sposób rejestracji przebiegu emisji gazu desorbującego i analizator emisji gazu desorbującego, zgłoszony 2012.04.25, przyznany 2016.04.25

²⁶ Skoczylas N., Kudasik M., Wierzbicki M., Murzyn T., New instruments and methods for analysing the coal-methane system, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2015, 37, 1, 85–91

oraz umożliwia zastosowanie modelu dyfuzji Cranka²⁷ do interpretacji obserwowanego zjawiska. W przypadku wykorzystania przetwornika absolutnego, precyzja pomiaru zmian ciśnienia byłaby znacznie niższa. Skutkowałoby to także koniecznością odejścia od quasi-izobarycznych warunków prowadzenia pomiaru (przyrost ciśnienia w komorze pomiarowej musiałby być znaczny). Ewentualne zastosowanie przetwornika różnicowego z przyłączem otwartym względem otoczenia jest niemożliwe, ze względu na specyfikę środowiska pracy przyrządu – wyrobisko kopalniane, gdzie wykorzystywane są skomplikowane systemy przewietrzania, skutkujące dynamicznymi lokalnymi fluktuacjami ciśnienia. System dwukomorowy pozwala także zniwelować wpływ zmian temperatury na rejestrowane wyniki.

Pracą urządzenia zarządza mikrokontroler, który realizuje cykliczną pracę systemu pomiarowego, reaguje na polecenia wydawane za pomocą klawiatury, wyświetla wyniki na ekranie oraz wykorzystuje zaimplementowany model procesu dyfuzji. Umożliwia on również automatyczne korygowanie straty metanu, a także prowadzenie nadążnej ekstrapolacji, co pozwala podać przybliżone wyniki już po godzinie.

W mojej opinii zaproponowana metoda pomiarowa może uzupełnić dotychczas stosowane procedury pomiarowe. Potencjalne zalety wynikające z konstrukcji i właściwości proponowanego urządzenia to:

- nieograniczony zakres pomiarowy,
- niwelowanie wpływu zmian temperatury na wynik pomiaru,
- możliwość zastosowania urządzenia w warunkach kopalnianych zapewniona dzięki niewielkiemu rozmiarowi, zasilaniu akumulatorowemu, pełnej autonomii metrologicznej (dzięki mikrokontrolerowi) oraz wykonaniu iskrobezpiecznemu (potwierdzone certyfikatem),
- jako wynik pomiaru otrzymujemy parametry, wyznaczone w czasie poniżej 24h, których określenie dostępnymi obecnie metodami możliwe jest jedynie w warunkach laboratoryjnych na specjalistycznej i kosztownej aparaturze badawczej,
- zintegrowany mikrokontroler nadzorujący pracę urządzenia, dzięki zaimplementowaniu modelu dyfuzji pozwala na określenie efektywnego współczynnika dyfuzji, a także ekstrapolowanie gromadzonych pomiarów w celu prognozowania wstępnych wyników,
- desorbowaalna zawartość metanu oraz efektywny współczynnik dyfuzji to parametry o ogromnym potencjale informacyjnym, szczególnie istotnym w aspekcie oceny zjawisk gazogeodynamicznych,
- wartość „strat gazu” obliczana jest indywidualnie dla każdego pomiaru na bazie relacji pierwiastkowej o zweryfikowanej skuteczności.

²⁷ Wierzbicki M., Effect of selected simplifications of the unipore model upon the result of the study of the diffusion coefficient in coal, Archives of Mining Sciences 2011, 56, 4, 761–776

Urządzenie CREM zostało nagrodzone złotymi medalami na międzynarodowych targach innowacyjności ITEX '15 w Malezji²⁸ oraz SIIF 2015 w Seulu²⁹. W mojej opinii metoda pomiarowa oraz opisane urządzenie posiada duży potencjał komercyjacyjny. W prosty i nisko-kosztowy sposób można wykonywać częste pomiary parametrów układu węgiel-metan w warunkach wyrobiska. Metoda ta, w mojej ocenie, mogłaby stanowić uzupełnienie badań metanonośności, a co najważniejsze mogłaby być wykonywana rutynowo i cyklicznie. Opisane urządzenie pomiarowe jest unikatowe w skali światowej i jako pierwsze umożliwia określenie współczynnika dyfuzji w warunkach kopalnianych. Analiza zmienności współczynnika dyfuzji rejestrowanego systematycznie w trakcie drążenia wyrobiska chodnikowego jest nową metodą profilaktyki związanej z wyszukiwaniem lokalnych, wcześniej nierozpoznanych zaburzeń geologicznych, jako miejsc szczególnie zagrożonych zjawiskami gazogeodynamicznymi³⁰.

Prace konstrukcyjne oraz badania laboratoryjne zwieńczone zostały obszerną walidacją metody w warunkach kopalnianych opisaną w **pracy³¹ V**. Najistotniejszym elementem testów kopalnianych było porównanie otrzymywanych wyników zawartości metanu w węglu z metanonośnością określaną metodą zwiercinową, zgodnie z normą PN G-44200:2013. Procedura oznaczania metanonośności jest stosunkowo skomplikowana. Określanych jest wiele parametrów pośrednich, stała korekta straty gazu uwzględniana jest arbitralnie, procedura pomiarowa jest czasochłonna i łączy ze sobą badania kopalniane i laboratoryjne. Wyniki badań porównawczych oznaczania metanonośności metodą bezpośrednią-otworową, na której bazuje norma, wykonane na powtarzalnych próbkach przez jednostki uprawnione, wskazują rozbieżności względem wartości średniej sięgające 30%³². W opinii autora, pomimo opisanych trudności określania metanonośności metodą zgodną z normą PN G-44200:2013, precyzyjne przestrzeganie metodyki, staranność na każdym etapie prac oraz wykorzystywanie zaawansowanych narzędzi metrologicznych, powinno skutkować określeniem wiarygodnej wartości metanonośności, co uprawnia do wykorzystania tych wyników jako referencyjnych.

