

Kazimierz CHMURA

Stefan TWARDUCH

Politechnika Śląska

WŁAŚCIWOŚCI GEOTERMOMECHANICZNE SKAŁ WOKÓŁ WYROBISK KORYTARZOWYCH
KOPALNI HALEMBA-GŁĘBOKA

Streszczenie. W pracy przedstawiono właściwości termomechaniczne skał wokół trzech wybranych wyrobisk na poziomie 1030 m kopalni Halemba-Głęboka, uwzględniające charakter litologiczny górotworu. W wyrobiskach tych przeprowadzono badania rozkładu temperatury na głębokość 30 m od ociosów oryginalną sondą termiczną. Na podstawie otrzymanego rozkładu temperatury wokół wyrobisk wyprowadzono związki funkcyjne między mocą energii ziemskiego strumienia ciepła a właściwościami termomechanicznymi skał w górotworze naruszonym robotami górniczymi.

Wyprowadzono oryginalne wzory dotyczące ilości całkowitej energii cieplnej, wyteżenia termicznego, ciśnienia i naprężenia termicznego, zasięgu strefy wychładzania oraz kompaktacji termicznej. Określono powierzchniowe i liniowe zagęszczenie ciepła w ziemskim strumieniu na poziomie 1030 m.

Wyniki tych badań przedstawione zostały w tablicach i na wykresach. Prezentowana metoda, dotycząca wykorzystania energii ziemskiego strumienia do określania właściwości termomechanicznych skał jest metodą oryginalną i nowatorską, powinna być wykorzystana w działalności górniczej w zakresie mechaniki górotworu.

WSTĘP

W związku z przechodzeniem z wydobywaniem węgla kamiennego na większe głębokości zachodzi konieczność szczegółowego poznania właściwości mechanicznych górotworu. W tym celu autorzy podjęli problem wykorzystania energii ziemskiego strumienia ciepła do oceny właściwości mechanicznych górotworu, tj. znalezienie związku funkcyjnego między intensywnością przepływu ciepła a właściwościami mechanicznymi górotworu. Należy tutaj wspomnieć, że prawa przepływu ciepła w masywach skalnych są te same jak w termodynamice technicznej. Stanowią one jednak szczególną dziedzinę wiedzy, która w ostatnich latach rozwinęła się w miarę poznawania zjawisk geotermicznych skorupy ziemskiej. Jak świadczą ostatnie badania, przepływ energii ziemskiego strumienia ciepła jest szerzej wykorzystany w problemach geotermodynamiki łożysk ropy naftowej i gazu ziemnego oraz geotermii dla potrzeb gospodarczych.

W górnictwie podziemnym przepływ ciepła z górotworu do powietrza kopalnianego jest rozpatrywany w aspekcie wentylacji i klimatyzacji wyrobisk

górnictwych. Natomiast do oceny właściwości mechanicznych górotworu wokół wyrobisk nie był do tej pory szerzej uwzględniany. Wiadomo, że z przemieszczaniem energii cieplnej w górotworze związane są zjawiska termosprężyste, szczególnie w górotworze naruszonym. Musimy mieć tutaj na uwadze, że przepływ energii ziemskiego strumienia ciepła inaczej będzie się przedstawiał w masywach skalnych nienaruszonych, a inaczej naruszonych robotami górnictwymi.

