

UKD 622.333: 622.544.3: 622.1: 550.8: 519.61/64

## Modelowanie zjawisk termicznych w masywie skalnym w otoczeniu georeaktora

Modelling of thermal phenomena in the rock mass in the vicinity of a georeactor



*Dr hab. inż. Marek Ciało\**



*Prof. AGH; mgr inż. Agnieszka Stopkiewicz\**



*Mgr inż. Michał Kowalski\**



*Mgr inż. Mateusz Blajer\**

**Treść:** Podziemne zgazowanie węgla jest zagadnieniem szeroko badanym w kontekście możliwości wykorzystania pokładów węgla, których klasyczna eksploatacja jest ekonomicznie nieuzasadniona bądź technologicznie trudna. Ze względu na złożoność procesu zgazowania węgla, brak doświadczeń praktycznych, prognozowanie jego wpływu na otaczające geośrodowisko jest zagadnieniem trudnym. W artykule analizie poddano możliwości modelowania procesów termicznych oraz prognozowania ich wpływu na otaczający maszyn skalny. W tym celu wykorzystano program metod różnic skończonych FLAC 3D, w którym odwzorowano warunki doświadczeń *ex situ* prowadzonych dla różnych układów kanałów ogniowych. Uzyskane rezultaty z symulacji numerycznych porównywano z rzeczywistymi pomiarami. Pozwoliło to na ocenę możliwości wykorzystania narzędzi numerycznych do oceny i prognozowania wpływu procesów termicznych towarzyszących podziemnemu zgazowaniu węgla na otaczające geośrodowisko.

**Abstract:** Underground coal gasification is usually widely studied for possibilities of underground coal utilisation in places where normal underground excavation is economically undesirable or technologically difficult. Due to the complexity of coal gasification process and lack of practical experience, forecasting of its environmental impact is quite a hard task. This paper shows the options of numerical modelling of thermal phenomena and forecasting its influence on the surrounding rock mass. The finite difference method software FLAC3D was used for this purpose. The various *ex-situ* experiments for different fire channels were modelled. The results of numerical simulations were compared with data from *ex-situ* experiments. It allowed to estimate the possibilities of using numerical methods for the evaluation and forecasting environmental impacts of thermal processes which accompany the underground coal gasification.

\* ) AGH w Krakowie

**Słowa kluczowe:**

podziemne zgazowanie węgla, procesy termiczne, modelowanie numeryczne

**Key words:**

underground coal gasification, thermal processes, numerical modelling

**1. Wprowadzenie**

Podziemne zgazowanie węgla (pzw) niesie ze sobą wiele korzyści w stosunku do eksploatacji prowadzonej metodami klasycznymi, jednak z drugiej strony stawia duże wyzwania dla inżynierów i badaczy pracujących nad rozwojem tej technologii. Przegląd zagadnień związanych z podziemnym zgazowaniem węgla szeroko omówili między innymi Bhutto A. et al [4]. Jednym z bardzo ważnych aspektów podziemnego zgazowania węgla jest jego wpływ na środowisko. W tym aspekcie na uwagę należy mieć zarówno zagrożenia, jak i korzyści, płynące ze stosowania tej metody. Pewne polskie doświadczenia w tym temacie zaprezentowano w [10], natomiast szersze spojrzenie z perspektywy doświadczeń światowych (Pakistan, Brazylia) zawiera praca [8].

Stopień złożoności procesów zachodzących podczas pracy georeaktora, brak doświadczeń praktycznych, skłania do odwołania się do metod numerycznych między innymi w celu analizy czynników wpływających na przebieg procesu zgazowania oraz prognozowania wpływu pzw na otaczające geosrodowisko. Wśród stosowanych w tym aspekcie metod obliczeniowych wymienić można metodę różnic skończonych, metodę elementów skończonych, czy metodę elementów odrębnych. Badaniami oraz modelowaniem numerycznym procesów termicznych zachodzących podczas podziemnego zgazowania węgla zajmowano się w pracach: [6, 14, 24].

W artykule zaprezentowano podstawy teoretyczne związane z matematycznym opisem procesów termicznych zachodzących w górotworze podczas pracy georeaktora, w szczególności transferu ciepła w ośrodku porowatym, jakim jest masyw skalny. Przedstawiono również wyniki modelowania procesów termicznych metodą analizy odwrotnej na bazie wyników z doświadczeń *ex situ* przedstawionych w pracach [16, 22]. Modele obliczeniowe zbudowano w programie wykorzystującym metodę różnic skończonych FLAC 3D v.5.0. Wyniki i analiza przeprowadzonego modelowania dostarczają pewnych informacji odnośnie do możliwości zastosowania tego narzędzia obliczeniowego. Otrzymane wyniki mają jednakże charakter jakościowy i wskazują obszary, w których należy dokonać pewnych modyfikacji w celu poprawy dokładności symulacji.

**2. Procesy termiczne zachodzące w masywie skalnym podczas pracy georeaktora****2.1. Procesy sprężone**

Procesy fizyczne zachodzące podczas pracy georeaktora należą do grupy procesów sprzężonych (połączonych), co oznacza, że każdy z procesów wpływa na inicjację lub przebieg innych. W aspekcie modelowania zjawisk fizycznych zachodzących w otoczeniu georeaktora interesujące są dwie grupy procesów: termo-hydro-mechaniczne (THM) oraz termo-hydro-mechaniczno-chemiczne (THMC). Badania eksperymentalne oraz studia teoretyczne nad przebiegiem procesów sprzężonych prowadzone są już od przeszło dwóch dekad, istnieje więc wiele prac dotyczących zarówno THM [1, 15, 17, 18], jak i THMC [11, 20]. Wśród pierwszej grupy wymienionych prac przedstawiono wyniki badań i analizy dotyczące głównie lokowania odpadów radioaktywnych

w wyrobiskach podziemnych, natomiast pozostałe prace odnoszą się do doświadczeń chińskich w zakresie THMC oraz problematyki THMC w odniesieniu do pożarów w kopalniach węgla kamiennego. Zagadnienie procesów połączonych jest często przedmiotem badań i analiz w aspekcie pozyskiwania energii geotermalnej, ropy i gazu ziemnego, a także wspomnianych już wcześniej pożarów w kopalniach węgla kamiennego oraz podziemnego zgazowania węgla.

**2.2. Transfer ciepła w masywie skalnym**

W artykule skupiono się przede wszystkim na procesach termicznych, które w znacznym stopniu determinują przebieg pozostałych procesów, przez co ważna jest ich identyfikacja i analiza. Pośród procesów termicznych zachodzących w trakcie pracy georeaktora można wyróżnić:

- spalanie i przemieszczanie się frontu ogniowego,
- transfer ciepła,
- zmiany objętości skał, ich porowatości oraz właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych.

Spalanie i przemieszczanie się frontu ogniowego wpływa na kształt i prędkość pojawiania się pustek po zgazowanym węglu. Analiza transferu ciepła pozwala określić strefy górotworu, w których następuje zaburzenie pierwotnej równowagi termicznej, a co za tym idzie poprzez odpowiednio wysoką temperaturę, zmianę właściwości wytrzymałościowo-odkształceniowych skał.

W masywie skalnym występuje faza stała oraz płyny w postaci cieczy i gazów. W skali porowej mogą występować pewne różnice temperatury na granicy styku faz, jednak są one niewielkie i przy założeniu, że w jednej z faz nie występuje silne źródło ciepła lub brak w niej szybkich przepływów ciepła, uzasadnione jest założenie o lokalnej równowadze termicznej. Jest to tym bardziej dopuszczalne, że w ośrodku porowatym jakim są skały, przepływ płynów ma stosunkowo małą prędkość. Lokalna równowaga termiczna nie wyklucza występowania gradientów temperatury w nieco większej skali, np. w blokach masywu skalnego. W przypadku zjawisk naturalnych takich jak gejzery czy erupcje wulkaniczne lub w otoczeniu silnych źródeł ciepła pochodzenia antropogenicznego (georeaktory, pożary w kopalniach węgla kamiennego) szczególnie na styku skał oraz płynów założenie o lokalnej równowadze termicznej nie jest spełnione [2]. Jednak podczas analizy w większej skali, gdy przedmiotem rozważań jest przepływ ciepła w ośrodku skalnym, a nie na styku np. komory georeaktora i skał, można przyjąć, że lokalna równowaga termiczna jest zachowana. Jest to założenie, które pozwala na znaczne uproszczenie analizy dając możliwość wprowadzenia średniej przewodności cieplnej dla ośrodka, a nie dla poszczególnych jego faz.