Klasyczne metody desorbometryczne są szybkie, bezpośrednie i oznaczalne w warunkach kopalnianych, co stanowi ich dużą zaletę. Metody te jednak generują wyniki na podstawie badania niewielkiego fragmentu emisji metanu z ziarnistej próbki węgla. W **pracy V** opisałem przykładowy pomiar metanonośności dwóch próbek, dla których wyniki zarówno metodą zwiercinową, jak i autorską były zgodne, jednak wartości wskaźnika intensywności desorpcji znacznie się różniły. Przyczyną opisanego spostrzeżenia była ponad dwukrotnie wyższa wartość efektywnego współczynnika dyfuzji dla węgla, w przypadku którego wartość

²⁸ Wyróżnienie Gold Prize 26th International Invention & Innovation Exhibition ITEX 2015: Skoczylas N., Digital Methane Emission Recorder DMER, Malaysian Invention and Design Society

²⁹ Wyróżnienie Golden medal Seoul International Invention Fair 2015: Skoczylas N., Kudasik M., Wierzbicki M., Murzyn T., New devices and methods of analysis of coal-methane system, Macao Innovation and Invention Association

³⁰ Wierzbicki K., Przebieg kinetyki adsorpcji metanu jako wskaźnik zmian strukturalnych pokładu w rejonie stref uskokowych, Przegląd Górniczy, 2011, 67, 6, 70-75

³¹ Skoczylas N., Fast evaluation of the coalbed methane content of coal viewed as an element in improving safety conditions of mining operations, *Mineral Resources Management*, 2016, 32, 2, 5–30

³² Ryszka, M., Sporysz G., Weryfikacja bezpośredniej metody oznaczania metanonośności pokładów węgla kamiennego stosowanej w polskim górnictwie, część II - porównania międzylaboratoryjne oznaczenia metanonośności węgla, *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, 2008, 9

wskaźnika intensywności desorpcji miała wyższą wartość. Jeśli założymy niewielką zmienność efektywnego współczynnika dyfuzji w obrębie pojedynczych partii bądź pokładów oraz wyeliminujemy potencjalny wpływ zaburzeń geologicznych na lokalne zmienności jego wartości, można przyjąć, iż wartości wskaźnika intensywności desorpcji będą dobrze skorelowane z metanonośnością.

Głównym celem autora w trakcie opracowywania nowej metody i urządzenia było umożliwienie relatywnie szybkiej oceny zawartości metanu w węglu i kinetyki jego emisji. Doświadczenia wynikające z badań laboratoryjnych wskazywały, iż podstawową drogą do osiągnięcia zakładanych celów jest znaczne obniżenie klasy ziarnowej względem wykorzystywanej w desorbometrze manometrycznym. Analiza pomiarów kopalnianych poprzedzona została rozważaniami modelowymi. Dla uśrednionej wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wyznaczonego na węglach z różnych pokładów KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”, na podstawie modelu dyfuzji Cranka, wygenerowałem czasowe przebiegi emisji metanu z węgla o klasach ziarnowych: desorbometrycznej (0,50–1,00 mm) oraz niższych. Dla analizowanej wartości D_e emisja metanu zbliża się do wartości asymptotycznej po około 5 dniach dla klasy ziarnowej 0,50–1,00 mm, po około 2 dniach dla klasy ziarnowej 0,315–0,500 mm oraz odpowiednio po 24 i 12 godzinach dla klas ziarnowych 0,250–0,315 mm oraz 0,20–0,25 mm. Ze względu na występowanie w GZW węgla o niższych wartościach D_e od analizowanej wartości średniej, racjonalny jest wybór najniższej z wymienionych klas. Ponadto na wynikach modelowych wykazałem, jak silnie wpływa wartość efektywnego współczynnika dyfuzji na wyniki pomiarów desorbometrem manometrycznym.

W trakcie testów ruchowych urządzenia CREM, analizie poddałem wyniki pochodzące z serii 17 pomiarów wykonanych w kopalniach „Pniówek”, „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch Zofiówka, „Budryk” oraz „Brzeszcze”. Pomiar zawartości metanu w węglu oraz tempa jego emisji wykonane zostały zgodnie z opracowaną metodyką na autorskim urządzeniu. Równolegle określane były: metanonośność zgodnie z normą PN G-44200:2013 oraz wskaźnik intensywności desorpcji zgodnie z normą PN-G-04567:1996. W przypadku metody autorskiej, czas jaki upływał pomiędzy rozpoczęciem wiercenia analizowanego fragmentu otworu badawczego, a umieszczeniem próbki w urządzeniu CREM nie został odgórnie narzucony, gdyż z punktu widzenia poprawności analizy emisji metanu, ważniejszym jest dokładne odsianie wykorzystywanej klasy ziarnowej, niż minimalizowanie czasu rozpoczęcia pomiaru. Model zaimplementowany w systemie mikroprocesorowym urządzenia skutecznie wylicza indywidualną stratę gazu na bazie uproszczenia pierwiastkowego stosowanego w początkowej fazie emisji metanu. Bezpośrednim wynikiem pomiaru urządzeniem CREM jest desorbowalna zawartość metanu w węglu. Wartość ta nie uwzględnia gazu wolnego, niezwiązanego sorpcyjnie z węglem oraz pojemności sorpcyjnej przy ciśnieniu metanu 0,1 MPa. Metanonośność jest szacowana, poprzez uzupełnienie desorbowalnej zawartości metanu w węglu o stały czynnik $2,25 \text{ m}^3/\text{Mg}$ reprezentujący uśrednioną wartość gazu wolnego i pojemności sorpcyjnej w warunkach GZW, przy czym podstawy teoretyczne tej korekty przedstawione zostały w trakcie omawiania wersji analogowej analizatora.

Wyniki walidacji kopalnianej wskazują na występowanie wysokiej zbieżności wartości metanonośności uzyskanych metodą autorską, względem metody zwiercinowej. Dla połowy pomiarów względne różnice nie przekraczały 5%, a jedynie w przypadku 3 pomiarów były wyższe od 10%. Należy podkreślić, iż opisywana metoda to szybkie oznaczenie wykonywane w warunkach kopalnianych. Przeprowadzona została także analiza, jaka wartość korekty uwzględniającej gaz wolny oraz pojemność sorpcyjną zapewniłaby największą zbieżność wyników pomiędzy metodą autorską, a zgodną z obowiązującą normą. Wartość ta wyniosła 2,36 m³/Mg, co różni się od oszacowanej teoretycznie o zaledwie 4,8%.

