

AUTOREFERAT

**PRZEDSTAWIAJACY OPIS OSIĄGNIĘĆ
I DOROBKU NAUKOWEGO**

ZAŁĄCZNIK NR 3

dr inż. Janusz Cygankiewicz

Główny Instytut Górnictwa

Katowice, sierpień 2018

SPIS TREŚCI

1. Imię i nazwisko	3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu	3
4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny Górnictwo i Geologia Inżynierska zgodnie z art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.....	4
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	4
4.2. Wykaz prac naukowych dokumentujących osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego	4
4.3. Omówienie celu naukowego pracy i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich wykorzystania.....	4
4.3.1. Określenie wpływu wybranych parametrów fizykochemicznych węgla, powierzchni właściwej, objętości porów, zawartości wilgoci, temperatury oraz ilości doprowadzanego powietrza na przebieg samozagrzewania	5
4.3.2. Wykazanie, że emisja z zagrzewającego się węgla gazów: tlenku i ditlenku węgla, acetylenu, etylenu, propylenu i wodoru oraz proporcje pomiędzy wartościami stężeń tych gazów są podstawą do stworzenia wskaźników pożarowych stanowiących wzorzec, na podstawie którego wyznaczana jest temperatura zagrzewanego węgla	8
4.3.3. Opracowanie modeli matematycznych i numerycznych służących do prognozowania samozapalania warstwy węgla.....	10
4.3.4. Określenie wpływu parametrów geometrycznych warstw rozkruszonego węgla, parametrów fizykochemicznych przepływającego przez nie powietrza, a także parametrów fizycznych płynów omywających złoża na możliwość zaistnienia samozapalania węgla	14
4.3.5. Opracowanie modelu matematycznego i numerycznego służącego do prognozowania emisji wybranych gazów z zagrzewającej się warstwy węgla	16
4.3.6. Określenie wpływu parametrów geometrycznych złoża rozkruszonego węgla na emisję wybranych gazów	17
4.3.7. Opracowanie zasad doboru wskaźników pożarowych i liczb kryterialnych wraz z zasadami oceny zagrożenia pożarowego	18
4.3.8. Wykorzystanie osiągniętych wyników.....	20
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych wnioskodawcy, świadczących o istotnej aktywności naukowej habilitanta.....	22

5.1.	Ocena stanu zagrożenia pożarowego i prewencji pożarowej w kopalniach.....	22
5.1.1.	Opracowanie metody oceny stanu zagrożenia pożarowego w zrobach ścian opartej na analizie chromatograficznej prób powietrza kopalnianego	22
5.1.2.	Opracowanie sposobu wykrywania śladowych zawartości węglowodorów C ₂ –C ₄ i wodoru w powietrzu kopalnianym	24
5.1.3.	Wyznaczanie warunków krytycznych samozapalenia	24
5.1.4.	Opracowanie nowych metod oceny skłonności do samozapalenia.....	26
5.1.5.	Wykazanie wpływu ciepła wydzielanego podczas utwardzania klejów poliuretanowych na możliwość samozapalenia	27
5.1.6.	Opracowanie nowych metod prewencji pożarowej polegających na równoczesnym podawaniu do zrobów dwutlenku węgla i azotu	28
5.1.7.	Opracowanie metody oceny szybkości wychładzania zaizolowanego pola pożarowego ...	29
5.2.	Sorpcja wybranych gazów na węglach kamiennych.....	30
5.2.1.	Wykazanie wpływu powierzchni węgla wyznaczonej metodą sorpcji ditlenku węgla i azotu oraz porowatości na skłonność do samozapalania	30
5.2.2.	Wykazanie wpływu metamorfizmu węgla i ich składu chemicznego na skłonność do sorpcji gazów	30
5.2.3.	Wykazanie istnienia naturalnej desorpcji gazów używanych do oceny stanu zagrożenia pożarowego.....	31
5.3.	Wybrane problemy wentylacji kopalń	32
5.3.1.	Opracowanie metody stabilizacji sieci wentylacyjnej	32
5.4.	Wybrane problemy klimatyzacji kopalń.....	32
5.4.1.	Określenie wpływu przewietrzania wyrobisk na wychładzanie górotworu	32
5.4.2.	Określenie wpływu schładzania azotu podawanego do zaizolowanych wyrobisk na szybkość wychładzania węgla i masywu skalnego wokół pożaru lub georeaktora.....	34
5.4.3.	Wykazanie wpływu ciepła wydzielonego w wyniku niskotemperaturowego utleniania na mikroklimat w wyrobiskach kopalni.....	34
6.	Zestawienie osiągnięć naukowych po uzyskaniu stopnia doktora	36

1. Imię i nazwisko

Janusz Cygankiewicz

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

Nazwa: Stopień doktora nauk technicznych

Dyscyplina: Górnictwo i geologia inżynierska

Specjalność: Aerologia górnicza

Miejsce uzyskania: Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie

Data uzyskania: 1979

Tytuł rozprawy doktorskiej: Stabilność techniczna przepływu powietrza przez kopalniane sieci wentylacyjne, rozpatrywane jako układy dyskretne.

Promotor: Prof. dr hab. inż. Józef Waćławik

Recenzenci: Prof. dr hab. inż. Henryk Bystroń

Prof. dr hab. inż. Stanisław Kasprzyk

Prof. dr hab. inż. Waćław Trutwin

Nazwa: Dyplom magistra inżyniera górnika technicznej eksploatacji złóż

Specjalność: Aerologia górnicza

Miejsce uzyskania: Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie

Data uzyskania: 1976

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu

1980 – nadal: Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice

Zajmowane stanowiska:

1991 – nadal: Kierownik Zakładu Aerologii Górniczej

1987 – 1991: Kierownik Pracowni Wentylacji Kopalń

1980 – 1987: Adiunkt

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny Górnictwo i Geologia Inżynierska zgodnie z art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Prognozowanie procesu samozapalania węgla w podziemiach kopalń.

4.2. Wykaz prac naukowych dokumentujących osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

I. Monografia. Janusz Cygankiewicz, Prognozowanie procesu samozapalania węgla w podziemiach kopalń, 2018, Katowice, Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa.

4.3. Omówienie celu naukowego pracy i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich wykorzystania

Celem przeprowadzonych przeze mnie badań, których wyniki podsumowane zostały w w/w monografii była metoda prognozowania procesu samozagrzewania węgla w podziemiach kopalń.

Realizacja tego celu wymagała rozważenia następujących problemów naukowych:

- Określenie wpływu wybranych parametrów fizykochemicznych węgla, powierzchni właściwej, objętości porów, zawartości wilgoci, temperatury oraz ilości doprowadzanego powietrza na przebieg samozagrzewania.
- Wykazanie, że emisja z zagrzewającego się węgla gazów: tlenku i ditlenku węgla, acetylenu, etylenu, propylenu i wodoru oraz proporcje pomiędzy wartościami stężeń tych gazów są podstawą do stworzenia wskaźników pożarowych stanowiących wzorzec, na podstawie którego wyznaczana jest temperatura zagrzewanego węgla.
- Opracowanie modeli matematycznych i numerycznych służących do prognozowania samozapalania warstwy węgla, a w szczególności:
 - opracowanie modelu kinetyki utleniania węgla uwzględniającego zmianę mechanizmu reakcji w temperaturze krytycznej;
 - opracowanie matematycznych i numerycznych modeli samozagrzewania warstwy rozkruszonego węgla o różnych kształtach geometrycznych przy wymuszonym i konwekcyjnym przepływie powietrza i różnych sposobach odprowadzania ciepła do otoczenia.

- Określenie wpływu parametrów geometrycznych warstw rozkruszonego węgla, parametrów fizykochemicznych przepływającego przez nie powietrza, a także parametrów fizycznych płynów omywających złożę na możliwość zaistnienia samozapalenia węgla.
- Opracowanie modelu matematycznego i numerycznego służącego do prognozowania emisji wybranych gazów z zagrzewającej się warstwy węgla.
- Określenie wpływu gabarytów geometrycznych węgla na emisję wybranych gazów.
- Opracowanie zasad doboru wskaźników pożarowych i liczb kryterialnych wraz z zasadami oceny zagrożenia pożarowego.

4.3.1. Określenie wpływu wybranych parametrów fizykochemicznych węgla, powierzchni właściwej, objętości porów, zawartości wilgoci, temperatury oraz ilości doprowadzanego powietrza na przebieg samozagrzewania

W badaniach zastosowałem metodę kalorymetrii adiabatycznej. Metoda ta jest szczególnie przydatna do badania procesów niskotemperaturowego utleniania węgla. Pozwala mierzyć ilość wydzielanego ciepła w określonych stałych warunkach zewnętrznych, które określa się na podstawie zmian temperatury próbki i ilości odparowanej wilgoci. W badaniach tych jednak bardzo ważną rolę odgrywa eliminowanie strat ciepła. W literaturze światowej istnieje kilka opisów badań samozapalności węgla z wykorzystaniem kalorymetrów adiabatycznych. Badania te, ograniczające się wyłącznie do wyznaczania krzywych zmian temperatury w zależności od czasu, charakteryzowały się krótkim czasem eksperymentu, na ogół od kilku do kilkunastu godzin. Sugeruje to, że w zastosowanych konstrukcjach kalorymetrów nie wyeliminowano dopływu ciepła do komory reakcyjnej. Takie wyniki stoją w sprzeczności z doświadczeniami praktyki górniczej, gdzie obserwowany czas rozwoju samozapalenia węgla o największej skłonności w najkorzystniejszych dla tego procesu warunkach, tj. przy wysokiej temperaturze pierwotnej i dużej masie rozkruszonego węgla, wynosi co najmniej 10 dni.

Dla przeprowadzenia badań niezbędne było zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego złożonego z 10 kalorymetrów adiabatycznych gwarantujących dużą dokładność pomiarów. Opracowałem założenia konstrukcyjne stanowiska. Główne założenie dotyczyło ograniczenia do minimum odpływu lub dopływu ciepła do komory reakcyjnej, co eliminowało możliwość przyspieszania lub opóźniania przebiegu eksperymentu. Wymagało to między innymi zastosowania odpowiedniego układu pomiarowego i skutecznych systemów grzewczych. Kolejnym ważnym założeniem była możliwość pobierania próbek gazów wypływających z komory reakcyjnej dla przeprowadzenia ich analizy chemicznej oraz możliwość pomiaru wypływającego strumienia pary wodnej.

Opracowałem metodykę badawczą, której podstawą jest konieczność szybkiego dostarczenia pobranej na kopalni próbki węgla do badań. Dla ograniczenia do minimum utleniania próbkę pobiera się specjalnie do tego celu wykonanych hermetycznych pojemników. Próbkę po przewiezieniu do laboratorium kruszy się i natychmiast umieszcza w komorze reakcyjnej. Na opisanym w Rozdziale 3 monografii stanowisku wykonałem badania samozagrzewania węgla pobranych z większości eksploatowanych w kopalniach polskich pokładów. Podczas badań wyznaczyłem:

- szybkość wzrostu temperatury próbki węgla podczas samozagrzewania w funkcji czasu;
- szybkość zużycia tlenu w funkcji temperatury;
- strumień pary wodnej wydzielanej podczas samozagrzewania w funkcji czasu i w funkcji temperatury;
- ciepło jawne wydzielone podczas utleniania węgla w funkcji temperatury;
- ciepło niejawne parowania węgla w funkcji temperatury.

Należy podkreślić, że są to pierwsze opisane w literaturze badania obejmujące tak szeroki zakres. Przykładowe wyniki badań węgla z pokładów 405/1 Kopalni „Borynia” i 207 Kopalni „Sobieski-Jaworzno” zamieściłem w Rozdziale 3 monografii. W oparciu o przeprowadzone badania określiłem wpływ wybranych parametrów fizykochemicznych węgla: zawartości pierwiastka węgla C^a , zawartości części lotnych V^a , zawartości pierwiastka tlenu O^a_d , a także powierzchni właściwej i objętości mikroporów na skłonność do samozapalania. Wykazałem, że węgle o dużej skłonności do samozapalania, np. węgiel z pokładu 207 Kopalni „Sobieski-Jaworzno”, charakteryzują się niską zawartością pierwiastka węgla, wysoką zawartością pierwiastka tlenu i niską zawartością części lotnych. Dla węgla z pokładu 207 Kopalni „Sobieski-Jaworzno” w/w parametry fizykochemiczne wyniosły odpowiednio $C^a_t = 66,51$; $O^a_d = 11,63$; $V^a = 29,73$. Węgłe te charakteryzują się również dużą powierzchnią właściwą wyznaczoną zarówno z sorpcji azotu (równanie BET) oraz z sorpcji CO_2 (równanie Dubinina – Raduszkiewicza). Dla węgla z pokładu 207 Kopalni „Sobieski-Jaworzno” powierzchnie te wyniosły odpowiednio $13,43 \text{ m}^2/\text{g}$ i $185,60 \text{ m}^2/\text{g}$. Duża była również wartość objętości porów, która wyniosła $0,074 \text{ cm}^3/\text{g}$. Wykazałem także, że węgle o wysokiej zawartości pierwiastka węgla, niskiej zawartości pierwiastka tlenu, niskiej zawartości części lotnych, a także małych wartościach powierzchni właściwej i objętości porów charakteryzują się małą skłonnością do samozapalania. Przykładem jest węgiel z pokładu 405/1 Kopalni „Borynia”, dla którego w/w parametry fizykochemiczne wyniosły odpowiednio $C^a_t = 89,21$; $O^a_d = 1,16$; $V^a = 20,88$. Powierzchnia właściwa wyznaczona z równania BET wyniosła $3,02 \text{ m}^2/\text{g}$, natomiast wyznaczona z równania Dubinina-Raduszkiewicza wyniosła $118,14 \text{ m}^2/\text{g}$. Objętość porów wyniosła $0,047 \text{ cm}^3/\text{g}$.