1. OGÓLNE DANE O PRZEPLYWIE CIEPŁA W GÓROTWORZE

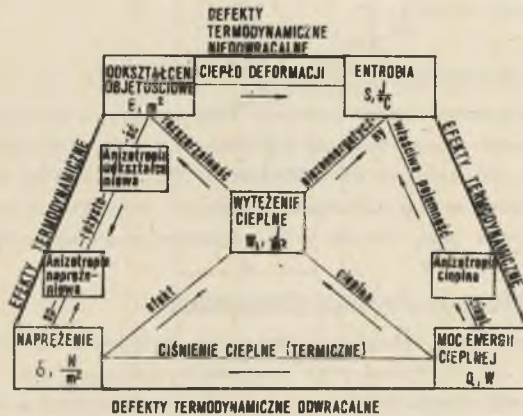
Jednym ze sposobów przenoszenia ciepła w masywach skalnych jest przewodzenie. Polega ono na bezpośrednim przekazywaniu energii ziemskiego strumienia ciepła drobinom substancji mineralnej o niższym poziomie energetycznym (temperatury) przez stykające się z nimi drobinami tej samej substancji mineralnej lub innej posiadającej wyższy poziom energetyczny (temperaturę).

Przewodzenie zachodzi w masywach skalnych we wszystkich stanach skupienia materii substancjonalnej. W płynach i gazach (woda, ropa naftowa, gaz ziemny) przewodzeniu mogą towarzyszyć wzajemne przemieszczanie drobin cieczy lub gazu. Przenoszenie ciepła, jakie wówczas występuje, nazywamy konwekcją naturalną. Na przykład minerały w skale o różnych poziomach energetycznych (temperatury) mogą wzajemnie przekazywać sobie energię cieplną również wtedy, gdy się nie stykają. Dzieje się to za pośrednictwem fal elektromagnetycznych. Ten sposób przekazywania ciepła nazywamy promieniowaniem, które ostatnio nabrało dużego znaczenia w badaniach naszego globu ziemskiego za pośrednictwem satelitów (geologia satelitarna), szczególnie w lokalizacji różnego rodzaju kopaliny.

W masywach skalnych zazwyczaj zachodzą złożone przypadki przepływu ciepła, polegające na równoczesnym występowaniu wszystkich trzech sposobów przenoszenia ciepła.

Intensywność procesu przepływu ciepła w masywach skalnych zależy od różnicy poziomów energetycznych (temperatury) skał będących w kontakcie cieplnym. Poziomy energetyczne będą różne w różnych punktach masywu skalnego ze względu na zmienność litologiczno-strukturalną. W miarę upływu czasu trwania procesu wymiany, różnice poziomów energetycznych (temperatur) zmniejszają się i układ zdąża do stanu równowagi cieplnej (energetycznej), tj. do całkowitego wyrównywania się. Ma to miejsce w masywach skalnych nienaruszonych robotami górnictwymi. Jeżeli natomiast w rozpatrywanym masywie wykonane zostaną wyrobiska górnictwe, to górotwór będzie dążył do nowego stanu nie będącego stanem równowagi, ale charakteryzował będzie się niezmiennością temperatur w czasie. Stan taki nazywamy stanem ustalonym, a przepływ energii ziemskiego strumienia w obrębie wyrobisk, jaki wówczas zachodzi, nazywamy ustalonym przepływem ciepła.

Proces wymiany ciepła między górotworem a powietrzem kopalnianym dąży do stanu równowagi, który określony jest nieustalonym stanem przepływu ciepła w górotworze. W czasie tego procesu poziomy energetyczne (temperatury) w poszczególnych punktach górotworu (przy zmiennym przewietrzaniu) zmieniają się w czasie i w związku z tym zmieniają się też zjawiska termodynamiczne zachodzące wokół wyrobisk.



Rys. 1. Schemat współzależności między współczynnikami cieplnymi a geotermodynamicznymi w masach skalnych

Fig. 1. Diagram showing the interdependence of thermal and geothermodynamic coefficients in the orogen

Pojawiają się tu defekty termodynamiczne odwracalne i nieodwracalne. W związku z tym mamy do czynienia z pojęciem geotermomechaniki, które odnosi się do zjawisk mechanicznych w masach skalnych górotworu, związanych z emanacją (przepływem) energii ziemskiego strumienia ciepła, a zatem właściwości geotermomechaniczne skał są jednym z elementów mechaniki górotworu. Szczególnie procesy geotermosprężyste zachodzące w masach skalnych stanowią problem dość istotny w określaniu stanu termodynamicznego górotworu. Na rys. 1 przedstawiono schematycznie współzależności między energią cieplną a właściwościami termomechanicznymi.

2. ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Badając właściwości geotermomechaniczne górotworu należy w pierwszej kolejności określić rozkład ziemskiego strumienia ciepła wokół wyrobisk. Szczególnie przy ustalaniu prognoz naprężeń skał w górotworze nienaruszonym i naruszonym robotami górniczymi.

Dotychczasowe prace podają, że istnieje wiele rozwiązań koncepcyjnych w dziedzinie wykorzystania energii ziemskiego strumienia ciepła w zagadnieniach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych kopalń. Natomiast brak jest w mechanice górotworu rozwiązań geotermodynamicznych.

Na podstawie danych właściwości cieplnych obszaru górniczego kop. Halemba wykonano mapy rozkładu ziemskiego strumienia ciepła dla trzech poziomów głębokościowych (mapy i katalogi - w posiadaniu kopalni Halemba).

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań geotermomechanicznych górotworu na poziomie 1030 m.

2.1. Zakres badań geotermomechanicznych

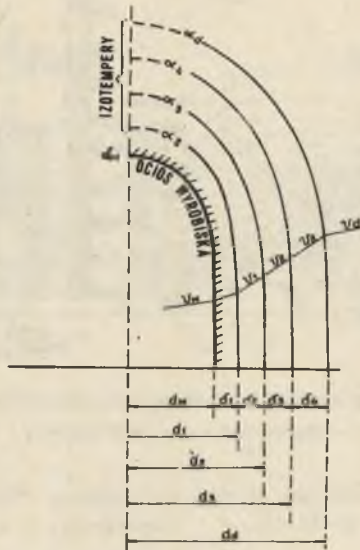
Na podstawie posiadanych map rozkładu temperatury i katalogów właściwości cieplnych górotworu nienaruszonego dokonano badań cieplnych w górotworze naruszonym robotami górniczymi na głębokości 1030 m. Badano wokół wyrobisk: temperaturę, całkowitą energię cieplną, ziemski strumień ciepła, wyężenie (udarność) termiczne i jego zasięg oraz naprężenia geotermiczne.

2.2. Sposób dokonywania pomiarów temperatury

Pomiary rozpoczęto w przekopie równoległym zachodnim wykonanym w piaskowcu. W wyrobisku tym wykonano pięć otworów badawczych. Na rys. 2 przedstawiono schematyczny przekrój fragmentu ociosu wyrobiska z teoretycznym rozkładem izotemper. Natomiast rzeczywisty rozkład temperatury wokół tego wyrobiska przedstawiono na rys. 3. Jak wynika z tego rysunku i tablicy 1, przebieg izotemper jest nierównomierny. W lewym ociosie (otw. 4, 5) występuje zagęszczenie izotemper. Wskazuje to na większą akumulację energii cieplnej niż w prawym ociosie (otw. 1, 2, 3), gdzie zauważa się spadek temperatury w wyniku istnienia w pobliżu punktu pomiarowego ciekłu wodnego. Temperatura w otworach 3, 5, wykonanych w kierunku stropu pod kątem 30°, wzrasta do 41°C. Tłumaczyć można ten wzrost temperatury tym, że w stropie występuje pokład węgla (pokład 504) o grubości 4,0 m powodując, że pokład ten jest ekranem termicznym dla ziemskiego strumienia ciepła. Stąd następuje akumulacja energii cieplnej bezpośrednio pod pokładem.

Analogicznie przeprowadzono pomiary temperatury w następnym wyrobisku (przecinka) wykonanym w węglu, iłowcu i piaskowcu. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 4. Jak wynika z tego rysunku i tablicy 3, otwory badawcze 2, 4 wykonane były w pokładzie węgla, otwory 1, 3 pod kątem 30° do płaszczyzny poziomej i przechodziły przez pokład węgla, warstwę iłowca z mułowcem, osiągając wyżej zalegające ławice piaskowca. Wzięto więc pod uwagę uwarstwienie i zmiany litologiczne górotworu niezbędne do dalszej analizy zjawisk geotermodynamicznych. Następnego pomiaru dokonano w chodniku podścianowym na wybiegu czynnej ściany wydobywczej.