Przepływ ciepła w masywie skalnym, będącym ośrodkiem porowatym, jest zjawiskiem trudnym do ujęcia w matematycznym opisie ze względu na dużą złożoność zagadnienia. Wyróżnić tu można wiele mechanizmów, których badaniem, już we wczesnych latach 70. XX w., zajmował się Bear [3], są to m.in. przepływ ciepła:

- w ciele stałym (rozumianym jako ośrodek ciągły) poprzez przewodnictwo,
- w płynie (rozumianym jako ośrodek ciągły) poprzez przewodnictwo,

- w płynie (rozumianym jako ośrodek ciągły) poprzez konwekcję,
- w płynach z wykorzystaniem mechanizmu dyspersji,
- z ciała stałego do płynu,
- pomiędzy ziarnami ciała stałego poprzez radiację, gdy płynem jest gaz [2].

Najbardziej istotnym mechanizmem transferu ciepła spośród wymienionych wyżej jest przewodnictwo cieplne. Badaniami nad przewodzeniem ciepła zajmował się Joseph Fourier, który już w roku 1878 opublikował pracę pt. *Analytical Theory of Heat* [7]. W swojej pracy Fourier przedstawił podstawowe równanie opisujące wielkość przepływającego ciepła dla stanu ustalonego w ośrodku jednorodnym izotropowym znane również jako prawo Fouriera

$$q_h = -K \frac{dT}{dn} \quad (2.1),$$

gdzie:

$qh$  – gęstość strumienia ciepła na kierunku  $n$ ,  
 $K$  – przewodność cieplna,  
 $T$  – temperatura.

Przewodność cieplna  $K$  charakteryzująca właściwości danego ośrodka, podobnie jak ciepło właściwe, bywa traktowana jako stała. Tymczasem wykazuje ona zmienność szczególnie w wysokich temperaturach, gdy oprócz przewodnictwa może wystąpić promieniowanie energii w postaci fali elektromagnetycznej (radiacja), co wpływa na zwiększenie jej wartości. Jednakże radiacja zaczyna odgrywać znaczącą rolę dopiero, gdy temperatura ośrodka przekracza 600 °C, w przeciwnym wypadku jej rola jest pomijalna [2].

Równanie opisujące przewodnictwo cieplne może być również skonstruowane poprzez zastosowanie prawa Fouriera, w celu określenia bilansu przepływu ciepła przez małą objętość kontrolną. W rezultacie otrzymuje się cząstkowe równanie różniczkowe drugiego rzędu opisujące przepływ ciepła przez powierzchnię w nieskończenie małej objętości zwane równaniem przewodnictwa cieplnego

$$\nabla \cdot (K \nabla T) + q_g = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2),$$

gdzie:

$g$  – reprezentuje ciepło wygenerowane wewnątrz objętości kontrolnej,  
 $\rho$  – gęstość,  
 $c$  – właściwa pojemność cieplna.

Jak już wspomniano, transfer ciepła w płynach może odbywać się również poprzez konwekcję, która w ośrodku skalnym jest znacznie utrudniona i nie zawsze rozwijają się ruchy konwekcyjne. Konwekcyjny transfer ciepła jest możliwy w pustkach (o odpowiedniej wielkości) wypełnionych płynem i polega na zmianie gęstości płynu pod wpływem dostarczanego ciepła i wyporze rozprężonego płynu. Konwekcja może zachodzić w sposób naturalny lub być wymuszona poprzez ciśnienie mechaniczne. W przypadku wymuszonego, konwekcyjny strumień ciepła jest wprost proporcjonalny do strumienia mechanicznego płynu i jest równy:  $q_m c_p T$ . Zatem zależność (2.2) przekształca się do następującej postaci

$$\nabla \cdot (K \nabla T) - \nabla \cdot (\rho c q_m T) + q_g = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3).$$

Transfer ciepła z wykorzystaniem radiacji odbywa się nieustannie we wszystkich ciałach poprzez emitowanie fal elektromagnetycznych, a co za tym idzie może zachodzić również w próżni. Wartość energii radiacji jest funkcją temperatury oraz rodzaju i wielkości powierzchni, z której jest emitowana. Energia ta może być absorbowana przez inne ciała, a wartość absorbowanej energii również zależy

od temperatury i powierzchni ciała absorbującego energię. Emitowana energia może zostać zaabsorbowana przez dane ciało, część fal elektromagnetycznych jest odbijana, a część przenika przez ciało bez zmiany jego temperatury (transmitancja). Jak już wspomniano, rola mechanizmu radiacji jest znaczna od temperatury ok. 600 °C, a taka występuje podczas procesu zgazowania węgla. Jednakże, ze względu na charakter ośrodka (masyw skalny), w porównaniu z przewodnictwem cieplnym jej udział jest pomijalny.

Istnieje również mechanizm transferu ciepła poprzez dyspersję, a zachodzi ona w płynach przepływających z różną prędkością poprzez kanaliki ośrodka porowatego. Różna prędkość płynów wynika ze zróżnicowania geometrii porów oraz tarcia pomiędzy przepływającym płynem a ciałem stałym. Różnice prędkości w mikroskali mogą powodować rozdzielanie się lub dyspersję płynu. Jednak w porównaniu do transferu ciepła poprzez przewodnictwo cieplne wpływ tego zjawiska w ośrodku skalnym jest pomijalny. Wynika to z niskiej prędkości i małej objętości przepływających płynów, a co za tym idzie przekazywanej w ten sposób niewielkiej energii.

#### 4. Zmiana właściwości fizykomechanicznych skał pod wpływem działania dużych temperatur

Przebieg oraz rodzaj zmian właściwości fizykomechanicznych, zachodzących w skałach pod wpływem wysokiej temperatury, zależy w dużym stopniu od składu mineralogicznego tychże. Bardzo ważnym czynnikiem jest rodzaj spoiwa, które zapewnia integralność materiału skalnego. W wyniku działania wysokiej temperatury obserwuje się różne zachowanie skał. W zależności od ich budowy wewnętrznej może dochodzić do: zmian w strukturze i teksturze, dezintegracji, zmian właściwości wytrzymałościowo-odkształceniowych, zmian parametrów termicznych. Opis szeroko prowadzonych badań zachowania się skał w wysokiej temperaturze można znaleźć w [12, 13].

W pracach [12, 13] przedstawiono wynik badań parametrów wytrzymałościowo-odkształceniowych oraz właściwości termicznych skał poddanych wyprężaniu w zakresie temperatur od 20 do 1200 °C. Badania wytrzymałościowe wykonywano po ogrzaniu skały do danej temperatury, a następnie wychładzano ją i poddawano testom na maszynie wytrzymałościowej. Przeprowadzone badania wykazały, że skałą najmniej odporną na działanie wysokich temperatur jest łupek ilasty, który ulegał dezintegracji, natomiast najbardziej odporne na ich działanie są piaskowce. Duży wpływ na zniszczenie próbek miała zawartość części organicznych (spalanie) oraz ich niejednorodność. Próbki, które składały się z warstw o różnym składzie mineralogicznym, ulegały zniszczeniu ze względu na różną rozszerzalność temperaturową poszczególnych warstw i powstające w ten sposób naprężenia termiczne. Doświadczenia wykazały znaczny spadek wartości modułu Younga we wszystkich próbkach, natomiast nie znaleziono korelacji pomiędzy działaniem wysokiej temperatury a wytrzymałością na ściskanie (część próbek wykazywała wzrost, a część jej spadek).