Przeprowadzone przeze mnie badania potwierdziły tezę o podstawowej roli utleniania w procesie samozapalania węgla. Wykazałem też, że szybkość utleniania węgla rośnie wraz

z temperaturą, stąd też przy prognozie zagrożenia pożarowego w wyrobiskach kopalni należy brać pod uwagę wartość temperatury pierwotnej. Temperatura ta w kopalniach polskich zawiera się obecnie w przedziale od 17 do 51 °C. Może się więc zdarzyć, że znajdujący się w zrobach węgiel o niskiej skłonności do samozapalania (utleniania), ale wysokiej temperaturze pierwotnej (np. 45 - 50 °C), np. węgiel z pokładu 405/1 Kopalni „Borynia”, będzie się utleniał z porównywalną szybkością jak węgiel o dużej skłonności do samozapalania mający znacznie niższą temperaturę pierwotną (20 - 25 °C) np. węgiel z pokładu 207 Kopalni „Sobieski-Jaworzno”.

Wykazałem, że po przekroczeniu przez węgiel pewnej wartości temperatury charakterystycznej dla danego typu węgla, szybkość utleniania gwałtownie zwiększa się. Wartość ta nazywana temperaturą krytyczną zawierała się dla przebadanych przeze mnie węgli w przedziale od 70 °C do 90 °C, przy czym im wyższy był stopień metamorfizmu węgla, tym wartość tej temperatury była wyższa. Stwierdziłem, że opisane wyżej zjawisko świadczy o zmianie mechanizmu reakcji w temperaturze krytycznej, co należy uwzględnić w modelu kinetyki utleniania będącym podstawą matematycznego modelu samozapalania węgla. Wykazałem istotny wpływ wilgoci zawartej w węglu na przebieg samozapalania. Dotyczy to przede wszystkim początkowej fazy procesu. Po zagrzaniu do temperatury ok. 80 °C następował gwałtowny wzrost parowania, co w przypadku węgla o dużej zawartości wilgoci skutkowało znacznym spowolnieniem procesu. Spowolnienie to ustępowało jednak po osiągnięciu przez węgiel temperatury 100 °C i wyparowaniem zawartej w nim wilgoci. Przedstawione w monografii otrzymane w wyniku badań kalorymetrycznych przebiegi szybkości wzrostu temperatury próbki węgla z pokładu 405/1 Kopalni „Borynia” i węgla pokładu 207 Kopalni „Sobieski-Jaworzno” (Rozdział 3, Rys. 3 i 9) obrazują wpływ temperatury początkowej i zawartości wilgoci w węglu na przebieg procesu samozagrzewania. Czas testu adiabatycznego (czas osiągnięcia przez węgiel temperatury 200 °C) węgla z pokładu 405/1 Kopalni „Borynia” charakteryzującego się małą skłonnością do samozapalania wyniósł 283 godziny. Temperatura początkowa węgla w eksperymencie wynosiła 46 °C i była równa temperaturze pierwotnej węgla, zawartość wilgoci w węglu była niska i wynosiła $W^a = 1,32$. Czas testu adiabatycznego węgla charakteryzującego się dużą skłonnością do samozapalania pokładu 207 Kopalni „Sobieski-Jaworzno” wyniósł 250 godzin i był niewiele tylko krótszy od czasu testu węgla z pokładu 405/1 Kopalni „Borynia”. Jednak temperatura początkowa równa temperaturze pierwotnej była tu znacznie niższa i wynosiła 25 °C. Znacznie wyższa była natomiast zawartość wilgoci w węglu i wynosiła $W^a = 13,95$. Wykazałem, że czas trwania testu adiabatycznego może być podstawą do klasyfikacji węgla pod względem skłonności do samozapalania. Wykazałem, że pozytywny lub negatywny wynik testu adiabatycznego jednoznacznie wskazuje, czy mamy do czynienia z węglem lub odpadem zawierającym węgiel skłonny lub nieskłonny do samozapalania. Określiłem wpływ prędkości przepływu powietrza przepływającego

przez warstwę rozkruszonego węgla na proces samozapalania. Wykazałem, że prędkość ta ma niezwykle istotny wpływ na przebieg procesu oraz że dla każdego rodzaju węgla o określonym rozdrobnieniu istnieje przedział wartości prędkości przepływu powietrza, w których może dojść do samozapalania. Zbyt mała prędkość przyptywu powietrza nie zapewni dostarczenia do węgla odpowiedniego strumienia tlenu, a zbyt duża spowoduje wynoszenie ciepła, a tym samym wychłodzenie. Wykazałem, że do samozapalania w warunkach adiabatycznych próbki węgla o masie 500 g może dojść, jeśli strumień doprowadzanego do niej powietrza będzie zawierać się w przedziale od 0,2 do 3 dm³ na godzinę. Przy czym dolne wartości odnoszą się do węgla o małej reaktywności.

4.3.2. Wykazanie, że emisja z zagrzewającego się węgla gazów: tlenu i ditlenku węgla, acetylenu, etylenu, propylenu i wodoru oraz proporcje pomiędzy wartościami stężeń tych gazów są podstawą do stworzenia wskaźników pożarowych stanowiących wzorzec, na podstawie którego wyznaczana jest temperatura zagrzewanego węgla

Przeprowadziłem badania ilości i składu gazów wydzielanych podczas samozagrzewania próbek węgla w kalorymetrze adiabatycznym w zakresie temperatur od temperatury równej temperaturze krytycznej do 200 °C. W wypływających gazach oznaczane były wartości następujących gazów: etanu, etylenu, propanu, propylenu, acetylenu, tlenu, tlenku węgla, ditlenku węgla, azotu, metanu i wodoru. Ponieważ konstrukcja kalorymetru adiabatycznego nie pozwalała na wykonywanie badań w temperaturach wyższych niż 200 °C, badania ilości i składu gazów podczas termicznego utleniania próbek węgla w temperaturze do 650 °C przeprowadziłem w zbudowanym pod moim kierunkiem stanowiskach badawczych opisanych w Rozdziale 3 monografii. Stwierdziłem, że ilość i skład gazów wypływających z komór reakcyjnych tych urządzeń zależą od ilości dopływającego powietrza i szybkości wzrostu temperatury. W związku z tym stwierdziłem, że należy przyjmować takie ilości dopływającego powietrza do komór reakcyjnych, które są równe ilościom powietrza doprowadzanego do kalorymetrów adiabatycznych, a szybkości wzrostu temperatury równe szybkościom wzrostu temperatury węgla w końcowej fazie testu adiabatycznego w przedziale temperatur 150-200 °C. Wyznaczałem też strumienie gazów wypływających z komór reakcyjnych. Stwierdziłem, że ilości i skład gazów silnie zależą od typu węgla i jego temperatury. Węgłe o niższym stopniu metamorfizmu, takie jak przedstawiony w monografii węgiel z pokładu 207 Kopalni „Sobieski-Jaworzno”, charakteryzujące się dużą reaktywnością emitowały znacznie większe ilości w/w gazów niż węgle o wysokim stopniu metamorfizmu i niskiej reaktywności, których przykładem jest przedstawiony w monografii w Rozdziale 3 węgiel z pokładu 405/1 Kopalni „Borynia”. Przykładowo strumień tlenku węgla wydzielający się z próbki węgla z pokładu 207 Kopalni „Sobieski-Jaworzno”

podczas samozagrzewania w kalorymetrze adiabatycznym w temperaturze 200 °C wynosi 0,037 dm³/min (Tablica 9, Rozdział 3 monografii). Strumień tlenku węgla wydzielający się z próbki węgla z pokładu 405/1 Kopalni „Borynia” podczas samozagrzewania w kalorymetrze adiabatycznym w temperaturze 200 °C wynosi tylko 0,0065 dm³/min (Tablica 7, Rozdział 3 monografii) i jest 5,7 razy mniejszy od strumienia wydzielanego z próbki węgla z pokładu 207 Kopalni „Sobieski-Jaworzno”. W ten sposób wykazałem, że stosowanie tych samych kryteriów oceny zagrożenia pożarowego, opartych na ilości wydzielanego tlenku węgla np. kryterium 10 l/min lub 25 l/min dla wszystkich pokładów, prowadzić może do poważnych błędów w ocenie tego zagrożenia. Niezbędne jest zatem przeprowadzenie badań emisji gazów dla każdego z eksploatowanych pokładów celem m.in. wyznaczenia wartości kryterialnych. Wykazałem, że wraz ze wzrostem temperatury zwiększają się strumienie gazów emitowanych z badanej próbki węgla, jednak dynamika wzrostu emisji poszczególnych gazów nie jest jednakowa (Tablice 3 - 12, Rozdział 3 monografii). W początkowym stadium rozwoju procesu samozapalania emitowane są głównie w niewielkich ilościach tlenki węgla. Po osiągnięciu przez węgiel temperatury krytycznej widoczna jest już emisja węglowodorów nienasyconych: etylenu i propylenu, a powyżej temperatury 125 °C do 150 °C emisja acetylenu. Powyżej temperatury 350 °C do 400 °C w wyniku pyrolizy szkieletu węglowego następuje gwałtowny wzrost wydzielania wodoru, którego stężenie w wyływających gazach jest porównywalne ze stężeniem tlenku węgla. Opisane wyżej zjawiska pozwoliły mi na stworzenie „drabiny pożarowej”:

Faza rozwoju samozapalania	Charakterystyczna cecha emisji gazów	Temperatura węgla
Niskotemperaturowe utlenianie	emisja CO i CO ₂ znikoma emisja pozostałych gazów	poniżej 70 °C
Intensywne niskotemperaturowe utlenianie	widoczna emisja C ₂ H ₄ , C ₃ H ₂	równa wartości krytycznej lub wyższa
Średnotemperaturowe utlenianie	widoczna emisja C ₂ H ₂	125–150 °C
Wysokotemperaturowe utlenianie	wysoka emisja i stężenie H ₂ zbliżone do stężenia CO	równa temperaturze zapłonu lub wyższa

Wykazałem, że wraz ze wzrostem temperatury zmieniają się także proporcje pomiędzy stężeniami gazów: tlenku i ditlenku węgla, acetylenu, etylenu, propylenu i wodoru, np. C₂H₄/C₂H₂, C₂H₄/CO₂, C₃H₆/CO₂ i CO/H₂. Wartości tych proporcji są charakterystyczne dla danego typu węgla w określonej

temperaturze. Mogą więc stanowić wzorzec będący podstawą do oceny temperatury zagranego węgla w kopalni na podstawie analizy chromatograficznej powietrza kopalnianego.

4.3.3. Opracowanie modeli matematycznych i numerycznych służących do prognozowania samozapalania warstwy węgla

Brak odpowiednich kryteriów podobieństwa wyklucza możliwość modelowania fizycznego, a tym samym możliwość bezpośredniego wykorzystania wyników uzyskanych w skali laboratoryjnej do prognozowania samozapalania węgla w kopalniach. Dlatego też prognozowanie to oparłem na modelowaniu matematycznym i numerycznym procesu. Wymaga ono opracowania ilościowego opisu zjawisk zachodzących w warstwie rozkruszonego węgla poprzez przepływ przez tę warstwę powietrza zawierającego tlen. Podałem układy równań różniczkowych uzupełnionych o odpowiednie warunki graniczne umożliwiające wyznaczenie pola temperatury węgla i pola stężeń tlenu w rozpatrywanym obszarze.

- **Opracowanie modelu kinetyki utleniania węgla uwzględniającego zmianę mechanizmu reakcji w temperaturze krytycznej**

Opracowałem model utleniania węgla wyrażony równaniem Arrheniusa (Rozdział 4 monografii). Model ten zakłada niezależność szybkości utleniania od ilości tlenu pochłoniętego przez węgiel i uwzględnia zmianę mechanizmu reakcji w temperaturze równej wartości krytycznej. Ma on postać:

$$R_c(T, C) = \begin{cases} R_{do} C^n e^{-T_{do}/T} & T \leq T_{kr} \\ R_{po} C^n e^{-T_{po}/T} & T \geq T_{kr} \end{cases}$$

gdzie: $R_c(T, C)$ - strumień pochłanianego tlenu,

T_{kr} – temperatura krytyczna,

n – rząd reakcji utleniania poniżej i powyżej temperatury krytycznej,

R_{do}, R_{po} – stała szybkości reakcji poniżej i powyżej temperatury krytycznej,

T_{do}, T_{po} – temperatura aktywacji poniżej i powyżej temperatury krytycznej.