Rozkład temperatury wokół tego wyrobiska podano na rys. 5.

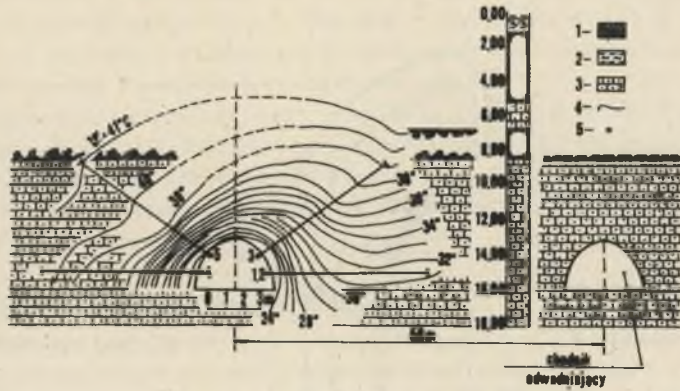


Rys. 2. Schematyczny przekrój fragmentu ociosu wyrobiska, z teoretycznym rozkładem izotemper

ψ_w - temperatura na ociosie wyrobiska, $\psi_1-\psi_3$ - temperatura w głąb górotworu, ψ_d - temperatura ustabilizowana, d_w - odległość od środka wyrobiska do ociosu, d_{1-3} - odległości mierzone od środka wyrobiska do izotemper, $\delta_1-\delta_4$ - odległości między izotemperami, α_w - współczynnik wnikania ciepła na granicy ociosu, $\alpha_2-\alpha_4$ - współczynniki wnikania ciepła na granicy poziomów energetycznych, α_3 - współczynnik wnikania ciepła na granicy ustabilizowanej temperatury

Fig. 2. Diagrammatic cross-section of a side of work with the theoretical isotherm distribution

ψ_w - temperature in the side of work, $\psi_1-\psi_3$ - temperature in the interior of the orogen, ψ_d - stabilized temperature, d_w - distance between the centre part of the heading and the side of work, d_{1-3} - measured distances between the centre part of the heading and the isotherms, δ_{1-4} - intervals between the isotherms, α_w - surface film conductance at the boundary of the side of work, $\alpha_2-\alpha_4$ - surface film conductances at the boundaries of the energy levels, α_d - surface film conduction at the boundary of stabilized temperature

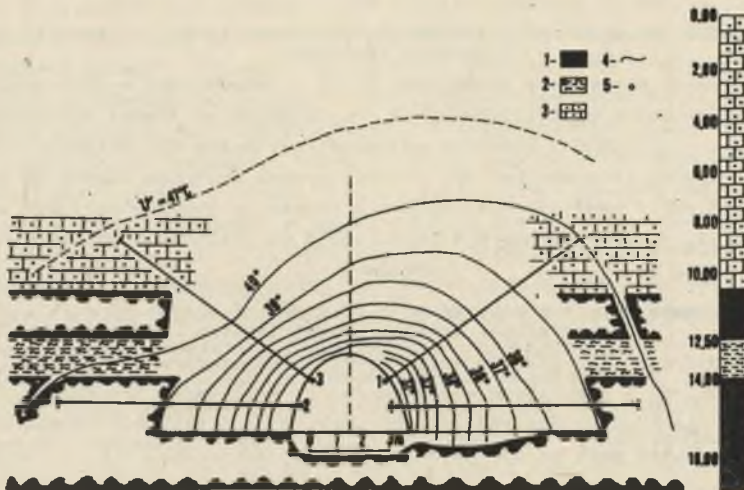


Rys. 3. Rozkład izotemper wokół wyrobiska (przekop)