Badania przewodności cieplnej przedstawione w [12] wykazują, że podczas całego procesu ogrzewania do temperatury 1200 °C ulega ona zmianom ze względu na przemiany endotermiczne zachodzące w próbkach. Dla wszystkich próbek obserwowano najpierw spadek, a następnie wzrost przewodności cieplnej, różniła się tylko temperatura, w której następował ponowny wzrost. Wynika to z innej budowy mineralogicznej (przemiana minerałów w różnych temperaturach). Większość próbek dla końcowej temperatury (od 1000 °C do 1200 °C) wykazała wzrost przewodności cieplnej w stosunku do temperatury początkowej (30 °C).



## 5. Opis matematyczny modelu numerycznego stworzonego w programie FLAC 3D

W modelu numerycznym zastosowanym do analizy transferu ciepła w otoczeniu georeaktora bazowano jedynie na przewodnictwie cieplnym. Ośrodek potraktowano jako jednorodny, ciągły i izotropowy. Zmienne zawarte w analizie przewodnictwa ciepła (w programie FLAC 3D) to temperatura oraz trzy składowe strumienia ciepła. Są one zawarte w równaniu bilansu energii i prawach transportu wyprowadzonych z prawa Fouriera dla przewodnictwa cieplnego. Odpowiednikiem prawa Fouriera w bilansie energetycznym jest równanie różniczkowe przewodnictwa cieplnego, które może być rozwiązane dla podstawowych parametrów geometrycznych modelu i właściwości ośrodka skalnego przy zadanych warunkach początkowo-brzegowych. Efekty działania naprężeń termicznych oraz ciśnienia porowego (wywołanego przyrostem temperatury) uwzględniono poprzez dodanie termicznego odkształcenia objętościowego w mechanicznych prawach konstytutywnych oraz prawach konstytutywnych płynów. Równanie bilansu energetycznego przedstawia się następująco [9]

$$-q_{i,i} + q_v = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (3.1)$$

gdzie:

- $q_i$  – wektor strumienia ciepła,  $\frac{W}{m^2}$ ,
- $q_v$  – objętościowa intensywność źródła ciepła,  $\frac{W}{m^3}$ ,
- $\zeta$  – wartość ciepła gromadzonego w jednostce objętości,  $\frac{J}{m^3}$ .

Uogólniając zmiany temperatury, które mogą być spowodowane poprzez gromadzenie energii lub odkształcenia  $\epsilon$ , termiczny model konstytutywny uwzględniający te parametry przedstawia się następująco [9]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = M_{th} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \beta_{th} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right) \quad (3.2)$$

gdzie:

- $M_{th}$ ,  $\beta_{th}$  – stałe materiałowe,
- $T$  – temperatura.

Podczas obliczeń w programie FLAC 3D rozpatrywany jest tylko podstawowy przypadek równania (3.2), w którym

$\beta_{th} = 0$ , a  $M_{th} = \frac{1}{\rho C_v}$ , gdzie:

- $\rho$  – gęstość masy,  $\frac{kg}{m^3}$ ,
- $C_v$  – ciepło właściwe w stałej objętości,  $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ .

Takie uproszczenie jest możliwe przy założeniu, że wpływ zmian odkształceń na zmiany temperatury jest pomijalny.

Zmiana wielkości gromadzonego ciepła w jednostce objętości w czasie jest definiowana następująco

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.3)$$

Po wprowadzeniu zależności (3.3) do (3.1) równanie bilansu energetycznego przekształca się do postaci

$$-q_{i,i} + q_v = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.4)$$

Należy zauważyć, że prawie dla wszystkich ciał stałych oraz płynów, ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu i ciepło właściwe przy stałej objętości są praktycznie równe. Konsekwencją czego jest możliwość używania  $C_v$  oraz  $C_p$  zamiennie.

Podstawowe prawo definiujące relację pomiędzy wektorem strumienia ciepła oraz gradientem temperatury jest prawo

Fouriera. W warunkach ustalonych, w jednorodnym i izotropowym ciele stałym prawo konstytutywne przyjmuje postać

$$q_i = -kT_{,i} \quad (3.5)$$

gdzie:

- $k$  – przewodność cieplna  $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ .

Po wstawieniu (3.5) do (3.4) można wyprowadzić różniczkowe równanie przewodnictwa cieplnego.

Z punktu widzenia obliczeń numerycznych bardzo ważne są warunki początkowo-brzegowe. Jeśli chodzi o warunki początkowe, to odnoszą się one do określenia pola temperatur. Warunki brzegowe określane są poprzez podanie warunków temperaturowych lub składowej wektora strumienia ciepła normalnej do powierzchni zewnętrznej modelu. Program FLAC 3D przewiduje cztery typy warunków początkowo-brzegowych [9] poprzez podanie:

- temperatur,
- składowej wektora strumienia ciepła normalnej do powierzchni zewnętrznej modelu,
- konwekcyjnych warunków brzegowych,
- adiabatycznych warunków brzegowych.

Konwekcyjne warunki brzegowe mają następującą postać

$$q_n = h(T - T_e) \quad (3.6)$$

gdzie:

- $q_n$  – składowa strumienia ciepła normalna do powierzchni zewnętrznej modelu o zwrocie normalnej zewnętrznej,

$h$  – konwekcyjny współczynnik przewodzenia ciepła,  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ,

$T$  – temperatura powierzchni zewnętrznej modelu,  $^\circ C$ ,

$T_e$  – temperatura otaczającego płynu,  $^\circ C$ .

Standardowo stosowane są adiabatyczne warunki brzegowe.

Rozwiązywanie problemu naprężeń termicznych wymaga ponownego sformułowania przyrostowej relacji naprężeniowo-odkształceniowej, która powstaje poprzez odjęcie części termicznej od całkowitego przyrostu odkształcenia. Nieograniczona rozszerzalność temperaturowa w ciele izotropowym nie wpływa na odkształcenia postaciowe, dlatego przyrost odkształceń termicznych w warunkach nieograniczonej rozszerzalności przy przyroście temperatury  $\Delta T$  jest określony następująco [9]

$$\epsilon_{ij} = a_t \Delta T \delta_{ij} \quad (3.7)$$

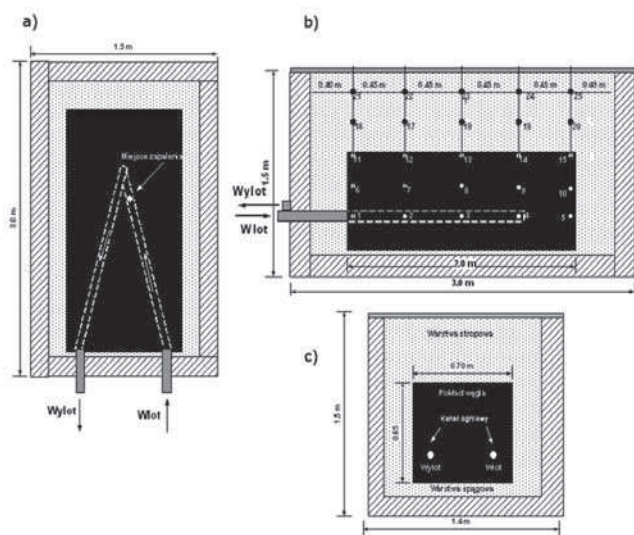
gdzie:

- $a_t$  – współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej,
- $\delta_{ij}$  – delta Kroneckera.