Dodatkowo, analiza zmienności efektywnego współczynnika dyfuzji w serii pomiarów lokalnych może dostarczyć informacji o nierozpoznanych zaburzeniach geologicznych, którym często towarzyszą zmiany strukturalne węgla skutkujące znacznym podwyższeniem wartości efektywnego współczynnika dyfuzji. Metoda pozwala na wyznaczenie wartości efektywnego współczynnika dyfuzji w warunkach wyrobiska kopalnianego, co metodami obecnie stosowanymi możliwe jest tylko w warunkach laboratoryjnych na specjalistycznej aparaturze. Metoda łączy ze sobą zalety szybkich oznaczeń kopalnianych, ustrzegając się jednocześnie ich wad.

c.4. Badania układu skała-gaz w warunkach laboratoryjnych – filtracja i dyfuzja

Badania związane z występowaniem metanu w pokładzie, bądź w ogólności gazu w skale, dotyczą często rozpoznania parametrów opisujących transport gazu w obrębie skały. W skali pokładu bądź próbek większych niż drobna klasa ziarnowa, przyjęto się opisywać transport jako proces filtracji. Rozważania dotyczące przepływu płynów przez ośrodki porowate najczęściej oparte są na prawie Darcy'ego³³. W przypadku gazów, w oparciu o prawo Darcy'ego, przepuszczalność można wyznaczyć określając wydatek gazu, ciśnienia na wlocie i wylocie próbki, długość i powierzchnię przekroju próbki oraz znając lepkość gazu. Największe problemy w tego typu pomiarach związane są z precyzyjną stabilizacją ciśnienia oraz pomiarem wydatku, który w zależności od badanej skały, może zmieniać się w szerokich granicach. W **pracy**³⁴ **VI** przedstawiłem własne koncepcje metrologiczne, opisałem przeprowadzone badania przepuszczalności skał na autorskiej aparaturze pomiarowej oraz określiłem jej podstawowe właściwości.

Źródło filtrującego gazu powinno utrzymywać stały poziom ciśnienia na wyjściu niezależnie od zmieniającego się wydatku. W aparaturze wykorzystałem manostat³⁵, którego jestem współtwórcą. Manostat składa się z dwóch zbiorników połączonych ze sobą przy pomocy elementu tłumiącego przepływ (np. kapilary) oraz elektrozaworu. Pierwszy zbiornik to źródło gazu, natomiast drugi pełni funkcję bufora. System mikroprocesorowy analizuje odczyty z manometru zbiornika buforowego. Gdy wartość ciśnienia spadnie poniżej nastawionej, system wysyła impuls elektryczny otwierający na krótką chwilę elektrozawór. Przez tłumik pneumatyczny przepływa porcja gazu, która dociera do zbiornika buforowego.

³³ Darcy H., Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, 1856, Victor Dalmont: Paris

³⁴ Skoczylas N., **Determining the gas permeability coefficient of a porous medium by means of the bubble-counting flow meter**, *Measurement Science and Technology*, 2015, 26, 085004

³⁵ Kudasik M., Skoczylas N., Sobczyk J., Topolnicki J., Manostat – an accurate gas pressure stabilizer, *Measurement Science and Technology* 2010, 21

Dzięki zbiornikowi buforowemu nie obserwuje się dużych skoków ciśnienia na wyjściu układu. Parametry systemu, takie jak maksymalny wydatek oraz stabilność ciśnienia wyjściowego, determinowane są przede wszystkim tłumieniem przepływu przez element tłumiący oraz objętość zbiornika buforowego. Zastosowanie odcinka kapilary stalowej o długości około 30 cm i średnicy wewnętrznej około 0,25 mm oraz zbiornika buforowego o objętości 5 dm³ pozwoliło na stabilizowanie ciśnienia wyjściowego na poziomie 0–0,7 MPa ±50 Pa, przy wydatkach niższych od 250 cm³/min. Manostat został wyróżniony dyplomem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w 2014 roku oraz nagrodą Silver Prize Macao Innovation & Invention Association w 2013 roku.

Najistotniejszym elementem aparatury stosowanej do określania przepuszczalności jest przepływomierz gazowy. Problemem metrologicznym jest ogromna zmienność przepuszczalności, której wartość dla skał może różnić się o kilka rzędów wielkości. Oznacza to, iż przy stałym gradiencie ciśnienia wydatek gazu może zmieniać się w bardzo szerokim zakresie. Jako typowe propozycje przepływomierzy można rozważyć zestaw czułych rotametrów³⁶ lub przepływomierz zwężkowy³⁷. W opisywanej aplikacji wykorzystałem przepływomierz własnej konstrukcji, zliczający pęcherzyki gazu. Sposób pomiaru wydatku gazu wykorzystuje zjawisko barbotażu (perlenia się gazu przez warstwę cieczy). Zgodnie z teorią hydrauliki barbotażu, w przepływie pojedynczych pęcherzyków, średnica pęcherzyka jest zależna od średnicy dyszy wylotowej, napięcia powierzchniowego cieczy, gęstości cieczy oraz gęstości gazu. Jeśli w warunkach laboratoryjnych zagwarantujemy niezmiennosc opisanych parametrów, każdy zliczany pęcherzyk gazu odpowiadał będzie porcji gazu ustalonej w trakcie wzorcowania. Bezpośrednim wynikiem pomiaru wydatku jest częstotliwość odrywania się pęcherzyków gazu z dyszy pomiarowej, rejestrowana za pośrednictwem elementów optoelektronicznych składających się ze źródła światła oraz ich odbiornika. Kalibracja wykazała, iż zgodnie z oczekiwaniami, objętość pojedynczego pęcherzyka jest niezależna od wydatku mierzonego gazu. Oczywiście obserwacja ta dotyczy przepływów, w których poszczególne pęcherzyki nie łączą się ze sobą tworząc przepływ łańcuchowy. Górny zakres pomiarowy zbudowanego przyrządu wynosił około 20 cm³/min, dolny oszacowany został na około 0,001 cm³/min.

Omówiony zestaw dobrze sprawdza się w określaniu przepuszczalności gazu w skale. W trakcie testów przebadalem próbki skał dolomitów i anhydrytów pochodzące z kopalń O/ZG „Rudna” i OZ/G „Polkowice-Sieroszowice”. Wartości mierzonej przepuszczalności oscylowały wokół 3·10⁻¹⁹ m². Pomiar wykazywały dużą powtarzalność. Analiza literatury wskazuje, iż zastosowana konstrukcja przepływomierza nie była w tego typu aplikacjach wykorzystywana. Dzięki nieograniczonemu dolnemu zakresowi pomiarowemu oraz stosunkowo wysokiemu górnemu zakresowi, możliwe jest badanie skał znacznie różniących się przepuszczalnością.