Opracowałem metodykę badawczą wyznaczania w/w parametrów. Badania prowadzone były na stanowisku, którego zasadniczym elementem jest różnicowy kalorymetr przepływowy Calvet model C80 firmy SETARAM. Wyznaczane były: szybkość pochłanianego tlenu R_c [mol/m³·s] w zależności od temperatury T [K] i koncentracji tlenu C . Podałem zależności służące do wyznaczenia parametrów R_{do} , R_{po} , T_{do} i T_{po} . Mają one postać:

$$r_c = \frac{R_c}{C^n} = \begin{cases} R_{do} e^{-T_{do}/T} & T \leq T_{kr} \\ R_{po} e^{-T_{po}/T} & T \geq T_{kr} \end{cases}$$

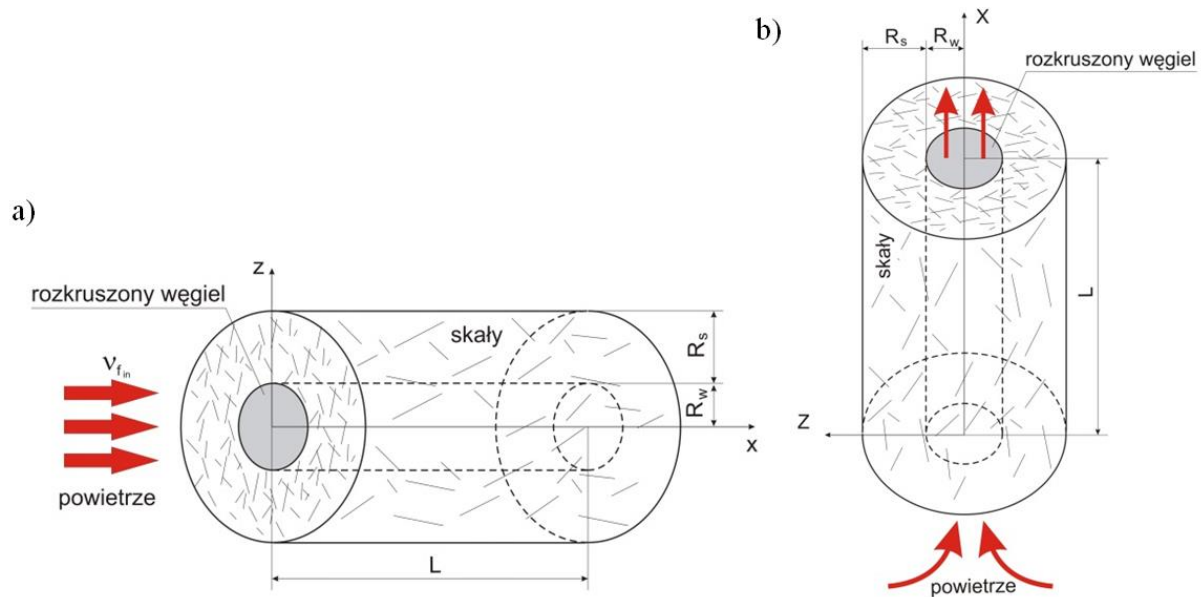
lub

$$\ln r_c = \begin{cases} \ln R_{do} - T_{do}/T & T \leq T_{kr} \\ \ln R_{po} - T_{po}/T & T \geq T_{kr} \end{cases}$$

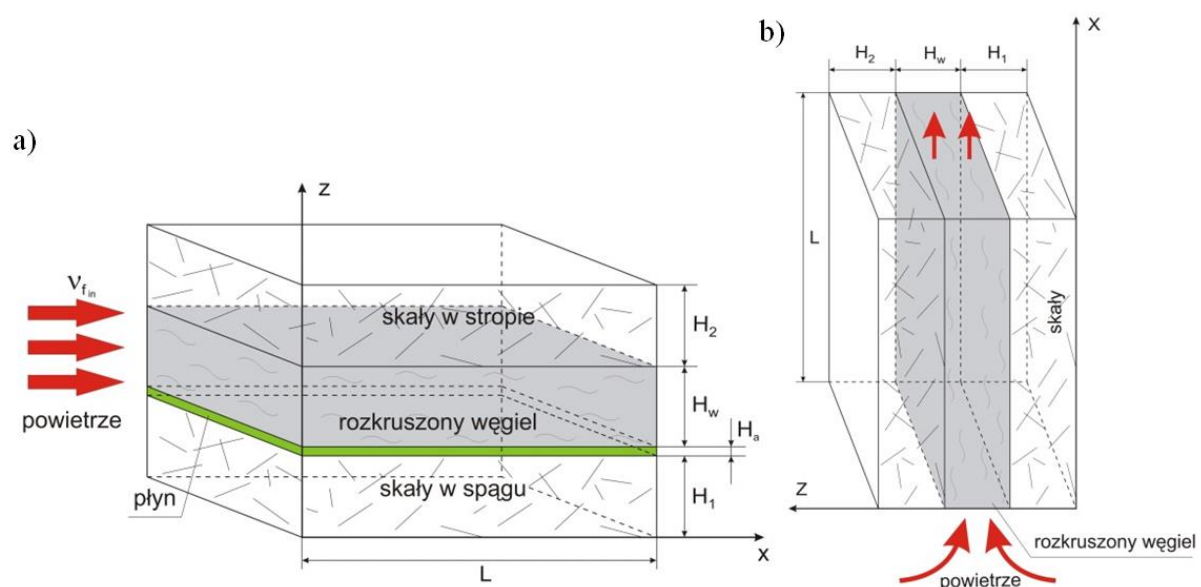
Otrzymując z eksperymentu wartości R_c można obliczyć parametry R_{do} , R_{po} i T_{do} , T_{po} , stosując w/w wzory, dopasowujące parametry liniowej zależności $\ln r_c$ od T^{-1} przy użyciu metody najmniejszych kwadratów.

- **Opracowanie matematycznych i numerycznych modeli samozagrzewania warstwy rozkruszonego węgla o różnych kształtach geometrycznych przy wymuszonym i konwekcyjnym przepływie powietrza i różnych sposobach odprowadzania ciepła do otoczenia**

Opracowałem matematyczne i numeryczne modele służące do prognozowania procesu samozapalania warstwy rozkruszonego węgla. Modele te zbudowano przy założeniu, że sproszkowany węgiel można traktować jako jednorodny ośrodek porowaty ograniczony w niektórych przypadkach nieprzepuszczalnymi skałami, w innych natomiast przemywany płynem. Założyłem, że rozpatrywane ciało porowate – węgiel – jest izotropowe, a stałe fizyczne ośrodka charakteryzujące transport masy, energii i pędu są wielkościami skalarnymi. Przyjąłem, że przez obszar zawału lub sproszkowanego węgla przepływa powietrze o określonej zawartości tlenu. Modele samozapalania zbudowałem przy założeniu, że węgiel i przepływające przez ten węgiel powietrze stanowią układ dwufazowy. Jako model kinetyki utleniania przyjąłem opracowany przeze mnie model uwzględniający zmianę mechanizmu reakcji w temperaturze równej wartości krytycznej. Przyjąłem dwa modele geometryczne złoża: model cylindra i model warstwy płaskiej. Dla każdego z tych modeli geometrycznych przyjąłem po dwa rodzaje przepływu powietrza przez złożo: przepływ wymuszony, tłokowy i przepływ konwekcyjny.



Rysunek 1 Przyjęty model geometryczny cylindra i rodzaje przepływu powietrza przez złożę

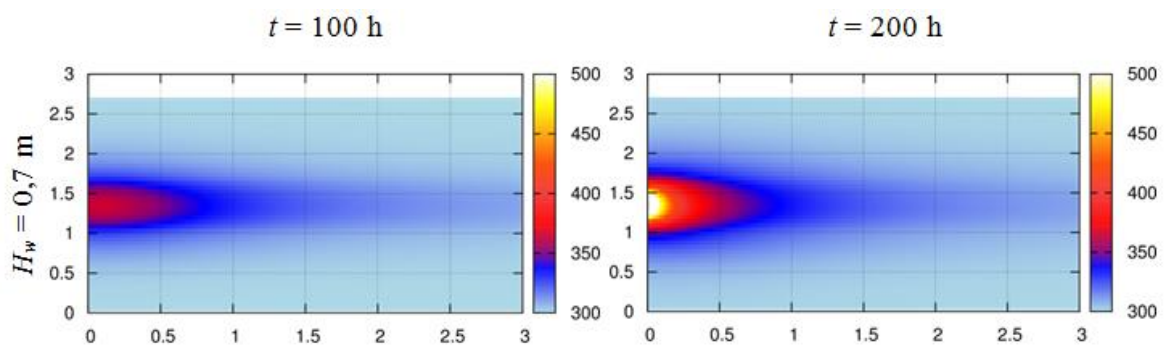


Rysunek 2 Przyjęty model geometryczny płaskiej warstwy i rodzaje przepływu powietrza przez złożę

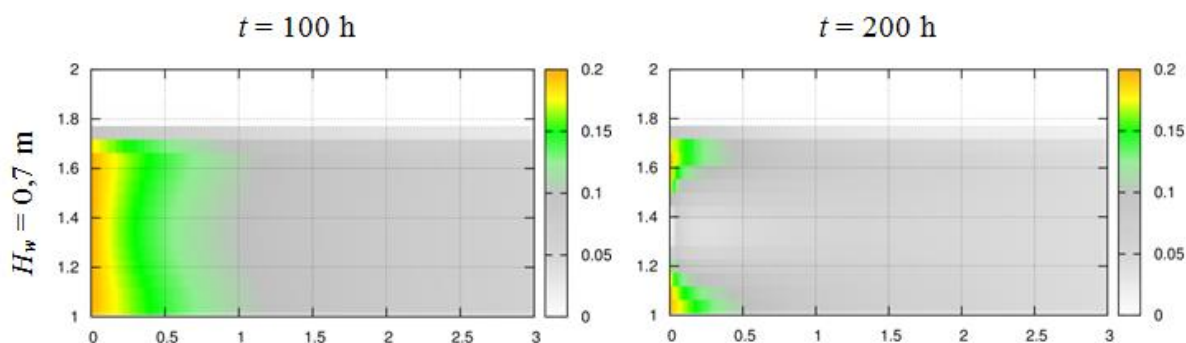
Opracowane przeze mnie modele matematyczne samozapalania węgla (Rozdział 4 monografii) opisują bilans energii w zagrzewającej się warstwie węgla oraz bilanse masy (tlenu) i energii w powietrzu przepływającym przez tę warstwę. Bilans energii w zagrzewającej się warstwie węgla o kształcie cylindra jest wyrażony układem dwóch równań różniczkowych cząstkowych rzędu drugiego, natomiast dla warstwy płaskiej układem trzech równań różniczkowych cząstkowych. Równanie bilansu energii rozpatrywane są razem z warunkami początkowymi, warunkami granicznymi i warunkami zgodności. Warunki początkowe podają rozkład temperatury w węglu T_{win} oraz początkowy rozkład temperatury w skałach otaczających węgiel T_{sin} w momencie rozpoczęcia

obliczeń. Warunki graniczne opisywane układem równań różniczkowych cząstkowych opisują wymianę ciepła pomiędzy węglem a otoczeniem na lewej ($x = 0$) i prawej ($x = L$) granicy warstwy węgla. Warunki zgodności na granicy węgiel – skała dla warstwy o kształcie cylindra $r = R_w$ lub $z_1 = H_1$ i dla warstwy płaskiej $z_2 = H_1 + H$ określają równość temperatur i strumieni ciepła po obu stronach granic. Bilans tlenu w przepływającym przez warstwę rozkruszonego węgla powietrzu dla obu kształtów warstwy węgla opisuje równanie różniczkowe cząstkowe rzędu drugiego rozpatrywane razem z warunkami początkowymi i warunkami granicznymi. Warunki początkowe określają rozkład stężenia tlenu w warstwie węgla w momencie rozpoczęcia obliczeń. Warunki graniczne opisane układem równań różniczkowych określają wartość stężenia tlenu w powietrzu wpływającym do warstwy węgla oraz że warstwa ta jest na tyle długa, że na jej końcu zawartość tlenu w płynącym powietrzu nie zmienia się już wraz z długością. Bilans energii w strumieniu powietrza wyraża równanie różniczkowe cząstkowe rozpatrywane z warunkami początkowymi opisującymi rozkład temperatury przepływającego powietrza w chwili rozpoczęcia obliczeń oraz warunki graniczne ustalające wartość temperatury powietrza wpływającego do warstwy rozkruszonego węgla.

Składające się na te modele układy równań różniczkowych cząstkowych rozwiązywałem z wykorzystaniem metod numerycznych według algorytmu *Tri-Diagonal Matrix Algorithm* (TDMA) i z zastosowaniem metod Peacemana – Rachforda. Opracowane programy komputerowe umożliwiają wykonywanie stosownych obliczeń, zwłaszcza rozkładu temperatury w złożu rozkruszonego węgla i w otaczających skałach podczas samozagrzewania oraz rozkładu stężenia tlenu w gazach przepływających przez to złożo (Rys. 3 i 4).



Rysunek 3 Rozkład temperatury w złożu rozkruszonego węgla w kształcie płaskiej warstwy i w otaczających skałach podczas samozagrzewania, po upływie 100 i 200 godzin od rozpoczęcia procesu; przepływ wymuszony, grubość warstwy węgla $H_w = 0,7$ m



Rysunek 4 Rozkład stężenia tlenu w gazach przepływających przez złożę rozkruszonego węgla w kształcie płaskiej warstwy i w otaczających skałach podczas samozagrzewania, po upływie 100 i 200 od rozpoczęcia procesu; przepływ wymuszony, grubość warstwy węgla $H_w = 0,7$ m

Opracowane przeze mnie modele zawierają znacznie mniej uproszczeń od modeli znanych w literaturze dzięki czemu umożliwiają wykonanie obliczeń prognostycznych znacznie wierniej odtwarzających proces samozagrzewania węgla w kopalniach. Ponadto umożliwiają modelowanie wpływu stosowania pyłów dymnicowych (tzw. przemulanie zrobów) na zagrożenie pożarowe w zrobach, co nie jest znane w dotychczasowej literaturze polskiej i światowej.