## 6. Założenia eksperymentów ex situ pracy georeaktora

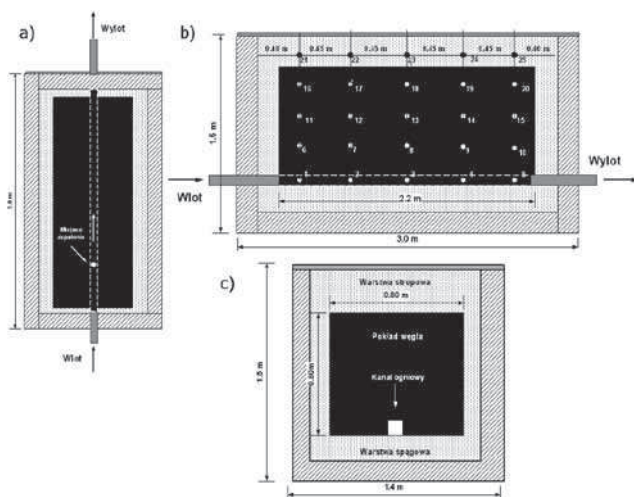
Dane, które wykorzystano do numerycznej analizy uzyskano z dwóch eksperymentów ex situ przeprowadzonych przez Główny Instytut Górnictwa [16, 22]. Eksperymenty te polegały na śledzeniu zmian temperatury czujników zabudowanych wokół pracującego georeaktora. Modele georeaktorów zlokalizowane zostały na powierzchni: jeden z nich posiadał kanał ogniowy w kształcie litery V (rys. 1), a kanał drugiego z nich był prosty (rys. 2).

W komorze z układem „V” analizowany fragment węgla charakteryzował się wymiarami  $2,0m \times 0,75m \times 0,65m$  natomiast cała skrzynia miała wymiary  $3,0m \times 1,5m \times 1,4m$  (rys. 1) [16, 22]. Temperatura monitorowana była przez 25 czujników z odczytem co 10 s. Podobne wymiary miał georeaktor testowany w układzie prostym (wymiarzy wkładki



Rys. 1. Konfiguracja kanałów ogniowych testowana w eksperymencie z kanałem w układzie V, a) przekrój poziomy, b) przekrój podłużny [16].

Fig. 1. Configuration of fire channels for the test of V-type channel: a) horizontal section, b) longitudinal section [16]



Rys. 2. Konfiguracja kanałów ogniowych testowana w eksperymencie z kanałem prostym, a) przekrój poziomy, b) przekrój podłużny, c) przekrój poprzeczny [22].

Fig. 2. Configuration of fire channels for the test with linear channel: a) horizontal section, b) longitudinal section, c) cross-section [22]

węglowej: 2,2m × 0,8m × 0,8m), gdzie również zabudowano 25 czujników do pomiaru temperatury w odstępach 10 sekundowych (rys. 2). Georeaktory składały się z obudowy betonowej, wypełnienia ze skał oraz węgla. Węgiel w układzie „V” pochodził z KWK „Bobrek” [16, 22], natomiast w układzie prostym z LW „Bogdanka” S.A. [22]. Czas trwania eksperymentu wynosił 72 h dla układu „V” oraz 29h dla układu prostego. Georeaktory celowo zostały zlokalizowane na powierzchni ponieważ ułatwia to w znacznym stopniu kontrolę przebiegu ich pracy, co w tej fazie rozwoju projektu było bardzo istotne.

W kopalni doświadczalnej „Barbara” przeprowadzono również eksperymenty z georeaktorem zlokalizowanym pod ziemią, których szerszy opis można znaleźć w [21].

## 7. Numeryczna analiza zjawisk termicznych zachodzących w otoczeniu georeaktora dla warunków doświadczeń *ex situ*

### 7.1. Budowa modelu numerycznego

Modele numeryczne zbudowano w programie FLAC 3D v5.0 na podstawie danych z eksperymentów *ex situ* przedstawionych w [16, 22]. Odwzorowano zarówno przebieg doświadczenia dla układu kanału ogniowego typu V oraz kanału w układzie prostym zgodnie z założeniami przedstawionymi w punkcie 6. Modele obu komór składały się z trzech ośrodków – obudowy betonowej, skał otaczających oraz węgla. Łączna liczba elementów, w poszczególnych modelach, wynosiła 50400. Po zdefiniowaniu geometrii zadano parametry przewodności cieplnej dla wyróżnionych ośrodków. Dla obudowy betonowej i dla skał otaczających przyjęto współczynnik przewodzenia ciepła 3,714 W/mK. Współczynnik przewodzenia ciepła dla węgla stanowił element kalibracji modelu (rys. 3 oraz 4). Jako warunki brzegowe przyjęto stałą temperaturę na brzegach modelu wynoszącą 20 °C. Taką samą temperaturę uwzględniono również w całym modelu dla czasu  $t = 0$  s (początek eksperymentu). Pozostałe warunki brzegowe polegały na zadawaniu w modelu temperatury odpowiadającej czujnikom, które w eksperymentach zlokalizowane były w pobliżu źródeł ciepła. W komorze o układzie prostym (rys. 2) były to czujniki od 1 do 5, natomiast w komorze o układzie „V” od 1 do 4 (rys. 1). Temperatura aktualizowana była w obu modelach co 180 s.

### 7.2. Analiza wyników przeprowadzonych symulacji

Rysunki 3 oraz 4 przedstawiają średnie różnice temperatur pomierzonych w punktach lokalizacji czujników w modelu numerycznym oraz w eksperymencie *ex situ*. Na rysunkach przedstawiono średnie różnice temperatury dla węgla (dla całego eksperymentu), średnie różnice temperatury dla całego modelu (dla całego eksperymentu) oraz średnie różnice temperatury dla całego modelu (na koniec eksperymentu, odpowiednio dla kanału „V”  $t=72$  h oraz dla kanału prostego  $t=29$  h). Z przedstawionych wyników można wywnioskować, że w czasie trwania całego eksperymentu, średnie temperatury w węglu uzyskują najlepszą zgodność dla współczynnika przewodzenia ciepła węgla wynoszącego 15 W/mK (dla kanału „V” – rysunek 4) oraz 6 W/mK (dla kanału prostego – rysunek 3), podczas gdy średnie temperatury dla wszystkich czujników uzyskują najlepszą zgodność dla współczynnika przewodzenia ciepła węgla wynoszącego 5 W/mK (dla kanału V – rysunek 4) oraz 4.9 W/mK (dla kanału prostego – rysunek 3).

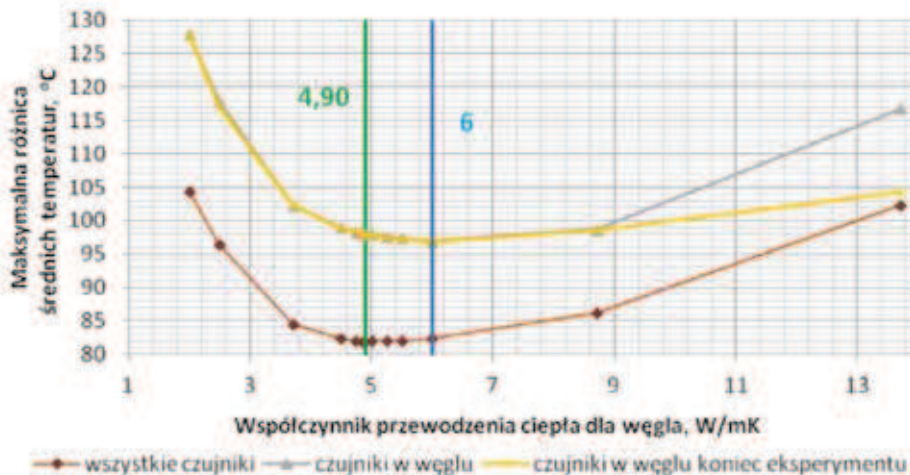
Różnice obserwowane pomiędzy modelami numerycznymi i pomiarami rzeczywistymi w znacznym stopniu uzależnione są od postępu frontu ogniowego, co w modelu nie zostało uwzględnione. W celu poprawienia wyników należałoby uwzględnić w modelu geometrię wypalanej komory (komplikacja modelu).