Przepływomierz gazowy zliczający pęcherzyki gazu o udoskonalonej konstrukcji znalazł także zastosowanie w laboratoryjnym analizatorze przebiegu emisji metanu z ziarnistych

³⁶ Vedat T., Haydar E., A new production technique for rotameters and venturimeters, *Measurement* 2006, 39, 674–679

³⁷ Topolnicki J., Kudasik M., Skoczylas N., Sobczyk J., Low cost capillary flow meter, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 152, 2, 146–150

próbek węgla omówionym w **pracy**³⁸ **VII**. Autorska koncepcja metody pomiarowej stanowiła jeden z kierunków rozwojowych w trakcie realizacji cyfrowej wersji rejestratora emisji metanu w kierowanym przeze mnie projekcie. Równolegle powstały dwa różne prototypy urządzeń, z których jeden, wyłoniony w wyniku testów laboratoryjnych, miał być rozwijany. Omówiony wcześniej przyrząd, wykorzystujący różnicowy przetwornik ciśnienia, pracujący cyklicznie w dwukomorowej konstrukcji okazał się znacznie bardziej odporny na zakłócenia, przez co predysponowany do pracy w warunkach kopalnianych. Pomimo, iż analizator emisji metanu na bazie przepływomierza zliczającego pęcherzyki gazu nie doczekał się wersji kopalnianej, przeprowadzone badania wykazały jego ogromną przydatność w warunkach laboratoryjnych.

Badania układu węgiel-gaz, w szczególności dotyczące analizy ilości sorbowanego gazu oraz kinetyki jego emisji, są niezwykle ważne w kontekście analizy stanu zagrożeń metanowych i wyrzutami gazu i skał. Mogą być także przydatne w pracach naukowych dotyczących analiz parametrów sorbentów. Komercyjnie dostępne analizatory sorpcyjne można podzielić na dwa typy: grawimetryczne i wolumetryczne. Analizatory grawimetryczne to stacjonarne, precyzyjne i bardzo skomplikowane przyrządy. Największa wada metrologiczna tego typu rozwiązań dotyczy problemów ze skokową zmianą ciśnienia rozpoczynającą procesy sorpcji i transportu gazu. Problem ten przekłada się na wzrost niepewności pomiarowych oznaczania współczynnika dyfuzji. Analizatory wolumetryczne są znacznie tańsze od grawimetrycznych odpowiedników i zapewniają skokowe zmiany ciśnienia, jednak sam pomiar jest najczęściej nieizobaryczny, więc trudno jest za ich pomocą oznaczyć współczynnik dyfuzji na bazie modelu Cranka. W omawianej pracy zaprezentowałem metodę pomiarową opartą na przepływomierzu gazowym wykorzystującym zjawisko barbotażu. Koszt budowy tego urządzenia jest kilkudziesięciokrotnie niższy od dostępnych komercyjnie urządzeń grawimetrycznych i wolumetrycznych. Zmiana ciśnienia może być skokowa, a pomiar emisji metanu odbywa się w warunkach quasi-izobarycznych.

W **pracy VII** przedstawiłem wyniki badań sorpcyjnych, obejmujących rejestrację emisji metanu z próbek węgla, po zmianie ciśnienia otaczającego z 1 MPa do 0,1 MPa. Badania zestawiono z analogicznym eksperymentem wykonanym na wadze sorpcyjnej IGA, traktowanej jako urządzenie referencyjne. W przypadku badań na urządzeniu referencyjnym zmiana ciśnienia z 1 MPa do 0,1 MPa zachodziła w tempie 0,03 MPa/min, co wynika z ograniczeń technicznych sorpcyjnego analizatora grawimetrycznego IGA. W przypadku urządzenia autorskiego nasycanie próbki metanem wykonane zostało w zewnętrznym zbiorniku ciśnieniowym. Uruchomienie pomiaru polegało na nagłym, trwającym poniżej 1 s, obniżeniu ciśnienia z 1 MPa, do ciśnienia atmosferycznego poprzez otwarcie zaworu. Następnie materiał węglowy umieszczany był w badanym urządzeniu sorpcyjnym, co było równoznaczne z początkiem rejestracji emisji metanu. Czas pomiędzy nagłym obniżeniem ciśnienia, a początkiem rejestracji wynosił około 40 s. Fragment ten można ekstrapolować na

³⁸ Skoczylas N., Analyzing the parameters of the coal-gas system by means of a low-cost device based on a flow meter, *Adsorption Science & Technology*, 2015, 33, 9, 769–782

podstawie zależności pierwiastkowej dokładnie opisującej początkową fazę dyfuzji³⁹. Dodatkowo wykonałem interpolację rejestrowanych przebiegów wykorzystując model uniporowy. Zaobserwowałem wyraźnie lepszą jakość dopasowania modelu do danych pomiarowych wygenerowanych na urządzeniu testowanym, względem referencyjnego, co potwierdza kilkakrotnie niższa wartość sumy kwadratów odchyłek dopasowania (metoda gradientowa, minimalizacja funkcji celu – sumy kwadratów odchyłek). Prawdopodobna przyczyna opisanej obserwacji wynika z tempa zmian ciśnienia otaczającego próbkę. Jednym z podstawowych założeń modelu uniporowego jest wymóg skokowej zmiany ciśnienia, jako czynnika rozpoczynającego proces dyfuzji. Przebieg emisji metanu jest najbardziej dynamiczny w pierwszym jego okresie. Jeśli zmiana ciśnienia trwa zbyt długo w stosunku do całkowitego czasu emisji, czynnik ten znacznie zakłóca proces dyfuzji. Na wykresach przedstawiłem nienaturalne punkty przegięcia zarejestrowanego przebiegu emisji metanu na urządzeniu referencyjnym. W przypadku urządzenia testowanego charakter przebiegu emisji jest bardziej naturalny. Opisane zjawisko przekłada się także na wartość wyznaczonego efektywnego współczynnika dyfuzji De . Analiza wykresów pozwala stwierdzić, iż emisja metanu zachodzi wolniej w przypadku urządzenia wzorcowego. Potwierdzają to także wyliczone wartości De . W przypadku przeanalizowanych próbek, efektywny współczynnik dyfuzji De wyznaczony na urządzeniu referencyjnym względem testowego był niższy o kilkanaście procent. Należy jednak pamiętać, iż naturalna zmienność efektywnego współczynnika dyfuzji metanu na węglach o różnych parametrach sięga dwóch rzędów wielkości. Ze względu na naturę De otrzymane rozbieżności należałoby rozpatrywać w skali logarytmicznej, co sprowadza kilkunastoprocentowe rozbieżności do wartości relatywnie niskich.