4.3.4. Określenie wpływu parametrów geometrycznych warstw rozkruszonego węgla, parametrów fizykochemicznych przepływającego przez nie powietrza, a także parametrów fizycznych płynów omywających złożę na możliwość zaistnienia samozapalenia węgla

Przeanalizowałem wpływ wybranych parametrów modeli geometrycznych złoża rozkruszonego węgla, przepływającego przez nie powietrza i płynu omywającego złożę na przebieg procesu samozapalenia (Rozdział 5 monografii). Możliwość przeprowadzenia takiej analizy uzyskałem dzięki rozwiązaniom numerycznym i opracowanym przeze mnie programom komputerowym. W szczególności przeanalizowałem:

- wpływ grubości warstwy węgla,
- wpływ zawartości tlenu w powietrzu dopływającym do złoża,
- wpływ przewodności cieplnej skał otaczających złożę,
- wpływ przejmowania ciepła przez płyn omywający złożę,
- wpływ prędkości powietrza przepływającego przez złożę.

Wykazałem istotny wpływ grubości złoża rozkruszonego węgla o kształcie warstwy płaskiej na przebieg samozapalenia. Wykazałem także, że istnieje pewna grubość krytyczna, poniżej której samozapalenie już nie zachodzi. Im większa jest skłonność węgla do samozapalenia, tym mniejsza jest grubość krytyczna warstwy węgla. Wykazałem, podobnie jak dla warstwy płaskiej, istotny wpływ

na proces samozapalania średnicy złoża o kształcie cylindra. Również w tym przypadku wyznaczyć można wartość krytyczną średnicy, poniżej której w danych warunkach samozapalenie już nie zachodzi. Wykazałem, że wraz ze wzrostem grubości lub średnicy złoża okres inkubacji pożaru zmniejsza się, osiągając wartość zbliżoną do wartości uzyskanych w warunkach adiabatycznych. Tym samym wykazałem, że okres inkubacji wbrew obecnie panującym poglądom nie jest parametrem zależnym wyłącznie od właściwości węgla, lecz funkcją zależną między innymi od wymiarów geometrycznych złoża węgla.

Wykazałem, że zawartość tlenu w powietrzu dopływającym do złoża jest kolejnym czynnikiem mającym istotny wpływ na przebieg procesu samozapalenia. Dla złoża rozkruszonego węgla o określonej skłonności do samozapalenia zarówno o kształcie przypominającym warstwę płaską jak i cylinder, wyznaczyć można wartość krytyczną zawartości tlenu w powietrzu dopływającym do złoża, poniżej której do samozapalenia nie dojdzie.

Przeanalizowałem wpływ przewodności cieplnej skał otaczających złożo, a co się z tym wiąże, intensywność odprowadzenia ciepła ze złoża do otoczenia na przebieg procesu samozapalania się węgla. Wykazałem, że czynnik ten ma również istotny wpływ na omawiany proces. Wykazałem, że im mniejsza jest wartość przewodności cieplnej otaczających skał, tym mniejsze muszą być wymiary geometryczne złoża węgla, w którym może dojść do samozapalenia. Przykładowo w złożu o kształcie cylindra i promieniu wynoszącym 0,15 m może dojść do samozapalenia, jeżeli złożo to otoczone będzie skałami o przewodności cieplnej mniejszej od $0,30 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Taki przypadek ma miejsce wtedy, gdy warstwa rozkruszonego węgla otoczona jest litym węglem (pożar szczelinowy). Natomiast w przypadku warstwy węgla pozostającej w zrobach ściany obustronnie sąsiadującej ze skałami, których przewodność cieplna jest większa od $1,0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, aby doszło do samozapalenia grubość warstwy węgla musi być większa od 0,5 do 0,6 m.

Przeanalizowałem także wpływ przejmowania ciepła przez płyn omywający warstwy rozkruszonego węgla na przebieg procesu samozapalenia. Płynami takimi w warunkach kopalnianych mogą być płynąca po spągu woda lub mieszanina wodno-popiołowa. Wykazałem, że przepływ płynu po spągu spowalnia proces samozapalenia, a spowolnienie to jest tym większe im większa jest prędkość przepływu płynu, a tym samym wartość współczynnika przejmowania ciepła α . Jednak skuteczne spowolnienie samozapalenia węgla wymaga bezpośredniego kontaktu płynu ze złożem.

Wykazałem istotny wpływ prędkości przepływu powietrza w złożu rozkruszonego węgla na przebieg procesu samozapalenia. Wykazałem, że dla danego typu węgla o określonej skłonności do samozapalenia istnieje przedział prędkości powietrza, przy której może dojść do samozapalenia się złoża. Przykładowo dla warstwy rozkruszonego węgla z pokładu 405 Kopalni „Borynia”, mającego

kształt płaskiej warstwy o grubości jednego metra, prędkość ta zmieniała się od 0,0004 do 0,01 m/s. Istniała też prędkość optymalna, przy której proces samozapalenia przebiegał najszybciej. W omawianym przypadku prędkość ta wynosiła 0,003 m/s. Wyniki te zbieżne są z wynikami badań, jakie uzyskałem wykorzystując kalorymetrię adiabatyczną jako metodę badawczą. Przedstawione w Rozdziale 5 monografii rezultaty obliczeń są pierwszymi tego typu wynikami zamieszczonymi w literaturze.

4.3.5. Opracowanie modelu matematycznego i numerycznego służącego do prognozowania emisji wybranych gazów z zagrzewającej się warstwy węgla

Wykazałem, że strumień gazów emitowanych z kalorymetru podczas samozagrzewania zależy od temperatury. W warunkach laboratoryjnych temperatura próbki węgla umieszczonej w kalorymetrze jest jednorodna. W warunkach rzeczywistych temperatura złoża zagrzanego węgla nie jest jednorodna i zawiera się od temperatury otoczenia na jego brzegach do maksymalnej temperatury zagrzanego węgla wewnątrz złoża. Zatem strumień gazu wypływający z zagrzanego złoża węgla jest uśrednieniem według rozkładu temperatury strumienia gazów wypływających z różnych fragmentów złoża posiadających różną temperaturę. Wykazałem, że skład gazów wypływających z komory reakcyjnej kalorymetru w danej temperaturze, np. 200 °C, będzie się różnił od składu gazów wypływających z zagrzanego złoża, w którym maksymalna temperatura węgla wynosi również 200 °C. Zatem posługiwanie się wynikami laboratoryjnymi jako wzorcem do określania temperatury zagrzanego złoża węgla w kopalniach prowadzić może do znacznych błędów w ocenie zagrożenia. Dla umożliwienia precyzyjnej oceny temperatury zagrzanego węgla opracowałem model emisji gazów z zagrzanego złoża (Rozdział 6 monografii). Podstawą modelu jest z jednej strony wyznaczony w oparciu o opisane w Rozdziale 4 monografii modele matematycznej i programy komputerowe rozkład temperatury w złożu, z drugiej natomiast wyniki laboratoryjne emisji gazów.

Przyjąłem następujące założenia upraszczające:

- Kształt złoża przypomina płaską warstwę lub cylinder.
- Gazy wypływające ze złoża ulegają natychmiastowemu wymieszaniu.
- Złoże węgla składa się z wielu warstw. W przypadku złoża o kształcie płaskiej warstwy warstwami tymi są cienkie warstwy równoległe do płaszczyzny podstawy. W przypadku złoża o kształcie cylindra są to cienkie pierścienie rozłożone symetrycznie wzdłuż cylindra.

Zaproponowałem następujący tok postępowania:

- Dla zadanej maksymalnej temperatury węgla wyznacza się numerycznie rozkład temperatury w złożu i miejsce w złożu, w którym występuje ta maksymalna temperatura.

- W miejscu występowania najwyższej temperatury w przekroju prostopadłym do osi OX wyznacza się rozkład temperatury węgla. W przypadku rozpatrywania konwekcyjnego przepływu gazów przez złożę wyznacza się również rozkład prędkości gazów.
- Przyjmuje się, że z każdej warstwy wypływają gazy o składzie takim, jaki uzyskano podczas badań laboratoryjnych dla temperatury węgla równej najwyższej temperaturze panującej w warstwie.
- W przekroju złoża prostopadłym do osi OX przeprowadza się uśrednienie strumienia gazu zgodnie z rozkładem temperatur, z zastosowaniem wzoru

$$G^*(T_{\max}) = \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} G(T(x_{\max}, z)) dz$$

gdzie:

$G^*(T_{\max})$ – uśredniony strumień gazu wydzielony z warstwy węgla w zależności od maksymalnej wartości temperatury węgla w tym złożu,

x_{\max} – współrzędne osi OX , dla której temperatura przyjmuje maksymalną wartość,

$G(T)$ – strumień gazu wydzielany w warunkach laboratoryjnych z próbki węgla podczas utleniania termicznego w temperaturze T .

Dotychczas w literaturze polskiej jak i światowej brak jest opisów modeli emisji gazów ze złoża podczas samozagrzewania. Stosowane są jedynie modele emisji gazów z próbki węgla podczas jej termicznego utleniania w warunkach laboratoryjnych.

4.3.6. Określenie wpływu parametrów geometrycznych złoża rozkruszonego węgla na emisję wybranych gazów

Przeanalizowałem wpływ parametrów geometrycznych złoża o kształcie warstwy płaskiej i cylindra na emisję wybranych gazów podczas samozagrzewania. Możliwość przeprowadzenia takiej analizy uzyskałem dzięki opracowanemu przeze mnie modelowi matematycznemu, rozwiązaniom numerycznym i programom komputerowym.

Wykazałem istotny wpływ, jaki na emisję gazów z zagrzewającego się złoża o kształcie cylindra przy wymuszonym przepływie powietrza ma jego średnica. Dotyczy to wszystkich rozpatrywanych gazów: etylenu, propylenu, acetylenu, tlenku węgla, ditlenku węgla i wodoru. Przykładowo wzrost średnicy od 0,8 do 1,6 m powodował 2-2,5-krotny wzrost stężeń badanych gazów w mieszaninie wypływającej ze złoża. Wynika to z faktu, że przy większych średnicach złoża o kształcie cylindra większa jego część uzyskuje wyższą temperaturę. Wykazałem, że zależność stężeń gazów od średnicy złoża w mieszaninie wypływającej z tego złoża jest jeszcze większa przy konwekcyjnym przepływie powietrza przez to złożę. Stwierdziłem, że w tym przypadku wzrost

średnicy złoża od 0,8 do 1,6 m powoduje nawet kilkunastokrotny wzrost stężeń badanych gazów w mieszaninie wypływającej ze złoża. Zatem w przypadku, gdy złożo węgla ma kształt przypominający cylinder, ocena stanu zagrożenia pożarowego przeprowadzana wyłącznie w oparciu o stężenia wydzielanych gazów, np. stężenia tlenu węgla, może prowadzić do dużych błędów.

Wykazałem również, że w przypadku złoża o kształcie przypominającym warstwę płaską przy wymuszonym przepływie powietrza wpływ grubości tej warstwy na stężenia istotnych z punktu widzenia oceny zagrożenia pożarowego gazów wypływających ze złoża jest niewielki. Przykładowo wzrost grubości warstwy węgla od 0,8 do 1,6 m powoduje jedynie kilkuprocentowy wzrost stężeń gazów. Stwierdziłem, że także w przypadku złoża przypominającego warstwę płaską przy konwekcyjnym przepływie powietrza przez złożo węgla wpływ grubości tej warstwy na stężenia wybranych gazów w mieszaninie gazowej wypływającej ze złoża jest niewielki.

Podkreślić należy, że są to pierwsze tego typu obliczenia przeprowadzone w literaturze górniczej.

4.3.7. Opracowanie zasad doboru wskaźników pożarowych i liczb kryterialnych wraz z zasadami oceny zagrożenia pożarowego

Wykazałem, że stężenie gazów wydzielanych do atmosfery kopalnianej z węgla podczas samozapalania zależy od intensywności wentylacji wyrobisk, a w przypadku zrobów ścian również od ilości zatlaczanych gazów inertnych. Ponieważ na ogół nie jest znane rozrzedzenie ww. gazów, ocena rozwoju procesu samozapalania, wykonana na podstawie samych tylko wartości ich stężeń, może prowadzić do poważnych błędów. Dla ich uniknięcia opracowałem szereg wskaźników pożarowych służących do oceny zagrożenia pożarowego w kopalniach.

W oparciu o swoje wieloletnie doświadczenia w ocenie zagrożenia pożarem endogenicznym w kopalniach przyjąłem, że podstawą takiej oceny może być temperatura zagrzanego węgla. Temperaturę zagrzanego węgla określa się w oparciu o obliczone wartości wskaźników pożarowych i porównuje z wartościami wzorcowymi opracowanymi dla pokładu, w którym prowadzone są pomiary. Przy ocenie zagrożenia pożarowego na podstawie oceny temperatury zagrzanego węgla błąd oszacowania wartości temperatury jest mniejszy niż 15 %. Oszacowaną temperaturę zagrzanego węgla odnosi się do temperatury krytycznej i temperatury zapłonu węgla z danego rejonu w celu określenia koniecznych działań profilaktycznych według wartości kryterialnych zamieszczonych w poniższej Tabeli.

Temperatura kryterialna zagrzanego węgla	
Oszacowana wartość temperatury węgla	Sposób postępowania
$t < T_{kr}$	sytuacja normalna
$T_{kr} < t < T_{zap}$	prowadzenie prac profilaktycznych
$t > T_{zap}$	akcja pożarowa

Objaśnienia: T_{zap} – temperatura zapalenia węgla, T_{kr} – temperatura krytyczna zagrzanego węgla.