## 8. Analiza numeryczna dla hipotetycznego georeaktora z uwzględnieniem modyfikacji założeń modelowania

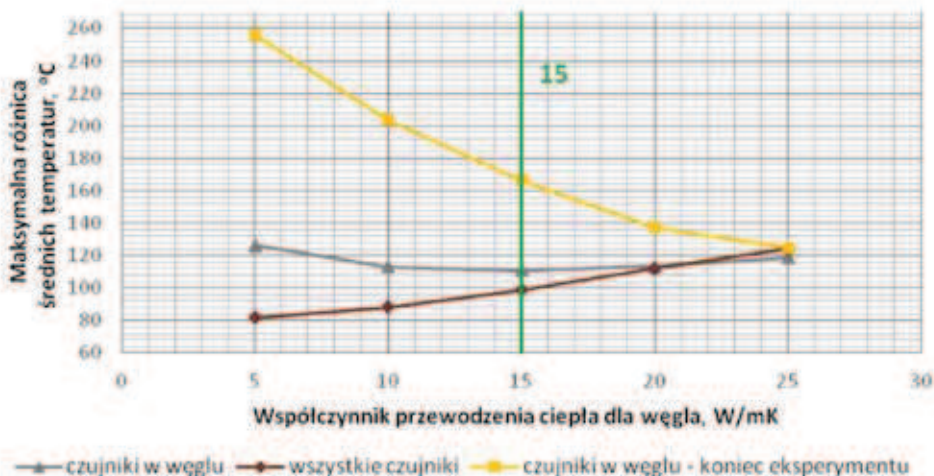
Po dokonaniu analizy wyników z modelowania georeaktorów opisywanych w punkcie 7, postanowiono wprowadzić do modelu geometrię wypalanej komory w układzie „V” oraz zmodyfikować nieco warunki początkowo-brzegowe.

Na podstawie danych z symulacji pracy georeaktora przedstawionych w [19, 23] odwzorowano geometrię wypalanej





Rys. 3. Wykres zbieżności modelu numerycznego z eksperymentem ex situ dla kanału w układzie prostym.  
 Fig. 3. Convergence of numerical model with ex-situ experiment for linear fire channel



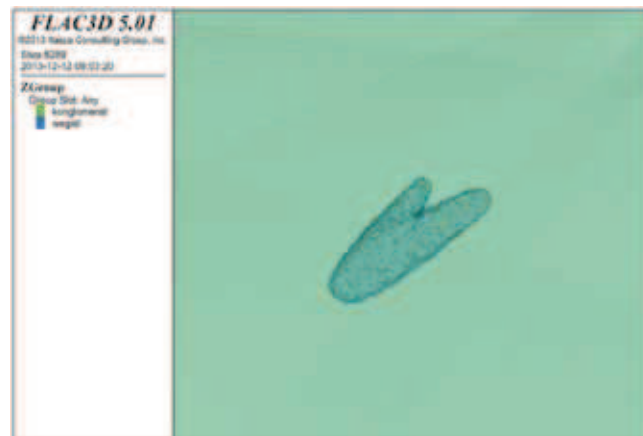
Rys. 4. Wykres zbieżności modelu numerycznego z eksperymentem ex situ dla kanału w układzie „V”  
 Fig. 4. Convergence of numerical model with ex-situ experiment for V-type fire channel

komory oraz pracę w przestrzennym stanie naprężenia. Do obliczeń przyjęto model o wymiarach zewnętrznych 40 m × 40 m × 10 m, w którym umieszczono georeaktor. Wymiary georeaktora wynosiły 1,65 m × 0,67 m × 0,32 m i są zgodne z założeniami przyjętymi w pracy [19, 23]. Geometrię modelu wraz z wypaloną komorą przedstawiono na rysunku 5. W obliczeniach przyjęto, że hipotetyczny georeaktor znajduje się na głębokości 400 m, natomiast współczynnik  $K_0$  wyrażający stosunek naprężeń poziomych do pionowych wynosi 0,5.

W tabelicy 1 zestawiono parametry masywu skalnego przyjęte w obliczeniach dla temperatury początkowej  $t=30$ . W tabelicy 2 przedstawiono uwzględnione zmienności parametrów termicznych dla piaskowców, natomiast w tabelicy 3 zmienne parametry mechaniczne. Współczynnik rozszerzalności termicznej przyjęto dla wszystkich skał jednakowy i równy  $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ , 1/K

Obliczenia przeprowadzono w następujących etapach: po wczytaniu geometrii modelu i wprowadzeniu warunków brzegowych w postaci zablokowanych przesuwów na odpowiednich ścianach bocznych modelu, założono pierwotny stan naprężenia. Następnie usunięto z modelu elementy odpowiadające kształtem geometrii georeaktora określonego w pracach [19, 23] i na granicy zadano odpowiednie temperatu-

ry. Następnie wykonano proces obliczeniowy dla 1, 2 i 5 dni od momentu zadania warunków brzegowych na granicy kawerny.



Rys. 5. Geometria modelu numerycznego hipotetycznego georeaktora opracowana na bazie danych z pracy [23]  
 Fig. 5. Geometry of numerical model of hypothetical georeactor using data from [23]

**Tablica 1. Mechaniczne właściwości skał przyjęte w obliczeniach (dla temperatury początkowej  $t=30$ )**

**Table 1. Mechanical properties of rocks assumed for calculations (for initial temperature  $t=30^\circ\text{C}$ )**

Materiał	Moduł Younga, $E$ , MPa	Współczynnik Poissona, $\nu$ [-]	Kąt tarcia wewnętrzznego, $\phi$ [ $^\circ$ ]	Kohezja, $c$ , MPa	Wytrzymałość na rozciąganie, $R_p$ , MPa
Węgiel	1000	0.30	32	0.6	0.6
Piaskowiec	9341	0.30	40	5.55	2.0

**Tablica 2. Parametry termiczne piaskowców w funkcji temperatury**

**Table 2. Thermal properties of sandstones in relation to the temperature**

Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]		30	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Piaskowce	Współczynnik przewodzenia ciepła, $C_p$ J/kgK	4.624	3.239	2.238	1.636	1.169	1.203	1.183	1.174	1.334	1.612	1.448	2.409	4.587
	Ciepłota pojemności właściwa, $\lambda$ , W/mK	1209	1147	1213	1345	1418	1918	2253	2437	2959	3781	3109	5186	10751

**Tablica 3. Parametry mechaniczne piaskowców w funkcji temperatury**

**Table 3. Mechanical properties of sandstones in relation to the temperature**

Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]	Piaskowce	
	Kohezja, $c$ , MPa	Moduł Younga, $E$ , MPa
30	5.55	9341
400	4.90	6905
600	-	2350
1000	8.07	849

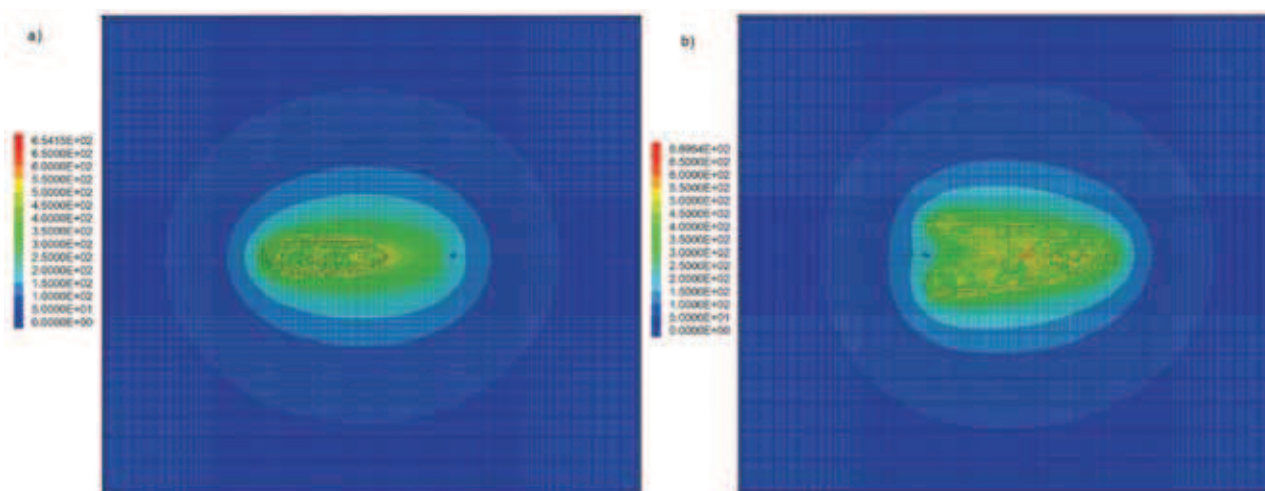
Na rysunkach od 6 do 11 przedstawiono wyniki przeprowadzonych analiz. Z map rozkładu temperatury zaprezentowanych na rysunku 6 dla stanu po 5 dniach (koniec eksperymentu) wynika, że strefa temperatur o wartości powyżej 300 jest niewielka i sięga zaledwie kilkadziesiąt centymetrów w głąb ośrodka.