Podstawowe zalety opracowanej metody obejmują niski koszt wytworzenia (kilkadziesiąt razy niższy, niż w przypadku komercyjnie dostępnych sorpcyjnych analizatorów grawimetrycznych), możliwość wygenerowania quasi-skokowych zmian ciśnienia (w przeciwieństwie do metod grawimetrycznych), nieograniczoną możliwość rejestracji długoczasowych emisji metanu oraz izobaryczność prowadzenia pomiaru (w przeciwieństwie do metod wolumetrycznych). W mojej opinii przedstawiona koncepcja prowadzenia pomiarów może być przydatna zarówno do celów naukowych, jak i na potrzeby inżynierskich pomiarów kopalnianych.

Zagadnienia związane z transportem gazu w obrębie ziarn węgla opisywane są mechanizmami dyfuzji, a parametrem charakteryzującym układ węgiel-gaz w aspekcie kinetyki akumulacji, bądź emisji metanu z ziarn jest efektywny współczynnik dyfuzji De . W większości opracowań o charakterze inżynierskim De wyznaczany jest na bazie uproszczonego równania Timofiejewa, w oparciu o czas połówkowy, odpowiadający chwili, w której uwolniona (bądź zakumulowana) zostanie połowa całkowitej ilości gazu biorącego udział w procesie. W pracach o charakterze naukowym wykorzystywane jest najczęściej uproszczone rozwiązanie praw Ficka, z liniowym czynnikiem sorpcyjnym, w postaci rozwinięcia w szereg. Ze względu na brak w literaturze spójnego wywodu prowadzącego od I i II prawa Ficka, do rozwiązania

³⁹ Pillalamarry M., Harpalani S., Gas diffusion behavior of coal and its impact on production from coalbed methane reservoirs Liu S., International Journal of Coal Geology, 2011, 86, 342–348

podawanego przez Cranka i Timofiejewa, w **pracy**⁴⁰ VIII opisałem podstawowe założenia, przekształcenia oraz wykorzystane zależności pomocnicze użyte w celu osiągnięcia równania opisującego czasowy przebieg emisji sorbentu z kulistych ziarn sorbatu.

Podstawowe założenia przewidują rozpatrywanie ziarna porowatego sorbentu otoczonego gazowym sorbatem. Przyjąłem, że pory sorbentu tworzą sieć pozwalającą na transport cząstek w obrębie ziarna, gdzie przebiegają współzależne procesy sorpcyjnego oddziaływania molekuł sorbatu z powierzchnią porów i transportu sorbatu. W procesach takich uczestniczy zewnętrzny, gazowy sorbat i sorbat zakumulowany w sieci porów sorbentu. Zakumulowany sorbat podzieliłem na dwie kategorie: sorbat związany sorpcyjnie składający się z cząstek uwięzionych na ściankach porów, które nie są zdolne do migracji oraz sorbat mobilny, rozumiany jako cząsteczki zdolne do transportu wzdłuż sieci porów. W wyniku pobudzenia termicznego, możliwa jest wymiana cząstek pomiędzy tymi dwoma kategoriami sorbatu. W warunkach równowagi wymiana ta jest zrównoważona. Parcjalaną gęstość mobilnego sorbatu stanowi masa mobilnego sorbatu zawarta w jednostkowej objętości porów, natomiast masa mobilnego sorbatu zawarta w jednostkowej objętości sorbentu stanowi parcjalaną koncentrację mobilnego sorbatu. Analogicznie zdefiniowałem parcjalaną gęstość i parcjalaną koncentrację sorbatu związanego. W warunkach izotermicznych parametry te określają stan frakcji zakumulowanego sorbatu. Gęstości i koncentracje są powiązane wartością porowatości sorbentu i można je stosować wymiennie. Gęstości, jak i koncentracje parcjalne mogą być traktowane jako wielkości lokalne zależne na ogół od położenia w obrębie sorbentu. Pojęcie równowagi sorpcyjnej definiuję jako makroskopową równowagę ziarna sorbentu z otaczającym go gazowym sorbatem w warunkach stałej temperatury i gęstości (ciśnienia) zewnętrznego gazu. Po wystarczająco długim nasycaniu ziarna sorbentu ustaje wymiana sorbatu pomiędzy ziarnem i otoczeniem. Ustaje również wymiana pomiędzy obiema frakcjami sorbatu zakumulowanego w obrębie ziarna. Do opisu tak rozumianej makroskopowej równowagi sorpcyjnej stosowana jest izoterma sorpcji, która na potrzeby wywodu rozumiana jest jako zależność koncentracji związanego sorbatu od warunków nasycania.

Przyjęto, że transport sorbatu w obrębie sorbentu ma charakter dyfuzji cząstek mobilnego sorbatu napędzanej gradientem parcjalnej koncentracji tego medium. Korzystając z pierwszego prawa Ficka można określić gęstość strumienia dyfundujących cząstek sorbatu mobilnego wykorzystując współczynnik dyfuzji. Dyfuzja sorbatu mobilnego wywołuje zmiany sumarycznej koncentracji zakumulowanego sorbatu, które można opisać drugim prawem Ficka. Jeśli założymy, iż spełniony jest warunek lokalnej równowagi sorpcyjnej, otrzymujemy równanie różniczkowe opisujące dyfuzję sorbatu w obrębie ziarn kulistych sorbentu, przy izotermie opisanej funkcją ciśnienia. Jeśli założymy, iż izoterma sorpcji to liniowa formuła Henry'go, można wtedy wprowadzić tzw. efektywny współczynnik dyfuzji, który pojawia się w pracach Timofiejewa⁴¹ i uwzględnia współczynnik izotermy. Zabieg ten pozwala na podanie

⁴⁰ Skoczylas N., Topolnicki J., *The coal-gas system – the effective diffusion coefficient*, *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, (in press), 2016

⁴¹ Timofiejew D.P., *Adsorption kinetic*, Leipzig, 1967, 335

rozwiązania analitycznego w postaci rozwinięcia w szereg, a więc wynik końcowy wywodu jest zgodny z rozwiązaniem podawanym przez Cranka⁴². Jeśli na drodze aproksymacji współczynniki szeregu zostaną określone tak, by najlepiej odpowiadały danym zarejestrowanym eksperymentalnie, ponadto uwzględni się promień zastępczy ziarna reprezentujący użytą klasę ziarnową, możliwe jest określenie efektywnego współczynnika dyfuzji. W publikacji przedstawiony został także zabieg polegający na wyliczeniu czasu z szeregu podanego przez Cranka, dla którego masa gazu stanowi 50% masy całkowitej (tzw. czas połówkowy). W ten sposób otrzymano uproszczony wzór Timofiejewa stosowany do określania współczynnika dyfuzji w oparciu o czas połówkowy.