W wyniku przeprowadzonych badań wytypowałem dziewięć wskaźników pożarowych, jakie mogą być przydatne przy ocenie temperatury zagrzanego węgla w kopalniach. Są to:

- (1) wskaźnik CO/CO_2 ,
- (2) wskaźnik C_2H_2/CO_2 ,
- (3) wskaźnik C_2H_4/CO_2 ,
- (4) wskaźnik C_3H_6/CO_2 lub suma (3) i (4) $(C_2H_4 + C_3H_6)/CO_2$,
- (5) wskaźnik C_2H_4/C_2H_2 ,
- (6) wskaźnik C_3H_6/C_2H_2 lub suma (5) i (6) $(C_2H_4 + C_3H_6)/C_2H_2$,
- (7) wskaźnik Grahama = $\Delta CO/\Delta O_2 = \Delta CO/0,265N_2 - O_2$,
- (8) wskaźnik $C_2H_2 \cdot H_2/(C_2H_4 + C_3H_6)$,

$$(9) \text{ wskaźnik WP-6} = \frac{(H_2 \cdot C_2H_2) - (C_2H_4 + C_3H_6)}{\sqrt{(H_2 \cdot C_2H_2)^2 + (C_2H_4 + C_3H_6)^2}}$$

gdzie:

- CO – zawartość tlenku węgla, ppm;
- CO₂ – zawartość dwutlenku węgla, %;
- H₂ – zawartość wodoru, ppm;
- C₂H₂ – zawartość acetyleny, ppm;
- C₂H₄ – zawartość etylenu, ppm;
- C₃H₆ – zawartość propylenu, ppm.

Z wyjątkiem stosowanych od lat wskaźników (1), (5) i (7) są to wskaźniki opracowane przeze mnie. Wykorzystując opracowane programy komputerowe przeanalizowałem kształtowanie się wartości wskaźników pożarowych w funkcji temperatury. Wskaźniki te wyznaczane były dla dwóch modeli geometrycznych złoża: płaskiej warstwy i cylindra oraz dwóch rodzajów przepływu gazów przez złożo: tłokowego i konwekcyjnego. Stwierdziłem, że w przypadku warstwy węgla o kształcie cylindra i wymuszonym tłokowym przepływie powietrza przez złożo wpływ średnicy złoża na wartości wskaźników pożarowych jest stosunkowo niewielki; wyjątek stanowią tu tylko wskaźniki Grahama i wskaźnik C_2H_4/CO_2 . W przypadku złoża węgla o kształcie cylindra i konwekcyjnym przepływie powietrza wpływ średnicy złoża węgla na wartości wskaźników jest już nieco większy, jednak nadal

zdecydowanie mniejszy niż omówiony wcześniej wpływ na stężenia wydzielanych gazów. Wyjątek stanowią tu wskaźnik Grahama i wskaźnik $C_2H_2 \cdot H_2 / (C_2H_4 + C_3H_6)$, gdzie wpływ ten jest duży.

W przypadku złoża rozkruszonego węgla o kształcie przypominającym warstwę płaską zarówno przy wymuszonym tłokowym przepływie powietrza, jak i przepływie konwekcyjnym, wpływ grubości złoża na wartości wskaźników pożarowych jest znikomy. Wykazałem więc, że w przypadku warstwy węgla o kształcie przypominającym warstwę płaską, a jest to zdecydowana większość przypadków samozapaleń występujących w kopalniach węgla, do wyznaczenia temperatury węgla posługiwać się można wszystkimi z w/w wskaźników. Natomiast do wyznaczenia temperatury zagrzanego węgla w złożu, którego kształt przypomina cylinder używać należy tych wskaźników, dla których wpływ średnicy złoża na ich wartości jest możliwie najmniejszy. Wartości kryterialne wskaźników, tj. wartości odpowiadające temperaturze krytycznej węgla oraz temperaturze zapłonu, wyznaczyć należy w oparciu o ich wartości wzorcowe uzyskane na podstawie obliczeń prognostycznych (Rozdział 7 monografii).

4.3.8. Wykorzystanie osiągniętych wyników

Przedstawione przeze mnie w monografii metody prognozowania zagrożenia pożarowego oparte na badaniach laboratoryjnych węgla, metodach prognostycznych samozapalenia warstwy węgla i emisji gazów, a także analizie chromatograficznej gazów kopalnianych znalazły zastosowanie w praktyce kopalnianej, będąc skutecznym narzędziem służącym do oceny zagrożenia pożarowego, wczesnego wykrywania pożarów i oceny wygaszenia pól pożarowych. W szczególności wdrożone zostały już przedstawione w monografii rozwiązania takie jak:

1) Ocena skłonności do samozapalenia węgla lub odpadów pogórnicznych zawierających węgiel w oparciu o test adiabatyczny.

Przedstawiona w monografii metoda testu adiabatycznego wykorzystywana jest do oceny skłonności do samozapalenia węgla lub odpadów górniczych zawierających węgiel. W szczególności negatywny wynik testu adiabatycznego pozwala na stwierdzenie, że badany węgiel lub odpad nie wykazuje skłonności do samozapalenia, czego nie zapewnia żadna ze znanych metod oceny skłonności węgla do samozapalenia.

2) Wyznaczanie okresu inkubacji pożaru endogenicznego jako funkcji grubości warstwy węgla i zawartości tlenu w gazach zrobowych.

Opracowana metoda matematyczna, rozwiązania numeryczne i programy komputerowe umożliwiają wyznaczenie okresu inkubacji pożaru endogenicznego jako funkcji grubości warstwy węgla i zawartości tlenu w gazach zrobowych, co zostało wykorzystane przy wyznaczaniu czasu

bezpiecznej likwidacji ściany. Czas ten można wydłużyć obniżając zawartość tlenu w gazach zrobowych np. poprzez podawanie azotu do zrobów.

3) Wyznaczanie dopuszczalnej z uwagi na zagrożenie pożarem endogenicznym grubości przypinanej łąty węglowej.

Opracowane przez mnie programy komputerowe umożliwiają wyznaczenie dopuszczalnej z uwagi na zagrożenie pożarowe łąty węgla. Obliczenia takie wykonywane są dla ścian, w których z przyczyn wynikających z trudności utrzymania stropu niezbędne jest przypinanie takiej łąty.

4) Wyznaczanie maksymalnego dopuszczalnego ze względu na zagrożenie pożarowe stężenia tlenu w gazach zrobowych.

Obliczenia takie wykonywane są dla ścian, w których stosuje się np. profilaktykę zagrożenia pożarowego z wykorzystaniem gazów inertnych. Wyznaczona na podstawie obliczeń prognostycznych dopuszczalna maksymalna zawartość tlenu w zrobach stanowi kryterium wymaganej intensywności zatłaczania gazu inertnego.

5) Wyznaczanie minimalnego z uwagi na zagrożenie pożarem endogenicznym postępu ściany.

Wyznaczanie minimalnego z uwagi na zagrożenie pożarem endogenicznym postępu ściany przedstawiono w Rozdziale 8 monografii w Przykładzie 2. Obliczenia takie wykonuje się dla ścian charakteryzujących się dużym potencjalnym zagrożeniem pożarowym, wynikającym np. z występujących zaburzeń geologicznych, przypinania łąty węglowej pokładu towarzyszącego w stropie pokładu, itp. Obliczenia takie wykonuje się również, gdy w związku z profilaktyką współwystępujących innych zagrożeń, metanowego i tąpnięciami, wymagane jest obniżenie postępu ściany.

6) Ocena skuteczności prewencji z wykorzystaniem mieszaniny wodno-popiołowej lub wody.

Ocena skuteczności prewencji z wykorzystaniem mieszaniny wodno-popiołowej lub wody przepływających po spągu w zrobach wykonywana jest dla ścian, w zrobach których na spągu zalega warstwa rozkruszonego węgla o grubości większej od 0,5 m. Z przeprowadzonych dla kopalń obliczeń wynika, że prewencja taka jest skuteczna, gdy warstwa rozkruszonego węgla nie przekracza 1 metra. Przy większych grubościach warstwy węgla pozostawionej w zrobach skuteczność w/w prewencji jest już niewielka.

7) Modelowanie emisji gazów z grzewającego się złoża rozkruszonego węgla.

Uzyskane w oparciu o model samozapalenia wzorcowe emisje gazów, a zwłaszcza wartości wzorcowe wskaźników pożarowych stanowią podstawę do wyznaczenia temperatury zagrzanego węgla w oparciu o analizy chromatograficzne powietrza kopalnianego. Podkreślić należy, że coraz więcej kopalń wdraża to rozwiązanie, odstępując od dotychczasowego uproszczonego modelu laboratoryjnego.

8) Ocena zagrożenia pożarowego oparta na wyznaczeniu temperatury zagrzanego węgla na podstawie analizy chromatograficznej gazów kopalnianych.

Przedstawiona w monografii opracowana przez mnie metoda wczesnego wykrywania pożarów endogenicznych polegająca na wyznaczeniu temperatury zagrzanego węgla na podstawie analizy chromatograficznej gazów kopalnianych znalazła już zastosowanie w całym przemyśle węglowym. Obecnie wdrażane są kryteria oceny oparte o wartości temperatury krytycznej i temperatury zapłonu węgla. Metoda ta wdrażana jest obecnie w kopalniach wietnamskich.

9) Wyznaczanie warunków bezpiecznego otwarcia zaizolowanej ściany.

We wszystkich kopalniach węgla wdrożona została metoda wyznaczania warunków bezpiecznego otwarcia zaizolowanej ściany. W Rozdziale 8 monografii przedstawiłem przykład zastosowania w praktyce górniczej opracowanych na podstawie obliczeń prognostycznych samozapalenia kryteriów otwarcia i wznowienia przewietrzania rozczinki ściany 558 w pokładzie 510D. Metoda ta wdrażana jest obecnie również w kopalniach wietnamskich.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych wnioskodawcy, świadczących o istotnej aktywności naukowej habilitanta

Zakres mojej działalności badawczej po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych obejmował poza tematyką przedstawioną w monografii habilitacyjnej następujące zagadnienia:

- Ocena stanu zagrożenia pożarowego i prewencji pożarowej w kopalniach.
- Sorpcja wybranych gazów na węglach kamiennych.
- Wybrane problemy wentylacji kopalń.
- Wybrane problemy klimatyzacji kopalń.

5.1. Ocena stanu zagrożenia pożarowego i prewencji pożarowej w kopalniach

5.1.1. Opracowanie metody oceny stanu zagrożenia pożarowego w zrobach ścian opartej na analizie chromatograficznej prób powietrza kopalnianego

Przeprowadziłem badania ilości i składu gazów wydzielanych podczas termicznego utleniania próbek różnych typów węgla umieszczonych w retorcie o objętości 50 cm³ znajdującej się w komorze grzewczej. Temperatura komory grzewczej zmieniała się od 50 do 300 °C. Wykazałem, że ilości i skład wydzielanych gazów są charakterystyczne dla danego typu węgla i danej temperatury. Ta właściwość okazała się przydatna do oceny temperatury zagrzanego węgla w zrobach w oparciu o wyniki analiz chromatograficznych gazów zrobowych. Wytypowałem kilka istotnych dla oceny temperatury

zagrzanego węgla gazów. Są to węglowodory nienasycone grupy C₂–C₄, tlenek węgla i wodór. Opracowałem metodę oceny stanu zagrożenia pożarowego opartą na wyznaczonych na podstawie badań laboratoryjnych wartości wzorcowych wskaźników pożarowych^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}. Metoda ta została wdrożona we wszystkich kopalniach węgla. Uwzględniona została także w obowiązujących przepisach górniczych. Rozwinięcie tej metody polegające na zastosowaniu kalorymetrii adiabatycznej i numerycznego modelowania emisji gazów z zagrzewającego się złoża węgla przedstawiłem w monografii habilitacyjnej.

¹ **Cygankiewicz J.**, 1996. Ocena rozwoju ognisk samozagrzewania na podstawie precyzyjnej analizy chemicznej prób powietrza kopalnianego. Konferencja naukowo-techniczna: Zagrożenia metanowe i pożarowe w górnictwie, wykorzystanie metanu z pokładów węgla kamiennego, Ustroń, 2-4 października 1996 r. str. 505-530.

² **Cygankiewicz J.** 1997. Ocena rozwoju ognisk samozagrzewania na podstawie precyzyjnej analizy chemicznej prób powietrza kopalnianego. W: Konferencja naukowo-techniczna: Zagrożenia metanowe i pożarowe w górnictwie, wykorzystanie metanu z pokładów węgla kamiennego, Ustroń, 2-4 października 1996 r. str. 505-530

³ **Cygankiewicz J.**, Buchwald P. 1997. Wpływ temperatury i rodzaju węgla na ilość i skład gazów wydzielających się podczas procesu samozagrzewania na podstawie pomiarów składu atmosfery kopalnianej wykonywanych na przykładzie jednej z kopalń węgla kamiennego. W: 90 lat ratownictwa górniczego na ziemiach polskich 1907-1997. Międzynarodowa Konferencja n/t Ratownictwa Górniczego. CSRG Bytom 25-27.11.1997, str. 41-52

⁴ **Cygankiewicz J.**, 1998. Effect of temperature and sort of coal on the quantity and composition of gases released during the process of spontaneous heating. Геологія I геохімія горючих копалин, nr 4, str. 159-176.