Po analizie rysunków 7÷8 oraz rysunków 9 i 10 należy zauważyć, że największe wartości naprężeń występują pomiędzy ramionami kawerny. Koncentracja naprężeń w tym

obszarze wynika z geometrii przyjętego kanału. W pierwszej fazie eksperymentu, tj. dla czasu  $t=1\text{d}$  (rysunek 7) wartości naprężeń pionowych występujących pomiędzy ramionami kawerny wynosiły 53,2 MPa, co stanowi znaczny wzrost w stosunku do pierwotnych naprężeń pionowych przyjętych na poziomie 10 MPa. W dalszej części eksperymentu dla  $t=5\text{d}$  (rysunek 8) naprężenia te spadają na skutek uplastycznienia i działania temperatury do wartości około 45 MPa. Podobny trend obserwuje się dla naprężeń zredukowanych, gdzie naprężenia pierwotne wyniosły 5 MPa, po jednym dniu 37.4 MPa (rys. 9), a po 5 dniach spadają do wartości 32 MPa (rys. 10). Koncentracja naprężeń zredukowanych, podobnie jak dla pionowych, występuje pomiędzy ramionami kawerny.

Naprężenia pionowe na bokach kawerny wynoszą od 40 MPa na brzegu kawerny do 20 MPa w odległości około 1 m od brzegu kawerny. Ma to oczywisty związek z rozkładem temperatury. Podobnie wygląda sytuacja dla naprężeń zredukowanych, które na brzegach kawerny wynoszą około 25 MPa, a w odległości około 1 m od brzegów spadają do 6 MPa.

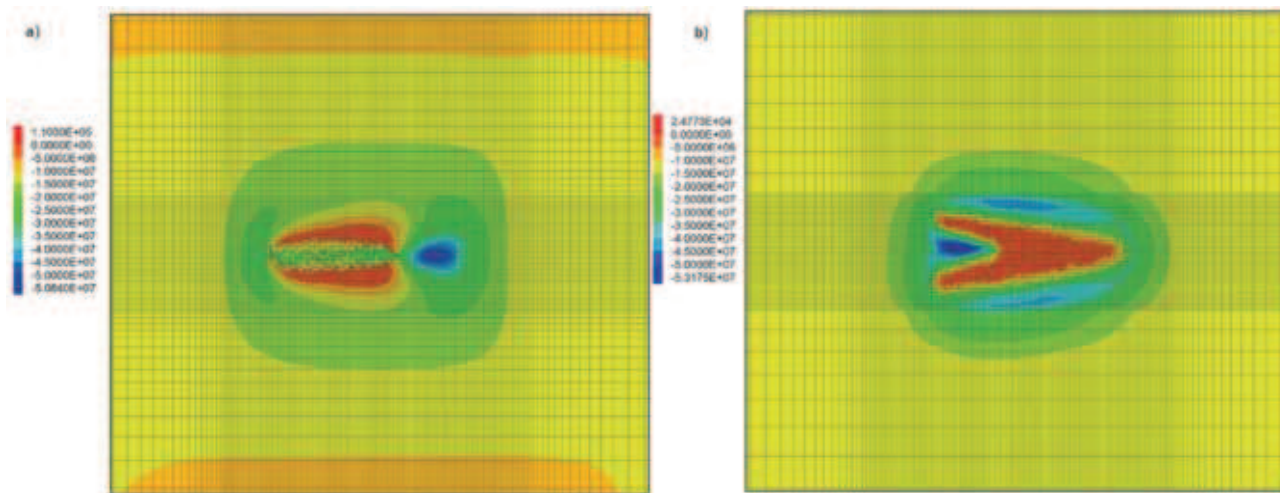
Na rysunku 11 łatwo zauważyć, że uplastycznieniu ulega jedynie najbliższe sąsiedztwo kawerny. Zasięg strefy uplastycznienia wynosi około 20 cm od krawędzi kawerny, a także uwzględnia obszar pomiędzy jej ramionami.



**Rys. 6. Rozkład temperatury po 5 dniach od przyjęcia warunków początkowo-brzegowych: a) przekrój pionowy; b) przekrój poziomy.**

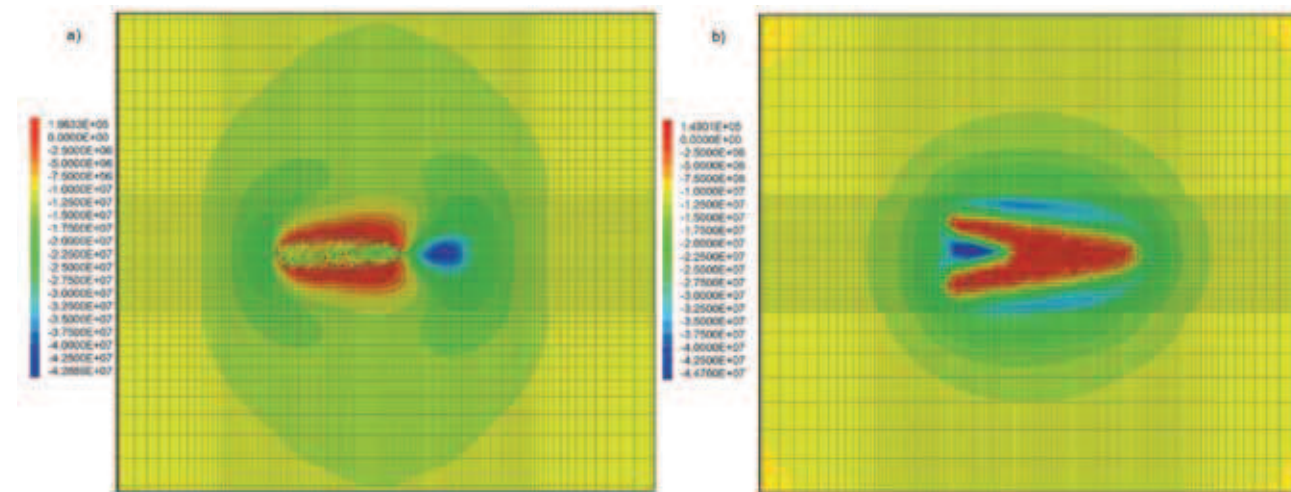
**Fig. 6. Distribution of temperature after 5 days from the assumption of boundary conditions a) vertical section, b) horizontal section**





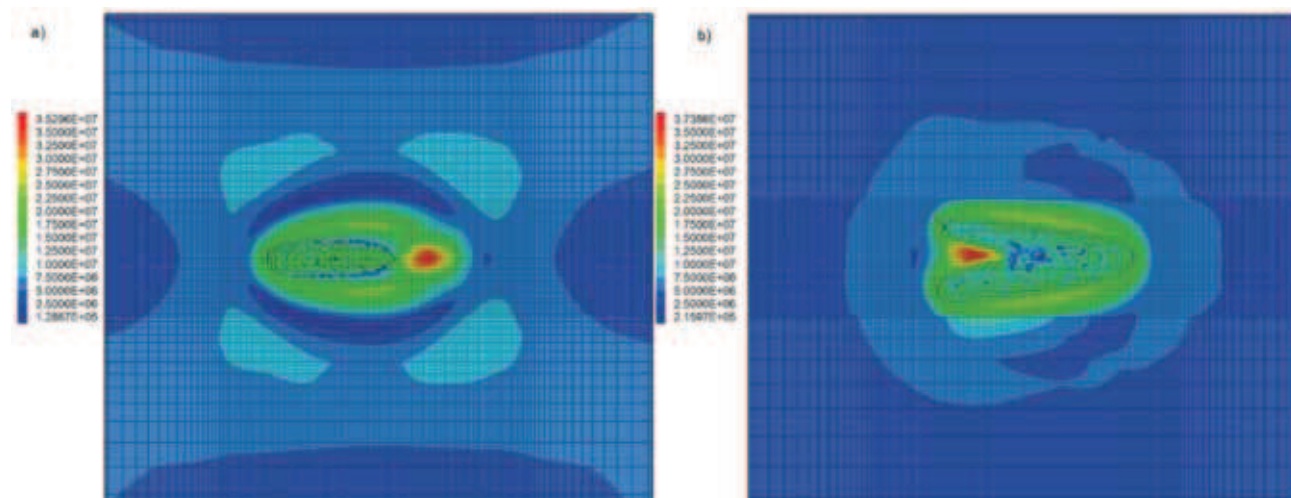
Rys. 7. Rozkład naprężeń pionowych po 1 dniu od przyjęcia warunków początkowo-brzegowych: a) przekrój pionowy; b) przekrój poziomy.