W omawianej pracy, wykorzystując numeryczne oraz uproszczone, analityczne rozwiązanie równania dyfuzji, zaprezentowałem wpływ niespełnienia założenia liniowości izotermy sorpcji na wartość współczynnika dyfuzji. W celu ilustracji omawianego problemu wygenerowane zostały czasowe przebiegi emisji sorbatu z porowatego sorbentu. W rozwiązaniu numerycznym równania dyfuzji uwzględniłem przykładową izotermę sorpcji Langmuira dla metanu (CH₄) na węglu. Następnie, w oparciu o izotermę Langmuira, wyznaczyłem izotermy Henry'ego dla punktów sorpcyjnych odpowiadających zmianom ciśnienia 0–0,1 MPa, 0–0,3 MPa, 0–0,6 MPa, 0–1,2 MPa, 0–1,8 MPa. Współczynniki izotermy Langmuira wykorzystane zostały do wygenerowania czasowego przebiegu emisji metanu z ziarn węgla o założonym współczynniku dyfuzji i promieniu zastępczym za pomocą rozwiązania numerycznego. Analogiczne czasowe przebiegi emisji metanu z węgla, przy tych samych wartościach współczynników dyfuzji oraz promieni zastępczych, wygenerowane zostały także na bazie rozwiązania Cranka uwzględniającego izotermę Henry'ego. Zgodnie z przewidywaniami, różnice są stosunkowo niewielkie w początkowym zakresie ciśnień, gdzie izotermy Langmuira i Henry'ego są zbliżone, jednak, dla wyższych ciśnień różnice stają się znaczne.

Bardzo istotnym problemem poruszonym w pracy jest także ocena konsekwencji zastosowania nieskokowej zmiany ciśnienia w trakcie rejestracji emisji metanu. Zestawione zostały wyniki badań emisji metanu z ziarn węgla o klasie ziarnowej 0,20–0,25 mm wywołane zmianą ciśnienia trwającą 4 minuty oraz 1 godzinę. Wyznaczone współczynniki dyfuzji różniły się prawie dwukrotnie.

Decydując się na wykorzystanie analitycznego rozwiązania Cranka należy uwzględnić, iż na wartość oznaczanego efektywnego współczynnika dyfuzji dodatkowy wpływ będą miały między innymi:

- izoterma sorpcji,
- początkowe i końcowe ciśnienie sorbatu w prowadzonym eksperymencie,
- tempo zmian ciśnienia w trakcie prowadzenia eksperymentu.

Istnieje więc konieczność uzupełniania wyników badań dyfuzji w układzie sorbat-sorbent informacjami o warunkach prowadzenia eksperymentu. Bezpośrednie porównywanie wartości efektywnych współczynników dyfuzji wyznaczonych na różnych aparaturach, przy różniących się metodykach pomiarowych, może być kłopotliwe.

⁴² Crank J., *The Mathematics of diffusion*, 1975, 2nd ed. Oxford Univ. Press, London

c.5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Po ukończeniu studiów na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej w roku 2003 rozpocząłem pracę w Pracowni Mikromerytyki Instytutu Mechaniki Górniczej Polskiej Akademii Nauk. Pierwsze moje zadania polegały na prowadzeniu eksperymentów związanych z analizą temperaturowej zależności współczynników opisujących filtrację niestacjonarną⁴³ gazów w brykiecie węglowym. W toku badań nad zjawiskami sorpcji i transportu gazów przez substancję węglową, zespół w którym pracowałem dostrzegł duży potencjał badań nad kinetyką emisji/akumulacji CH₄ oraz CO₂ na węglu. W Pracowni powstała autorska waga sorpcyjna⁴⁴, w której konstruowaniu brałem udział. Sprzęt ten posłużył do inicjacji nowego kierunku badań⁴⁵ prowadzonych w Instytucie, który w przyszłości stał się moim głównym obszarem zainteresowań. Zachęceni właściwościami metrologicznymi zbudowanego urządzenia, doskonaliliśmy jego kluczowe elementy⁴⁶ opisując je w renomowanych czasopiśmie branżowych⁴⁷. W roku 2006 zainteresowałem się szerzej logiką rozmytą jako narzędziem do opisu wiedzy eksperckiej wykorzystywanej do wspomagania podejmowania decyzji. Zjawisko wyrzutu gazu i skał badane jest od przeszło 150 lat, nadal jednak pozostaje słabo przewidywalne. Pomimo braku zależności w formie analitycznych wzorów opisujących stan zagrożenia wyrzutowego w funkcji mierzonych parametrów, wiedza i doświadczenie kadr inżynierskich zatrudnionych w kopalniach oraz w ośrodkach akademickich niejednokrotnie przyczyniły się do podjęcia właściwych działań profilaktycznych, minimalizując niebezpieczeństwo. W artykule⁴⁸, pozyskując wiedzę i doświadczenie od współautora będącego ekspertem w zakresie zagrożeń gazogeodynamicznych, przedstawiłem studium wykonalności systemu eksperckiego na bazie logiki rozmytej, oceniającego stan zagrożenia wyrzutowego. Praca otrzymała nagrodę I stopnia Dyrektora Instytutu Mechaniki Górniczej PAN oraz wyróżnienie Komisji Rady Naukowej Instytutu ds. Odbioru Prac Statutowych. Zainteresowanie tym zagadnieniem skłoniło mnie do podjęcia dalszych prac⁴⁹ oraz wyboru tej tematyki na przewodnik doktorski. Wybrałem szeroką grupę ekspercką składającą się z przedstawicieli przemysłu i nauki⁵⁰. Akwizycję wiedzy eksperckiej prowadziłem na zasadach dwuetapowego ankietowania oraz wywiadu kwestionariuszowego. Pozyskana wiedza ekspercka pozwoliła na stworzenie bazy reguł oraz

⁴³ Topolnicki J., Wierzbicki M., Skoczylas N., Pomiary temperaturowej zależności współczynników opisujących filtrację niestacjonarną gazów poprzez brykiety węglowe, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, 2003, 5, 2, 305–314