⁵ **Cygankiewicz J.**, 1999. Assessment of the fire hazard in caving longwall goafs on the basis of trace content of C₂-C₄ group hydrocarbons, carbon monoxide and hydrogen in goaf gases. W: Najnowsze osiągnięcia w zakresie przewietrzania kopalń oraz zwalczania zagrożeń pożarowych, gazowych i klimatycznych, Materiały Konferencyjne – Supplement, Szczyrk 22-24 April, str. 57-68, Wyd. GIG Katowice

⁶ **Cygankiewicz J.**, 2000. Niektóre wskaźniki pożarowe w kopalniach węgla. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, str. 33-55.

⁷ **Cygankiewicz J.**, 2001. Methods of fire gases detection in early stages of an endogenous fire. W: 29-th International Conference of Safety in Mines Research Institutes, Conference Proceedings vol. 1, Szczyrk 8-11 October 2001, Central Mining Institute, Katowice, str. 237-245.

⁸ **Cygankiewicz J.**, 2006. Modelowanie emisji gazów z zagrzewającego się złoża węgla. Materiały 4 Szkoły Aerologii Górniczej, Kraków 10-13.10.2006. str. 65-77.

⁹ **Cygankiewicz J.** 2006. Modelowanie emisji gazów z zagrzewającego się złoża węgla. Materiały 4 Szkoły Aerologii Górniczej. Sekcja Aerologii Górniczej Komitetu Górnictwa PAN-Kraków, AGH, Instytut Mechaniki Górotworu PAN, str. 65-77

¹⁰ **Cygankiewicz J.**, Dudzińska A., 2009. Analiza zagrożenia pożarowego na podstawie analiz chromatograficznych powietrza kopalnianego. Obchody 90-lecia AGH i 35-lecia WEiP Konferencja: „Paliwa Energia Ochrona Środowiska, 28-29 maja 2009 r. Kraków.

5.1.2. Opracowanie sposobu wykrywania śladowych zawartości węglowodorów C₂–C₄ i wodoru w powietrzu kopalnianym

Opracowałem sposób wykrywania śladowych zawartości węglowodorów grupy C₂–C₄ i wodoru w powietrzu kopalnianym. Podstawą ww. sposobu są współpracujące z chromatografami gazowymi urządzenia umożliwiające oznaczanie niskich stężeń tych gazów. Opracowany sposób oznaczania śladowych zawartości węglowodorów C₂–C₄ w gazach kopalnianych metodą chromatograficzną polega na usuwaniu przy pomocy nafionu wilgoci z próby powietrza, a następnie zagęszczeniu na odpowiednio dobranym adsorbacie gazów takich jak etan, etylen, propan, propylen, izobutan i n-butan oraz acetylen. W tym celu przepuszcza się próbki gazów przez dwuwarstwowe złożę składające się z sadzy grafitowej i sita węglowego molekularnego¹¹. Z kolei sposób oznaczania niskich stężeń wodoru w gazach kopalnianych polega na wstępnym zagęszczeniu wodoru w próbce badanych gazów poprzez wymuszenie jej przepływu poprzez złożę węgla aktywnego, którego powierzchnia właściwa jest większa od 500 m²/g. Podczas tej operacji wodór nie adsorbuje się na węglu aktywnym w przeciwieństwie do składników mieszaniny gazowej¹².

5.1.3. Wyznaczanie warunków krytycznych samozapalenia

Samozapalenie węgla jest wynikiem wzrostu temperatury podczas utleniania. Wzrost ten może jednak wystąpić tylko wtedy gdy strumień ciepła utleniania jest większy od strumienia ciepła wypływającego ze złoża. Aby to mogło nastąpić muszą być spełnione warunki krytyczne samozapalenia. Dotyczą one między innymi wymiarów geometrycznych złoża, sposobu odprowadzania ciepła do otoczenia, zawartości tlenu w dopływającym powietrzu. Wyznaczałem warunki samozapalenia złoża węgla wykorzystując do tego celu:

- teorię Franka-Kamienieckiego i występujący w tej teorii bezwymiarowy parametr krytyczny δ określony dla danych warunków fizycznych i chemicznych złoża.
- Opracowane przeze mnie modele numeryczne samozapalenia złoża węgla.

¹¹ **Cygankiewicz J.**, Szumny J., 2004, Patent 186454, Sposób oraz urządzenie do oznaczania śladowych zawartości węglowodorów C₂-C₄ w gazach, zwłaszcza kopalnianych, Polska, Urząd patentowy RP.

¹² **Cygankiewicz J.**, Wrzeski J., 2004, Patent 186453, Urządzenie do oznaczania niskiego stężenia wodoru w gazach, zwłaszcza kopalnianych, Polska, Urząd patentowy RP.

Stwierdziłem, że ze względu na to, że w rzeczywistych warunkach przebiegającego procesu utleniania założenia przyjęte w teorii Franka-Kamienieckiego nie są spełnione dostatecznie dokładnie. Znacznie bardziej przydatne dla praktyki górniczej są rezultaty uzyskane w wyniku modelowania numerycznego procesu samozapalenia^{13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25}.

Znaczne rozwinięcie metod wyznaczania warunków krytycznych samozapalenia było możliwe po opracowaniu modeli samozapalenia złoża węgla o kształcie warstwy płaskiej lub cylindra w warunkach naturalnego lub wymuszonego przepływu powietrza co zostało przedstawione w monografii habilitacyjnej.

¹³ **Cygankiewicz J.** 1999. Zagrożenie pożarowe. Rozdział 5 W: Koncentracja wydobywania a zagrożenia górnicze. Praca zb. Pod red. J. Dubińskiego, GIG, Katowice, 1999, str. 97-106

¹⁴ **Cygankiewicz J.**, 2000. Analiza ryzyka zagrożenia pożarowego w wyrobiskach górniczych. Biuletyn Głównego Instytutu Górnictwa, nr 3, str. 6-8.

¹⁵ **Cygankiewicz J.**, 2000. Badania niskotemperaturowego samozagrzewania węgla kamiennych w Głównym Instytucie Górnictwa. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, 2000, nr 2 seria z Perlikiem. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, str. 5-31.

¹⁶ **Cygankiewicz J.**, 2000. Mathematical model of coal self-heating process accompanied by chemical reaction and variations of humidity. Wsjeukrainskaja Konferencija 3 nielinijnych problem matematycznofiziki, 25-30 czerwca 2000, str. 15.

¹⁷ **Cygankiewicz J.**, 2001. Matematyckaszkaja model procesja samonagriewanija uglasoprowożdajuszczego s jachimiczeskimi reakcijami i izmijenienijemwłaźnosti. Krajowi Zadaczi dla Diferencjalnych Riwnań, Wydawnictwo „Prug” Wipusk 7, str. 250-261.

¹⁸ **Cygankiewicz J.**, 2002. Problem samozapalności węgla w świetle badań laboratoryjnych i kopalnianych. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej 2002, str. 213-226.

¹⁹ **Cygankiewicz J.**, 2003. Ocena ryzyka pożaru endogenicznego w rejonach eksploatacyjnych kopalń. Zarządzanie bezpieczeństwem pracy w górnictwie – część 3. Wiadomości Górnicze nr 9, str. 416-424.

²⁰ **Cygankiewicz J.** 2003. Forecasting of self-heating of coal In underground workings. 30th International Conference of Safety In Mines Research Institutes. South African Institute of Mining and Metallurgy 2003: p. 493-502

²¹ **Cygankiewicz J.**, 2004. Nowa metoda oceny zagrożenia pożarem endogenicznym w rejonach eksploatacyjnych kopalń. Materiały 3 Szkoły Aerologii Górniczej, Zakopane 12-15.10.2004, str. 325-336.

²² **Cygankiewicz J.**, Krause E., 2005. Kryteria warunkujące bezpieczeństwo prowadzenia eksploatacji w pokładach silnie metanowych i zagrożonych pożarami endogenicznymi, na przykładzie ściany nr 9 w pokładzie 405/2 w kopalni „Sośnica”. Prace Naukowe GIG: Górnictwo i Środowisko nr 2, str. 37-57.

²³ **Cygankiewicz J.** 2011. Prognozowanie samozagrzewania węgla w zrobach ścian. IV Konferencja Naukowo-Szkoleniowa: Problemy Współczesnego Górnictwa, Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko nr 1/1/2011, str. 432-448

²⁴ **Cygankiewicz J.** 2013. Rozdział 3. Zagrożenie pożarami endogenicznymi. W: Bezpieczeństwo pracy w kopalniach węgla kamiennego, praca zbiorowa pod red. W. Konopko, Tom 2, Zagrożenia naturalne, str. 98-123

²⁵ **Cygankiewicz J.** 2015. Determination of Critical Conditions of Spontaneous Combustion of Coal in Longwall Gob Areas. Archives of Mining Sciences, Vol.60, Issue 3, page 761-776

5.1.4. Opracowanie nowych metod oceny skłonności do samozapalenia

Opracowałem metody oznaczania skłonności węgla do samozapalenia w oparciu o wyniki testu adiabatycznego oraz w oparciu o ciepło wydzielane podczas utleniania 1 kg węgla w temperaturze równej temperaturze pierwotnej skał.

➤ *Oznaczanie skłonności węgla do samozapalenia metodą testu adiabatycznego.*

Opracowałem metodę badania skłonności węgla do samozapalenia polegającą na obserwacji procesu samozagrzewania próbki danego węgla w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Dla węgla, które w kalorymetrze adiabatycznym uległy samozagrzewaniu i osiągnęły temperaturę 185 °C istotny jest czas osiągnięcia tej temperatury. W zależności od tego czasu zaproponowałem następujący podział węgla:

Grupa samozapalności	Skłonność do samozapalenia	Wynik testu adiabatycznego
I	mała	$t > 500 \text{ h}$
II	średnia	$200 < t \leq 500 \text{ h}$
II	wysoka	$100 < t \leq 200 \text{ h}$
IV	bardzo wysoka	$t \leq 100 \text{ h}$

➤ *Oznaczanie skłonności węgla do samozapalenia w oparciu o ciepło wydzielane podczas utleniania 1 kg węgla w temperaturze równej temperaturze pierwotnej skał.*

Przeprowadziłem badania ciepła wydzielanego podczas utleniania próbek węgla z różnych pokładów w temperaturach odpowiadających temperaturom pierwotnym. Ustaliłem, że podstawą klasyfikacji skłonności do samozapalenia będzie ilość ciepła mierzona w J wydzielona podczas utleniania przeliczona na 1 kg rozkruszonego węgla w temperaturze równej temperaturze pierwotnej w okresie 2 godzin. Ustaliłem, że węgle zaliczać się będą do trzech grup w zależności od wartości uzyskanego ciepła^{26,27,28,29,30,31}.

²⁶ **Cygankiewicz J.**, 1999. Oznaczanie skłonności węgla do samozapalenia metodą kalorymetryczną. W: Najnowsze osiągnięcia w zakresie przewietrzania kopalń oraz zwalczania zagrożeń pożarowych, gazowych i klimatycznych, Materiały Konferencyjne, Szczyrk 22-24 April, str. 173-190, Wyd. GIG Katowice

²⁷ **Cygankiewicz J.**, 1999. Determination of coal susceptibility to spontaneous combustion when using the calorimetric method. W: Najnowsze osiągnięcia w zakresie przewietrzania kopalń oraz zwalczania zagrożeń pożarowych, gazowych i klimatycznych, Materiały Konferencyjne – Suplement, Szczyrk 22-24 April, str. 25-42, Wyd. GIG Katowice

Grupa samozapalności	Skłonność do samozapalenia	Ciepło wydzielane podczas utleniania 1 kg węgla w temperaturze równej temperaturze pierwotnej skał w czasie 2 godzin
I	mała	$Q^p \leq 120$
II	średnia	$120 < Q^p \leq 200$
II	duża	$Q^p > 200$

5.1.5. Wykazanie wpływu ciepła wydzielanego podczas utwardzania klejów poliuretanowych na możliwość samozapalenia

Przeprowadziłem badania laboratoryjne oraz badania „in situ” wpływu stosowanych klejów poliuretanowych na rozwój procesów samozapalenia w rozkruszonym węglu mającym bezpośredni kontakt z klejem. Badałem rozkład temperatury w kleju podczas reakcji utwardzania a także w sąsiadującym z nim węglu. Stwierdziłem, że należy ograniczyć temperaturę reakcji utwardzania klejów poliuretanowych do wartości gwarantujących bezpieczeństwo pożarowe. Wprowadziłem wskaźnik wzrostu temperatury węgla WWT równy szybkości wzrostu temperatury wyrażonej w °C na godzinę podczas samozagrzewania węgla w warunkach adiabatycznych w temperaturze 150 °C. W zależności od wartości tego wskaźnika zaproponowałem klasyfikację węgla:

Wartość wskaźnika WWT °C/h	Ocena szybkości wzrostu temperatury
$WWT \geq 3$	wysoka
$1 \leq WWT < 3$	średnia
$WWT < 1$	niska

²⁸ Cygankiewicz J., 2000. Badanie skłonności polskich węgla do samozapalenia metodą testu adiabatycznego. International Congress Mine Ventilation and Safety Engineering, VSB – Technical University Ostrava, October 2000, str. 22-57

²⁹ Cygankiewicz J., 2000. About Determination of Susceptibility of Coals to Spontaneous Combustion Using an Adiabatic Test Method. Arch. Min. Sci. t. 45, nr 2, str. 247-273

³⁰ Cygankiewicz J., Grekov S.P., Koszowski B.I., 2000. Kompleksowy wskaźnik dla oceny skłonności węgla do samozapalenia. 9 Sesja Międzynarodowego Biura Termofizyki Ciepłej, 18-22 wrzesień 2000, str. 67-72.