Fig. 7. Distribution of vertical stress after 1 day from the assumption of boundary conditions a) vertical section, b) horizontal section



Rys. 8. Rozkład naprężeń pionowych po 5 dniach od przyjęcia warunków początkowo-brzegowych: a) przekrój pionowy; b) przekrój poziomy.

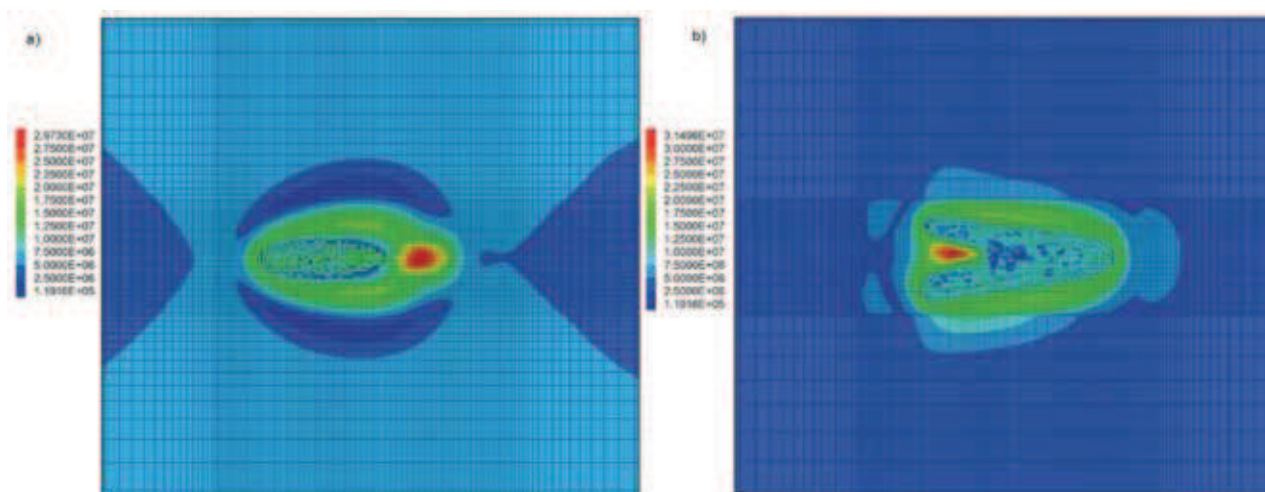
Fig. 8. Distribution of vertical stress after 5 days from the assumption of boundary conditions a) vertical section, b) horizontal section



Rys. 9. Rozkład naprężeń zredukowanych wg. hipotezy HMH po 1 dniu od przyjęcia warunków początkowo-brzegowych: a) przekrój pionowy; b) przekrój poziomy.

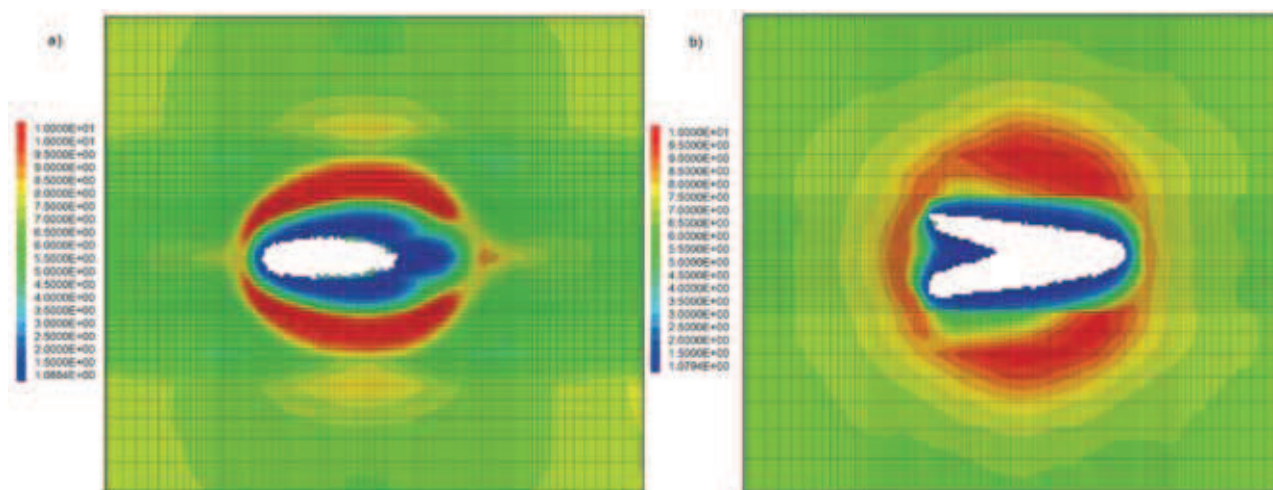
Fig. 9. Distribution of strength/stress ratio (HMH strength criterion) after 1 day from the assumption of boundary conditions: a) vertical section b) horizontal section





Rys. 10. Rozkład naprężeń zredukowanych wg. hipotezy HMH po 5 dniach od przyjęcia warunków początkowo-brzegowych: a) przekrój pionowy; b) przekrój poziomy.

Fig. 10. Distribution of strength/stress ratio (HMH strength criterion) after 5 days from the assumption of boundary conditions: a) vertical section, b) horizontal section



Rys. 11. Rozkład stopnia wyczerpania górotworu po 5 dniach od przyjęcia warunków początkowo-brzegowych: a) przekrój pionowy; b) przekrój poziomy.

Fig. 11. Distribution of the rock mass effort degree after 5 days from the assumption of boundary conditions: a) vertical section, b) horizontal section

## 9. Podsumowanie.

Podziemne zgazowanie węgla jest zagadnieniem szeroko badanym w kontekście możliwości wykorzystania pokładów węgla, których klasyczna eksploatacja jest ekonomicznie nieuzasadniona bądź technologicznie trudna. Proces zgazowania daje duże możliwości, ale również stawia wymagania dla inżynierów i naukowców pracujących nad tą metodą. Procesy zachodzące podczas pracy georeaktora należą do grupy procesów sprzężonych, których przebieg, a tym samym także modelowanie jest niezwykle skomplikowane. Symulacja komputerowa procesów zgazowania wymaga określenia dużej liczby parametrów modelu oraz ich zmienności w funkcji temperatury. Dotychczasowe badania *ex situ* wykazują, że kontrola procesu zgazowania jest ograniczona, a zatem prognozowanie pracy georeaktora jest utrudnione.

Do grupy najbardziej istotnych procesów towarzyszących podziemnemu zgazowaniu węgla należy zaliczyć procesy termiczne, wśród których wymienić można: spalanie i przemieszczanie się frontu ogniowego, zmiany strukturalne oraz wytrzymałościowo-odkształceniowe skał otaczających,

a także transfer ciepła w górotworze. Pośród procesów termicznych istotnym jest proces transferu ciepła w masywie skalnym otaczającym georeaktor. Mechanizm, który odgrywa dominującą rolę podczas przepływu ciepła w górotworze to przewodnictwo cieplne, dla którego podstawy opisu matematycznego stworzył Fourier.