⁴⁴ Topolnicki J., Wierzbicki M., Skoczylas N., Testy aparatury do pomiaru kinetyki uwalniania CO₂ z próbek węgla kamiennego, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, 2004, 6, 1-2, 71–78

⁴⁵ Topolnicki J., Wierzbicki M., Skoczylas N., Sobczyk J., Badania kinetyki uwalniania metanu z próbek węglowych pochodzących z wybranych miejsc w pokładzie 409/3 kopalni „Zofiówka”, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, 2005, 7, 3–4, 203–214

⁴⁶ Topolnicki J., Skoczylas N., Low cost dislocation sensor with differential capacitor, Sensors and Actuators A, 2007, 140, 139–144

⁴⁷ Topolnicki J., Skoczylas N., Low cost high sensitivity dynamometer, Measurement, 2011, 44, 74–79

⁴⁸ Wierzbicki M., Skoczylas N., Potencjalne możliwości zastosowania logiki rozmytej w ocenie zagrożenia wyrzutowego w kopalniach, Przegląd Górniczy, 2006, 12

⁴⁹ Skoczylas N., Konceptcja wspomagania analizy ryzyka za pomocą logiki rozmytej na przykładzie zagrożenia wyrzutowego w kopalni węgla kamiennego, Górnictwo i Geoinżynieria, 2008, 321–328

⁵⁰ Skoczylas N., Topolnicki J., Wierzbicki M., Istotność wybranych parametrów górniczych w ocenie zagrożenia wyrzutowego na podstawie badań statystycznych, Przegląd Górniczy, 2010, 6

funkcji przynależności niezbędnych dla przeprowadzenia wnioskowania rozmytego⁵¹ oraz wygenerowania eksperckiej przestrzeni zagrożenia wyrzutowego w funkcji zwięzłości i intensywności desorpcji, która zestawiona została z analogiczną przestrzenią opracowaną na podstawie badań laboratoryjnych. Praca doktorska zatytułowana: *Wykorzystanie logiki rozmytej do oceny ryzyka wyrzutu metanu i skał w kopalniach węgla kamiennego*, obroniona przeze mnie w 2010 roku w Instytucie Mechaniki Górniczej Polskiej Akademii Nauk łączyła ze sobą ścieżkę laboratoryjną oraz elementy komputerowego wspomaganie podejmowania decyzji. W 2011 poszerzyłem opis stanu zagrożeń naturalnych w górnictwie, realizowany w oparciu o wnioskowanie rozmyte, o zagrożenia: metanowe, tąpniowe, pożarowe oraz wybuchem pyłu węglowego. Podjąłem także próbę wypracowania mechanizmów wnioskowania rozmytego, pozwalających na uwzględnienie zagadnienia zagrożeń skojarzonych. Opracowanie⁵², które było podsumowaniem tych badań, stanowiło rozdział wstępny do pracy zbiorowej pod redakcją prof. dr hab. inż. Wacława Dziurzyńskiego: *Model bezpiecznej eksploatacji górniczej, w warunkach kumulacji i koincydencji zagrożeń wentylacyjnych, metanowych i pożarowych*. Za udział w tej pracy otrzymałem zespołową nagrodę imienia Prof. Henryka Czeczotta⁵³.

Bardzo interesująca tematyka, którą zajmowałem się w kolejnych latach dotyczyła badań sorpcji wymiennej CO₂/CH₄⁵⁴. Wraz z zespołem przeprowadziliśmy unikatowe badania, które pozwoliły na opisanie zjawiska sorpcji wymiennej zachodzącej w węglu z uwzględnieniem czynników czasu i przestrzeni. Użyliśmy brykietu węglowego formowanego w podłużnej, cylindrycznej komorze pomiarowej. Materiał węglowy został wstępnie nasycony metanem do stanu uzyskania równowagi sorpcyjnej, a następnie zatłoczony został ditlenek węgla, przy ciągłej rejestracji stężeń i ciśnień gazów wzdłuż osi brykietu. W trakcie badań zaobserwowaliśmy przemieszczającą się wzdłuż brykietu depresję ciśnienia, która sugeruje istnienie rozgraniczonej strefy wymiany sorpcyjnej. Dokonałiśmy oceny efektywności wymiany sorpcyjnej uzyskując wyniki z zakresu 82–98%. Efektywność ta była wyższa przy niższych ciśnieniach zatłaczania CO₂.

Współpraca z przemysłem oraz zapotrzebowanie na badania związane z sorpcją i transportem gazu w ośrodkach porowatych determinowały dalsze kierunki prac. W artykule⁵⁵ przedstawiliśmy badania potwierdzające doświadczalnie, iż sorpcja właściwa, rozumiana jako zmiana ilości stopni swobody molekuł sorbatu w pobliżu powierzchni porów sorbentu zachodzi niemalże natychmiastowo, a aspekty czasowe determinowane są transportem molekuł gazu w porach i szczelinach skał. Obserwacja ta pozwoliła stwierdzić, iż wszelkie

⁵¹ Skoczylas N., Estimating gas and rock outburst risk on the basis of knowledge and experience – the expert system based on fuzzy logic, Archives of Mining Sciences, 2014, 59

⁵² Wierzbicki M., Skoczylas N., Budowa systemu eksperckiego szacującego skojarzone zagrożenia górnicze pochodzące od wybranych grup czynników wentylacyjnych, metanowych i pożarowych opartego na logice rozmytej, rozdział w pracy zbiorowej pod red. prof. dr hab. inż. Wacława Dziurzyńskiego, 2010, 29-81, IMG PAN, Kraków

⁵³ Nagroda im. prof. Czeczotta: Skoczylas N. i pozostali członkowie zespołu, Model bezpiecznej eksploatacji górniczej w warunkach kumulacji i koincydencji zagrożeń wentylacyjnych, metanowych i pożarowych, 2011, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

⁵⁴ 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, 2013

⁵⁵ Gawor M., Skoczylas N., Sorption Rate of Carbon Dioxide on Coal, Transport in Porous Media, 2014, 101, 2, 269–279

pomiary parametrów opisujących układ węgiel-metan, wykonywane na ziarnistych próbkach węgla w istocie stanowią obserwację procesu dyfuzji, natomiast stany ustalone wskazują na właściwości sorpcyjne. Rola współczynnika dyfuzji w opisie układu węgiel-metan, ze względu na trudności metrologiczne była niewielka. Szerszy dostęp do specjalistycznej aparatury badawczej sprawił, iż w ostatniej dekadzie zagadnieniu temu poświęcano więcej uwagi.