³¹ Cygankiewicz J. 2012. Nowe kryteria klasyfikacji skłonności węgla do samozapalenia. W: Zwalczenie zagrożeń aerologicznych w kopalniach. Praca zbiorowa pod red. S. Pruska, J. Knechtela i B. Madei-Strumińskiej. GIG Katowice, str. 39-50

Stwierdziłem, że dla zachowania bezpieczeństwa pożarowego temperatury reakcji twardnienia klejów poliuretanowych nie powinny przekraczać następujących wartości:

Szybkość wzrostu temperatury węgla	Dopuszczalna temperatura reakcji
wysoka	130 °C
niska i średnia	150 °C

Opracowane przeze mnie kryteria zostały wdrożone w polskich kopalniach węgla³².

5.1.6. Opracowanie nowych metod prewencji pożarowej polegających na równoczesnym podawaniu do zrobów dwutlenku węgla i azotu

Podstawowymi gazami inertnymi używanymi do zwalczania zagrożenia pożarowego w kopalniach są dwutlenek węgla, azot, metan oraz gazy spalinowe. Posiadają one różne właściwości gaszące. Podstawowym celem jest jednak znaczące ograniczenie zawartości tlenu w otoczeniu pożaru lub zagrzanego węgla. Żeby to osiągnąć strumień gazu podawanego do zrobów musi przepływać przez miejsce pożaru lub zagrzanego węgla. Stwierdziłem, że rozptył gazu inertnego w zrobach zależy od szeregu czynników między innymi rozkładu potencjału aerodynamicznego w rejonie ściany, nachylenia eksploatowanego pokładu a także ilości i gęstości podawanego gazu. Mieszając ze sobą w odpowiednich proporcjach dwutlenku węgla i azotu otrzymuje się gaz inertny o określonych właściwościach gaszących i określonej gęstości. To z kolei w połączeniu z odpowiednio dużym strumieniem podawanego gazu i rozkładem potencjału aerodynamicznego spowodować może przepływ gazu inertnego w zrobach gwarantujący likwidację zagrożenia^{33,34,35}.

³² **Cygankiewicz J.**, 2006. Wpływ stosowanych klejów poliuretanowych na możliwość samozapalenia węgla. W: Konferencja naukowo-szkoleniowa nt. Nowoczesne metody i środki utrzymania wyrobisk górniczych, Ustroń, 1-2 czerwca 2006 r., Wyd. GIG Katowice, str. 143-156.

³³ **Cygankiewicz J.**, Grekov S.P., Berezowski A.A. 2001. Matematyčeskaja model procesja samonagriewanija ugla. Sbornik Naucznych Trudow: Gornospasatielnoje Dieło. Wyd. Nauczno - Issledowatielskij Institut Gornospasatielnowo Dieła, Donieck

³⁴ **Cygankiewicz J.**, Konsek S., 2008. Metoda prewencji pożarów endogenicznych w zrobach, oparta na zatłaczaniu mieszanin azotu, ditlenku węgla, pary wodnej i spienionych antypirogenów. Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko, Wydanie Specjalne: Nowe technologie zwalczania zagrożeń naturalnych w kopalniach węgla kamiennego. nr II/2008, str. 19-40.

³⁵ **Cygankiewicz J.**, Konsek S., Lasek M., Niezgoda F., 2016, Patent 221505, Sposób i układ do zapobiegania i likwidacji zagrożenia pożarowego w zrobach górniczych, Polska, Urząd patentowy RP.

5.1.7. Opracowanie metody oceny szybkości wychładzania zaizolowanego pola pożarowego

Opracowałem metodę oceny szybkości wychładzania zagrzanego fragmentu złoża. Po zaizolowaniu pola pożarowego i zinertyzowaniu atmosfery wewnątrz pola następuje proces wychładzania zagrzanej masy węgla i otaczających skał. Stwierdziłem, że szybkość tego wychładzania zależy od wielu czynników do których należy zaliczyć:

- masę zagrzanego węgla i skał
- kształt geometryczny złoża
- rozkład temperatury
- prędkość przepływu gazów przez złożo
- zawartość tlenu w gazach
- sposób odprowadzania ciepła do otoczenia
- rodzaj otaczających skał
- rodzaj płynu mającego bezpośredni kontakt z powierzchnią węgla.

Stwierdziłem, że podstawowym kryterium bezpiecznego otwarcia pola a następnie przewietrzenie jest osiągnięcie przez zagrzaną węgiel temperatury niższej od temperatury krytycznej. Ocenę maksymalnej temperatury węgla w polu pożarowym powinno się przeprowadzać w dwojaki sposób:

- Progностyczny oparty na matematycznym modelowaniu procesu wychładzania zagrzanego węgla uwzględniającym wszystkie istotne czynniki mające wpływ na proces
- W oparciu o analizy chromatograficzne gazów pobieranych z otamowanego pola.

Zasadą jest aby oceny temperatury zagrzanego węgla przeprowadzone w ww. sposób były zbieżne^{36,37,38,39}.

³⁶ **Cygankiewicz J.**, Knechtel J., Waclawik J., 1996. O temperaturze skał w otamowanym polu pożarowym. Konferencja naukowo-techniczna: Zagrożenia metanowe i pożarowe w górnictwie, wykorzystanie metanu z pokładów węgla kamiennego, Ustroń, 2-4 października 1996 r. str. 391-410.

³⁷ **Cygankiewicz J.**, Knechtel J., Waclawik J., 1997. O dynamice zmian temperatury w polu pożarowym. Arch. Górn., t. 42, nr 3, str. 337-352

³⁸ **Cygankiewicz J.**, Waclawik J. 1997. O ocenie niebezpieczeństwa wznowienia ognia w razie otwarcia pola. W: 90 lat ratownictwa górniczego na ziemiach polskich 1907-1997. Międzynarodowa Konferencja n/t Ratownictwa Górniczego. CSG Bytom 25-27.11.1997, str. 25-32

³⁹ **Cygankiewicz J.**, 2004. Prognozowanie czasu stygnięcia zagrzanego fragmentu złoża węgla. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, zeszyt 261, Konferencja Naukowa „Górnictwo zrównoważonego rozwoju 2004” str. 371-383.

5.2. Sorpcja wybranych gazów na węglach kamiennych

5.2.1. Wykazanie wpływu powierzchni węgla wyznaczonej metodą sorpcji ditlenku węgla i azotu oraz porowatości na skłonność do samozapalania

W strukturze węgla kamiennych występują węglowodory aromatyczne i alifatyczne, nasycone i nienasycone. Ich skład zmienia się ze zmianą stopnia metamorfizmu węgla. Zmianom ulegają ilości polarnych centrów zarówno elektronodonorowych jak i elektronoakceptorowych, co ma wpływ na reakcję substancji organicznej z cząsteczkami atmosferycznego tlenu prowadzącą do samozapalania. Bardzo ważnym czynnikiem jest porowatość węgla zapewniająca dostęp tlenu do układu chłonnego. Przeprowadziłem badania sorpcji ditlenku węgla i azotu na 18-tu próbkach węgla kamiennych pobranych z różnych pokładów o różnej zawartości pierwiastka węgla i części lotnych. Wykazałem związek między wartościami powierzchni właściwej wyznaczonej z sorpcji CO₂ i N₂, a skłonnością węgla do samozapalania. Skłonność tą określono na podstawie obowiązującej normy PN-93/G-04558. W oparciu o wyznaczone z sorpcji ditlenku węgla wartości powierzchni właściwej zaproponowano podział węgla na cztery grupy skłonności do samozapalania^{40, 41, 42}.

Grupa skłonności do samozapalania	Proponowana grupa skłonności do samozapalania	Powierzchnia właściwa wyznaczona z sorpcji CO ₂	Powierzchnia właściwa wyznaczona z sorpcji N ₂
I	bardzo mała	poniżej 100 m ² /g	około 2 m ² /g
II	mała	od 100 do 130 m ² /g	~ 2 do 3 m ² /g
III	wysoka	od 130 do 150 m ² /g	~ 2,9 do 5,5 m ² /g
IV i V	bardzo wysoka	od 150 do 180 m ² /g	~ 4,5 do 13,5 m ² /g

5.2.2. Wykazanie wpływu metamorfizmu węgla i ich składu chemicznego na skłonność do sorpcji gazów

Prowadzone zostały badania sorpcji wybranych gazów na węglach o różnym stopniu metamorfizmu i różnym składzie chemicznym. Stwierdzono, że węgle o niskim stopniu metamorfizmu

⁴⁰ Cygankiewicz J., Dudzińska A., Żyła M., 2006. Związek między wartościami powierzchni właściwej wyznaczonej metodą sorpcji azotu i ditlenku węgla a skłonnością węgla kamiennych do samozapalania. Archiwum Górnictwa, vol. 51, nr 2, str. 151-161.

⁴¹ Cygankiewicz J., Żyła M., Dudzińska A., 2006. The influence of porosity of hard coal on its susceptibility to spontaneous combustion. Sixth International Symposium – Surface Heterogeneity Effects in Adsorption and Catalysis on Solids – Poland Zakopane. Str. 61

⁴² Zarębska K., Cygankiewicz J., Dudzińska A., Baran P., 2012. Ocena samozagrzewania węgla i zagrożenia pożarowego polskich węgla kamiennych w oparciu o analizę danych sorpcyjnych. (Evaluation of the self-heating and fire hazards of hard coals in Polish collieries based on the analysis of sorption data). Oil gas 23rd International Conference Unconventional Natural Gas in Poland AGH 29 – 31.05.2012

charakteryzujące się niską refleksyjnością wityrynitów o zawartości pierwiastka węgla $C_t^a < 70\%$ wagowych i zawartości pierwiastka tlenu O_d^a przekraczającej nieraz 10% posiadają powierzchnię silnie hydrofilową, polarną o dużej ilości tlenowych grup polarnych hydroksylowych, karboksylowych, karbonylowych i eterowych sorbują największe ilości gazów. Są to przede wszystkim węglowodory etan, etylen, propan, propylen, a także tlen i ditlenek węgla. Posiadają więc największą chłonność sorpcyjną. Węgły o średnim stopniu metamorfizmu o zawartości pierwiastka węgla $70\% \leq C_t^a \leq 80\%$ i zawartości pierwiastka tlenu O_d^a rzędu kilku procent posiadają małą ilość grup reaktywnych i dużą zawartość węglowodorów alifatycznych. Powierzchni tych węgli jest hydrofobowa o stosunkowo niskim stopniu polarności. Sorbują one mniejsze ilości gazów: węglowodorów, tlenu i ditlenku węgla. Węgły o najwyższym stopniu metamorfizmu o zawartości pierwiastka węgla $C_t^a > 80\%$ i zawartości pierwiastka tlenu O_d^a na poziomie $1 - 2\%$ charakteryzujące się najwyższą refleksyjnością wityrynitów posiadają powierzchnię w niewielkim stopniu polarną. Posiadają najmniejszą chłonność sorpcyjną⁴³,

44, 45, 46, 47, 48, 49, 50

5.2.3. Wykazanie istnienia naturalnej desorpcji gazów używanych do oceny stanu zagrożenia pożarowego

W próbkach gazowych pobieranych ze zrobów ścian oraz z zaizolowanych wyrobisk nieraz stwierdzano stężenia gazów: etylenu, propylenu, tlenku węgla, wodoru, których obecność nie mogła być wytłumaczona istniejącym zagrożeniem pożarowym. Zaszło więc podejrzenie, że istnieje naturalna desorpcja tych gazów. Przeprowadzone badania potwierdziły taką możliwość. Dotyczy to zwłaszcza takich gazów jak tlenek węgla, etylen i wodór. Otrzymane wyniki mogą posłużyć do

⁴³ **Cygankiewicz J.**, Zarębska K., Żyła M., 2006. Wpływ stopnia metamorfizmu polskich węgli kamiennych na sorpcję argonu. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 22, zeszyt 3, str. 359-365.

⁴⁴ **Cygankiewicz J.**, Dudzińska A., Żyła M., 2006. The effect of particle size of comminuted bituminous coal on low-temperature sorption of nitrogen and room-temperature sorption of carbon dioxide. *Przemysł Chemiczny* nr 11, str. 1505-1509

⁴⁵ **Cygankiewicz J.**, Dudzińska A., Żyła M., 2007. Sorpcja i desorpcja tlenku węgla na kilku próbkach polskich węgli kamiennych. *Archiwum Górnictwa*, vol. 52, nr 4, str. 573-585.

⁴⁶ **Cygankiewicz J.**, Dudzińska A., Zarębska K., Krzyżanowski A., 2007. Nitrogen sorption on selected coal samples from Silesia upper, Theoretical and experimental studies of interfacial phenomena and their technological applications: XI Polish-Ukrainian symposium, Krasnobród – Zamość, Poland, August 22–26, 2007.

⁴⁷ **Cygankiewicz J.**, Dudzińska A., Żyła M., 2009. The relation between the size of bituminous coal particles and the sorption of carbon monoxide. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 25, zeszyt 1, str. 85-99.

⁴⁸ **Cygankiewicz J.**, Dudzińska A., Żyła M., 2012. Examination of sorption and desorption of hydrogen on several samples of polish hard coals. *Adsorption. Journal of International Adsorption Society*. 2012, 18, 3-4, 189-198.