Komputerowe modelowanie procesów termicznych w otoczeniu georeaktora wykonano z użyciem programu FLAC 3D v.5.0, który bazuje na metodzie różnic skończonych. W symulacji wykorzystano wyniki badań *ex situ* przeprowadzonych przez Główny Instytut Górnictwa [16, 22] dla georeaktorów z różnym układem kanałów ogniowych (układ prosty oraz „V”). Na podstawie pomiarów czujników temperatury odtworzono proces przepływu ciepła. Pierwsze dwie symulacje zakładały stałe parametry termiczne skał oraz nie uwzględniały zmian geometrii kanałów georeaktora. Wyniki, które otrzymano odzwierciedlają w pewnym stopniu jakościowy charakter rozkładu temperatur wokół georeaktora.

W trzeciej symulacji przeprowadzono analizę termiczno-mechaniczną pracy hipotetycznego georeaktora przy rzeczywistej geometrii kanału „V” oraz założeniu zmienności

parametrów termicznych i mechanicznych skał. Wyniki dały jakościowy obraz rozkładu temperatur, oraz naprężeń i stref wyłączenia górotworu.

Niestety, w symulacjach nie udało się w pełni odzwierciedlić wyników badań *ex situ*, co wynika ze złożoności procesów zachodzących podczas zgazowania, a także ograniczonej kontroli nad procesem zgazowania i „nieprzewidywalności” ośrodka skalnego. Główną przyczyną jest brak możliwości ujęcia w modelu (ograniczenia zastosowanych narzędzi) procesów chemicznych, tj. endotermicznych procesów przeobrażania się minerałów. Ponadto pominięto inne mechanizmy transferu ciepła w celu uproszczenia modelu.

Modelowanie procesów termicznych wymaga dalszych studiów, jednak już teraz daje możliwość uchwycenia jakościowych zmian zachodzących w ośrodku skalnym. Pozwala to na identyfikację zjawisk oraz hipotetycznych zagrożeń zachodzących podczas pracy georeaktora, czego przykładem może być duża koncentracja naprężeń pomiędzy ramionami kanału „V”. Uzyskane wyniki symulacji numerycznych wykonanych dla odwzorowania przebiegu doświadczeń *ex-situ* wskazują na duży potencjał metod numerycznych w zakresie prognozowania i oceny wpływu procesu pzw na otaczające geosrodowisko.

*Pracę sfinansowano ze środków badań prowadzonych w ramach Zadania Badawczego nr 3 pt.: „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” - obszar 3.2. Model symulacyjny georeaktora, które finansowane jest przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.*

## Literatura

- Ahlers, C. F., Finsterle, S., and Bodvarsson, G. S.: Characterization and prediction of subsurface pneumatic response at Yucca Mountain, Nevada. *J. Contam. Hydrol.* 1999, Nr 38, s. 47 ÷ 68.
- Baston D. P.: Analytical and Numerical Modelling of Thermal Conductive Heating in Fractured Rock. Kingston, Queen's University April 2008.
- Bear J.: Dynamics of Fluids in Porous Media. New York, Dover Publications. Inc. 1972.
- Bhutto A. W., Bazmi A. A., Zahedi G.: Underground Coal Gasification: From Fundamentals to Applications. *Progress in Energy Combustion Science* 2013, No. 39, s. 189 ÷ 214.
- Cala M.: Raport końcowy z badań i prac technicznych wykonanych w okresie 4.05.2010 – 30.06.2013. Część tematu badawczego nr 1.2.1: Wymagania górnicze i środowiskowe z modelowaniem procesów geogazodynamicznych. Zakres 3 – Opracowanie modeli symulacyjnych geogazotermicznych i obliczenia weryfikacyjne. Praca niepublikowana.
- Cala M., Stopkiewicz A., Kowalski M.: Symulacja procesów fizycznych towarzyszących podziemnemu zgazowaniu węgla na podstawie modelowania numerycznego. *Przeгляд Górniczy* luty 2013, Nr 2, s. 72÷79.
- Fourier J.: Analytical Theory of Heat. London, Cambridge Warehouse 1878.
- Imran M., Kumar D., Kumar N., Qayyum A., Saeed A.: Environmental Concerns of Underground Coal Gasification. *Renewable and Suitable Energy Reviews* 2014, No. 31, s. 600÷610.
- ITASCA FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions – Thermal Analysis, Minneapolis, Minesota USA, Itasca Consulting Group Inc. 2009.
- Kapusta K., Stańczyk K., Wiatowski M., Chečko J.: Environmental Aspects of a Field-Scale Underground Coal Gasification Trial in a Shallow Coal Seam at the Experimental Mine Barbara in Poland. *Fuel* 2013, No. 113, s. 196 ÷ 208.
- Lanru J., Xiating F.: Numerical modeling for coupled thermo-hydro-mechanical and chemical processes (THMC) of geological media - International and Chinese experiences. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2003, vol. 22 (10), s. 1704 ÷ 1715.
- Malkowski P.: Raport końcowy z badań i prac technicznych wykonanych w okresie 4.05.2010-31.12.2012. Część tematu badawczego nr 1.2.1: Wymagania górnicze i środowiskowe z modelowaniem procesów geogazodynamicznych. Zakres 1 – Badania właściwości geomechanicznych i termicznych skał. Praca niepublikowana.
- Malkowski P., Niedbalski Z., Hydzik-Wiśniewska J.: The Change of Structural and Thermal Properties of Rocks Exposed to High Temperatures in the Vicinity of Designed Geo-Reactor. *Archives of Mining Sciences* 2013, Vol. 58, No. 2, s. 465÷480.
- Prabu V., Jayanti S.: Heat Affected Zone Analysis of High Ash Coals During Ex Situ Experimental Simulation of Underground Coal Gasification. *Fuel* 2014, No. 123, s. 167÷174.
- Pudewills A.: Numerical Analysis of Long-Term Thermomechanical Behavior of Repository Structures. *Transaction, SMIRT* 2001, Paper 1055.
- Smoliński, A., Stańczyk, K., Kapusta, K., Howaniec, N.: 2012, Chemometric study of the ex situ underground coal gasification wastewater experimental data, *Water, Air, and Soil Pollution*, Volume 223, Issue 9, November 2012, Pages 5745÷5758.
- Tsang C.-F. (ed.): Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories, Academic Press 1987.
- Tsang C.-F., Stephansson O.: A Conceptual Introduction to Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes. in *Fractured Rocks, Stephansson O., Jing L. and Tsang C.-F. (Editors): Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes of Fractured Media. Developments in Geotechnical Engineering* 1996, vol. 79.
- Wachowicz J., Iwaszenko S., Janoszek T., Cempa-Balewicz M., 2013, Zastosowanie pakietu FLUENT do symulacji procesu podziemnego zgazowania węgla – koncepcja metody, *Przeгляд Górniczy*, vol. 69, nr 02, pp. 64÷71
- Weßling S.: The investigation of underground coal fires - towards a numerical approach for thermally, hydraulically, and chemically coupled processes. Inaugural Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften im Fachbereich Physik der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität 2007.
- Wiatowski M., Stańczyk K., Świądrowski J., Kapusta K., Cybulski K., Krause E., Grabowski J., Rogut J., Howaniec N., Smoliński A.: Semi-Technical Underground Coal Gasification (UCG) Using the Shaft Method in Experimental Mine “Barbara”, *Fuel* 2012, No. 99, s. 170÷179.
- Wyniki badań Cz.T.B. 3.1.1. pod kierunkiem Stańczyk K., GiG, realizowanych w ramach Zadania Badawczego nr 3 pt.: „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju”. Materiały niepublikowane.
- Wyniki badań Cz.T.B. 3.2.2. pod kierunkiem Wachowicz J., GiG, realizowanych w ramach Zadania Badawczego nr 3 pt.: „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju”. Materiały niepublikowane.
- Yang D., Sarhosis V., Sheng Y.: Thermal-Mechanical Modelling Around the Cavities of Underground Coal Gasification, *Journal of the Energy Institute* 2014, No. XXX, s. 1÷9.