Prowadzenie badań z zakresu analizy układu skała-gaz często wymaga projektowania i budowania unikatowej aparatury badawczej. Metody i narzędzia pomiarowe, które projektowałem zdobywały szerokie uznanie zarówno w branżowych czasopismach, jak i na międzynarodowych wystawach wynalazczości i innowacyjności. Znakomitymi przykładami tego typu urządzeń był wielokrotnie nagradzany przepływomierz kapilarny oraz manostat⁵⁶, a także niskokosztowy, tłokowy regulator ciśnienia⁵⁷.

Bardzo interesujące rezultaty dotyczące obrazowania wnętrza otworów odmetanowania w postaci wysokiej jakości materiału filmowego, uzyskałem skanując powierzchnię otworu kamerą introskopową własnej konstrukcji. Urządzenie to, wraz z systemem transportu i pozycjonowania wzdłuż osi otworu, pozwalało na autonomiczną rejestrację obszaru o wymiarach około 2 cm x 3 cm, znajdującego się na poboczniczy otworu o głębokości do 100 m. Obraz charakteryzuje się wysoką reprodukcją szczegółów oraz poprawną reprodukcją kolorów. Zbudowana sonda introskopowa pozwala na ocenę: barwy węgla, jego połyskliwości, pasemkowatości i stopnia spękania. Testy kamery wykazały, iż jej zdolność rozdzielcza przyjmuje wartości nie niższe niż 40 linii na milimetr. Badania kopalniane wykonywałem w otworach odmetanowania – pokład 404/4, KWK "Borynia-Zofiówka-Jastrzębie", Ruch Zofiówka. Podczas opisu materiału pochodzącego z filmu wykonanego w odwiercie, wraz ze współpracującym geologiem, zwróciliśmy uwagę na szereg jego zalet. Jakość zarejestrowanego w otworze materiału przypominała zdjęcia makro wykonywane w typowych warunkach, przy dobrym oświetleniu. Analizując klatka po klatce otrzymany materiał filmowy, można zinterpretować zmianę litologii warstw i szczelinowatości skały oraz zauważyć obecność osobliwości natury geologicznej, takich jak np. zaburzenia strukturalno-teksturalne (szczeliny, spękania, rozdrobnienie materiału skalnego). Efektem pracy może być opracowanie ogólnego profilu litologicznego przewierconych formacji. Jakość materiału zarejestrowanego w trudnych warunkach na długości 80 m w głąb górotworu była na tyle dobra, iż znalazła uznanie recenzentów w czasopiśmie *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*⁵⁸. Zarejestrowany materiał wideo posłużył także do próby wykorzystania opracowanych narzędzi informatycznych, w celu automatyzacji analizy zarejestrowanych struktur geologicznych⁵⁹.

⁵⁶ Kudasik M., Skoczylas N., Sobczyk J., Topolnicki J., Manostat – an accurate gas pressure stabilizer, *Measurement Science and Technology*, 2010, 21

⁵⁷ Kudasik M., Skoczylas N., The low-cost and precise piston gas pressure regulator, *Measurement Science and Technology*, 2016, 27, 3

⁵⁸ Skoczylas N., Godyń K., Evaluating selected lithological features using photographs taken with an introsopic camera in boreholes, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014, 72, 319–324

⁵⁹ Młynarczuk M., Habrat M., Skoczylas N., The application of the automatic search for visually similar geological layers in a borehole in introsopic camera recordings, *Measurement*, 2016, 85, 142–151

Za swoje największe osiągnięcie naukowe uznaję efekty projektu Lider „Nowe urządzenia i metody analizy układu węgiel-metan” (NCBiR, 2013-2015), którego byłem kierownikiem. Opracowane metody i narzędzia stanowią mój osobisty wkład w obszar badań związanych z oceną zawartości metanu i tempa jego emisji z węgla. Prace poprzedzone były długotrwałymi badaniami laboratoryjnymi, modelowymi oraz literaturowymi. Poznanie fizyki zjawiska umożliwiło mi opracowanie nowatorskiej metodyki pomiarowej oraz zaprojektowanie przyrządów metrologicznych realizujących, w warunkach kopalnianych, pomiary desorbowlnej zawartości metanu w węglu oraz efektywnego współczynnika dyfuzji. W szczególności wyznaczenie drugiego z wymienionych parametrów do tej pory wymagało zaangażowania specjalistycznej i kosztownej aparatury badawczej, pracującej w warunkach laboratoryjnych. Metoda została przetestowana w laboratorium oraz *in situ*. Wyniki testów były bardzo dobre. Opracowaną technologię wdrożono do praktyki górniczej w dwóch kopalniach w GZW, jako pomocniczą metodę w ocenie metanonośności oraz skłonności węgla do występowania zjawisk gazogeodynamicznych.

Prace naukowe, które podejmowałem w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN, spotykały się z pozytywnym odbiorem zarówno w kraju, jak i za granicą. Trzykrotnie otrzymywałem nagrodę I stopnia Dyrektora IMG PAN za prace statutowe. Zdobyłem trzy złote i dwa srebrne medale na międzynarodowych targach wynalazczości i innowacyjności oraz dwa Dyplomy Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wynalazki. Posiadam trzy przyznane patenty (w tym jeden indywidualny) oraz cztery złożone wnioski patentowe (w tym jeden indywidualny). Otrzymałem dwie prestiżowe nagrody naukowe: im. Profesora Henryka Czeczotta (za pracę zbiorową) oraz im. Witolda Budryka (indywidualną, za cykl publikacji). Czynn timer uczestniczyłem w 13 konferencjach naukowych (8 referowanych osobiście), w tym międzynarodowych. Pełniłem funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim obronionym w 2015 roku. Od roku 2016 jestem sekretarzem technicznym Komitetu Górnictwa Polskiej Akademii Nauk. Samodzielnie oraz zespołowo opublikowałem 54 prace naukowe, w tym 16 na liście w bazie Journal Citation Reports (JCR). Sumaryczny IF moich prac wynosi 22,46, liczba punktów MNiSW 642, natomiast index Hirsha 5 wg baz Web of Science oraz Scopus (8 wg Publish or Perish). Pełne zestawienie osiągnięć znajduje się w załączniku nr 4.