⁴⁹ **Cygankiewicz J.**, Żyła M., Dudzińska A., 2012. Wpływ stopnia metamorfizmu węgli kamiennych na sorpcję i desorpcję etanu. *Karbo* 2012, nr 3, str.134-144

⁵⁰ **Cygankiewicz J.**, Dudzińska A., Żyła M., 2013. Sorpcja węglowodorów na różnych próbkach węgli kamiennych. *Karbo*, nr 3, str. 217-225

opracowania wskaźników korekcyjnych umożliwiających korektę stężeń w/w gazów przy ocenie zagrożenia pożarowego^{51, 52}.

5.3. Wybrane problemy wentylacji kopalń

5.3.1. Opracowanie metody stabilizacji sieci wentylacyjnej

Opracowałem matematyczny model nieustalonego ruchu powietrza w pojedynczej bocznicy oraz sieci wyrobisk kopalnianych. Rozważany model sprowadziłem do postaci macierzowej. Podałem kryterium stabilności technicznej tego przepływu oparte na twierdzeniu retraktorowym T. Ważewskiego. Kryterium to podałem w formie układu nierówności. Na spełnienie tych nierówności mają wpływ zaburzenia występujące zarówno w stanach awaryjnych jak i bezawaryjnych. Zaburzenia te mogą spowodować, że część nierówności nie zostanie spełniona, a wektor niezależnych strumieni masy opuści obszar dozwolonych wartości. Dla zachowania stabilności przepływu należy zatem tak dobrać parametry sieci wentylacyjnej (opory aerodynamiczne wyrobisk, opory tam regulacyjnych, charakterystyki wentylatorów), aby pomimo wystąpienia zaburzeń spełnione było kryterium stabilności^{53, 54, 55, 56, 57}.

5.4. Wybrane problemy klimatyzacji kopalń

5.4.1. Określenie wpływu przewietrzania wyrobisk na wychładzanie górotworu

Przeprowadziłem badania wychładzania masywu skalnego wokół wyrobisk pod wpływem przewietrzania. W celu wyeliminowania innych źródeł ciepła do badań przyjęto wyrobiska, w których

⁵¹ Dudzińska A., **Cygankiewicz J.**, 2015. Analysis of adsorption tests of gases emitted in the coal self-heating process, *Fuel Processing Technology* 2015, vol. 137, nr 9, str. 109-116.

⁵² Dudzińska A., **Cygankiewicz J.**, Włodarek M. 2017. Natural content of gases: Carbon monoxide, carbon dioxide, hydrogen and unsaturated hydrocarbons of ethylene, propylene and acetylene in select bituminous coal seams, *International Journal of Coal Geology* v. 178, Jun 1, str. 110-121

⁵³ **Cygankiewicz J.** 1981. Pewna metoda analizy przebiegów procesów przejściowych występujących podczas przepływu powietrza przez kopalniane sieci wentylacyjne. *Górnictwo. Kwartalnik AGH w Krakowie*, wyd. Śląsk, zeszyt 1/1981, str. 11-20

⁵⁴ **Cygankiewicz J.** 1985. Wpływ wyrzutów na rozptyły w sieciach wentylacyjnych. *Symposium Naukowe: Aktualne badania i osiągnięcia w górnictwie*. GIG Katowice, str. 169-181

⁵⁵ **Cygankiewicz J.** 1995. O stabilności przepływu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej. *Materiały na seminarium: Aktualne problemy wentylacji, klimatyzacji i zwalczania pożarów w kopalniach podziemnych*. Instytut Eksploatacji Złóż Politechniki Śląskiej, Ustroń 23-24.11. 1995, str. 117-124

⁵⁶ **Cygankiewicz J.** 1995. Wybór parametrów stabilnej sieci wentylacyjnej. *Materiały XXVI Międzynarodowej Konferencji Instytutów Bezpieczeństwa Górniczego*. GIG – KD „Barbara”, Katowice 4-8.09.1995

⁵⁷ **Cygankiewicz J.** 1998. O doborze parametrów stabilnej sieci wentylacyjnej. *Archiwum Górnictwa*, t.43, z.2, str. 229-244

nie ma technologicznych źródeł ciepła, wyrobiska poziome, w których nie zachodzą zmiany związane z autokompresją. Aby ograniczyć wpływ zmian temperatury powietrza wzdłuż trasy wyrobisk ograniczono ich długość do 50 m. Przyjąłem, że na wychładzanie masywu skalnego mają wpływ cztery czynniki: czas przewietrzania wyrobiska, strumień objętości powietrza płynącej wyrobiskiem (intensywność przewietrzania), temperatura pierwotna skał oraz temperatura powietrza świeżego dopływającego do wyrobiska.

Stwierdziłem, że proces wychładzania masywu skalnego silnie zależy od czasu przewietrzania wyrobiska, przy czym dla krótkich czasów wychładzanie jest szybsze, a dla dłuższych wolniejsze. Ze wzrostem czasu przewietrzania wzrasta obszar masywu skalnego, w którym temperatura jest niższa od wartości pierwotnej. Temperatura masywu skalnego w niewielkim stopniu zależy od intensywności przewietrzania. Za wzrostem odległości od ociosu wpływ intensywności przewietrzania na temperaturę skał jest coraz mniejszy. Wpływ ten jest znaczący tylko blisko ociosu i dla krótkich czasów przewietrzania. Temperatura pierwotna skał ma znaczący wpływ na temperaturę ociosu dla krótkich czasów przewietrzania oraz na temperaturę masywu w znacznych odległościach od ociosu. Wpływ temperatury powietrza świeżego dopływającego do wyrobisk jest znaczący na zmiany temperatury ociosu, przy czym wpływ ten jest coraz większy w miarę wzrostu czasu przewietrzania. Natomiast ze wzrostem odległości w głąb górotworu wpływ temperatury powietrza jest coraz mniejszy^{58, 59, 60, 61, 62}.

⁵⁸ **Cygankiewicz J.**, Knechtel J., 2014. Isotherm Maps of Virgin Rock Temperature in Collieries of Katowicki Holding Węglowy. *Journal of Sustainable Mining*, Issue 4, Volume 13, 2014, page 1-4.

⁵⁹ **Cygankiewicz J.**, Knechtel J., 2014. Zasięg strefy wychłodzenia górotworu wokół wyrobisk rejonu eksploatacyjnego. Praca zbiorowa pod redakcją S. Pruska i J. Cygankiewicza: Wybrane problemy eksploatacji pokładów węgla kamiennego ze szczególnym uwzględnieniem zagrożeń aerologicznych. Konferencja nt. Wybrane zagadnienia wentylacyjne i pożarowe w kopalniach, Jankowice Rudzkie, 24-26 września 2014, Wyd. GIG, Katowice, str. 12-22

⁶⁰ **Cygankiewicz J.**, Knechtel J., 2014. Wpływ intensywności przewietrzania czynnego wyrobiska górniczego na postęp wychładzania górotworu. Praca zbiorowa pod redakcją S. Pruska i J. Cygankiewicza: Wybrane problemy eksploatacji pokładów węgla kamiennego ze szczególnym uwzględnieniem zagrożeń aerologicznych. Konferencja nt. Wybrane zagadnienia wentylacyjne i pożarowe w kopalniach, Jankowice Rudzkie, 24-26 września 2014, Wyd. GIG, Katowice, str. 23-32

⁶¹ **Cygankiewicz J.**, Knechtel J. 2017. Wpływ głębokości eksploatacji węgla na ciepło oddawane przez górotwór, *Przegląd Górniczy* nr 2/2017, str. 8-17

⁶² **Cygankiewicz J.**, Cygankiewicz A.: Czynniki wpływające na proces wychładzania masywu skalnego. W: 9 *Szkoła Aerologii Górniczej*, 27-29 wrzesień 2017, Białka Tatrzańska, str. 227-244

5.4.2. Określenie wpływu schładzania azotu podawanego do zaizolowanych wyrobisk na szybkość wychładzania węgla i masywu skalnego wokół pożaru lub georeaktora

Badania pilotażowej instalacji podziemnego georeaktora zgazowania węgla wykazały, że jego praca powoduje znaczne nagrzanie otaczającego masywu skalnego. Wykazałem, że jeśli wyrobiskiem płyną produkty gazowe o temperaturze około 1000 °C, wówczas temperatura ścian wyrobiska może wynosić nawet 975 °C, a temperatura otaczającego wyrobisko masywu skalnego w odległości 1 metra od ściany wyrobiska w głąb górotworu może przekraczać 400 °C. Podobne wartości występują w przypadku pożaru podziemnego. Niezwykle ważnym problemem jest możliwość szybkiego wychłodzenia rozgrzanego masywu skalnego. Jednym ze sposobów jest ochładzanie gazów inertnych, zwłaszcza azotu, podawanych do zaizolowanego pola pożarowego lub georeaktora. W ostatnich latach pojawiły się techniczne rozwiązania umożliwiające takie wychładzanie. Przeprowadziłem badania wpływu podawania zimnego azotu do nieczynnego już georeaktora na proces wychładzania masywu skalnego. Azot podawany w ilości 1200 m³/h udawało się schłodzić do temperatury mniejszej od 0 °C. Stwierdziłem, że nawet krótki czas podawania azotu daje efekty w postaci wyraźnego ochłodzenia skał. Już po 10 dniach podawania schłodzonego azotu temperatura skał w odległości 1 metra od ścianki przewodu – wyrobiska spadła o ponad 200 °C, a po 100 dniach podawanie azotu temperatura ta spadła poniżej 60 °C, czyli poniżej wartości krytycznej dla węgla ⁶³,
^{64, 65}.

5.4.3. Wykazanie wpływu ciepła wydzielonego w wyniku niskotemperaturowego utleniania na mikroklimat w wyrobiskach kopalni

Prowadziłem badania eksperymentalne i teoretyczne. Celem badań eksperymentalnych było wyznaczenie ciepła wydzielanego podczas utleniania węgla. Badania przeprowadzone zostały w kalorymetrach adiabatycznych i kalorymetrze izotermicznym. Badane były węgle o różnym stopniu metamorfizmu. Stwierdziłem, że strumień ciepła wydzielanego w wyniku utleniania zależy od rodzaju węgla, zawartości wilgoci w węglu, stopnia rozdrobnienia, temperatury i zawartości tlenu w

⁶³ **Cygankiewicz J.**, Knechtel J., Więckowski M., 2014. Wpływ podawania schłodzonego azotu na proces wychładzania górotworu. Praca zbiorowa pod redakcją S. Pruska i J. Cygankiewicza: Wybrane problemy eksploatacji pokładów węgla kamiennego ze szczególnym uwzględnieniem zagrożeń aerologicznych. Konferencja nt. Wybrane zagadnienia wentylacyjne i pożarowe w kopalniach, Jankowice Rudzkie, 24-26 września 2014, Wyd. GIG, Katowice, str. 33-42

⁶⁴ Turek M., **Cygankiewicz J.**, Więckowski M. 2015. Extinguishing the underground coal gasification georeactor in the bituminous coal mine, : Przemysł Chemiczny Vol. 94, Issue 12, Pages: 2173-2179

⁶⁵ **Cygankiewicz J.**, 2016. Zastosowanie schłodzonego azotu do likwidacji termicznych skutków działania georeaktora podziemnego zgazowania węgla. Przegląd Górniczy nr 2 str. 3-9

dopływającym powietrzu. W ramach zadań teoretycznych przeprowadziłem symulacje komputerowe mikroklimatu w wyrobiskach kopalnianych z uwzględnieniem ciepła wydzielanego podczas niskotemperaturowego utleniania węgla. Stwierdziłem, że wartość strumienia ciepła wydzielanego podczas utleniania w wyrobiskach jest przydatna przy obliczeniach klimatycznych, a jej pomijanie może nieraz prowadzić do błędów w ocenie zagrożenia klimatycznego^{66, 67, 68}.

⁶⁶ **Cygankiewicz J.**, 2005. Wyznaczanie strumienia ciepła pochodzącego od utleniania węgla w wyrobiskach górniczych. Materiały z 10-tej Sesji Międzynarodowego Biura Termofizyki Górniczej „IBMT 2005”, Gliwice 14-18.02.2005, str. 29-42.

⁶⁷ **Cygankiewicz J.**, Knechtel J., 2014. The effect temperature of Rock on microclimatic conditions in long gate road and galleries in coal mines. Archives of Mining Sciences, 2014, vol. 59, issue 1, page 189-216.

⁶⁸ **Cygankiewicz J.**, Knechtel J., 2014. Comments on the heat released during operation in hot rock mass and its possible applications. W: 14th International Mutidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM) 2014, 17-26 Jun., Bulgaria, Conference Proceedings 2014, Volume III, page 99-106.

6. Zestawienie osiągnięć naukowych po uzyskaniu stopnia doktora

Lp	Osiągnięcia	Liczba
1	Publikacje Ogólna liczba publikacji: <ul style="list-style-type: none"> ➤ w języku obcym ➤ w języku polskim ➤ samodzielnych ➤ monografie/ rozdziały w monografiach ➤ publikacje z listy JCR ➤ publikacje w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie JCR 	 96 39 57 35 17 44
2	Opracowania zbiorowe	23
3	Referaty Ogólna liczba referatów, w tym: <ul style="list-style-type: none"> ➤ opublikowane w materiałach konferencji międzynarodowych ➤ opublikowane w materiałach konferencji krajowych 	 75 31 44
4	Uzyskane patenty	19

Dane bibliometryczne dla całości dorobku po uzyskaniu stopnia doktora:

- sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR),
zgodnie z rokiem opublikowania **13,889**
- liczba cytowani według bazy Web of Science **104**
- indeks Hirscha według bazy Web of Science **8**
- suma punktów MNiSW **852**



 podpis wnioskodawcy