1 - węgiel, 2 - piaskowiec, 3 - mułowiec, 4 - izotempery, 5 - otwory badawcze

Fig. 3. Isotherm distribution around the heading (cross-heading)

1 - coal, 2 - sandstone, 3 - mudstone, 4 - isotherms, 5 - prospect holes

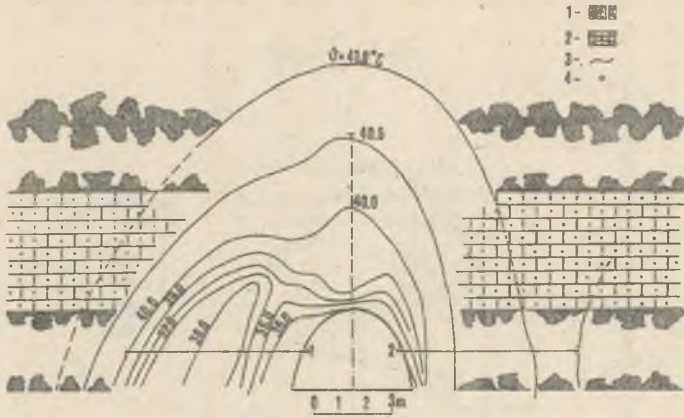


Rys. 4. Rozkład izotemper wokół wyrobiska (przecinka)

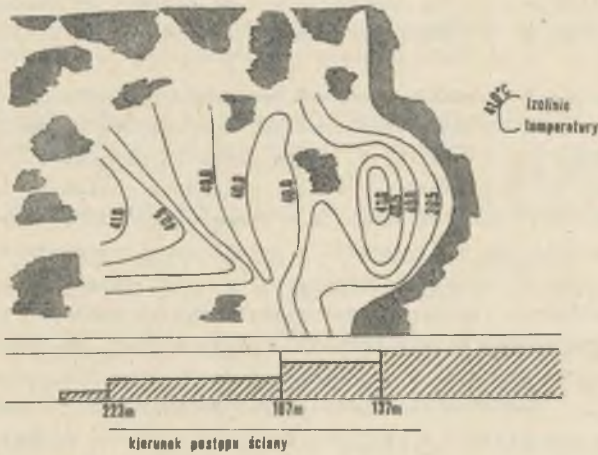
1 - węgiel, 2 - mułowiec z iłowcem, 3 - piaskowiec, 4 - izotempery, 5 - otwory badawcze

Fig. 4. Isotherm distribution around the heading (break-through)

1 - coal, 2 - mudstone with silt, 3 - sandstone, 4 - isotherms, 5 - prospect holes

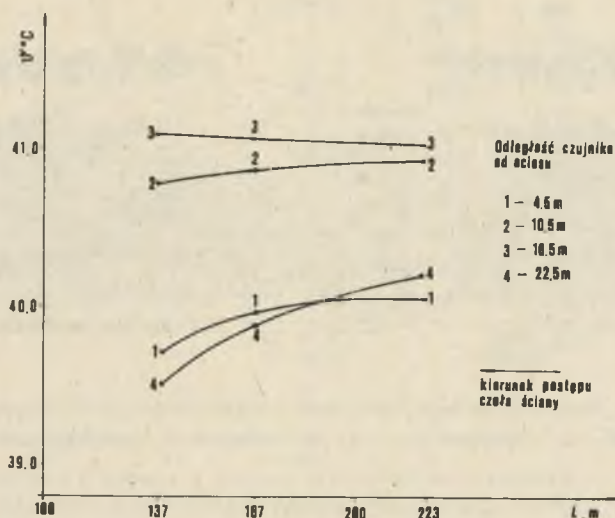


Rys. 5. Rozkład izotemper wokół chodnika podścianowego
 1 - węgiel, 2 - piaskowiec, 3 - izotemperry, 4 - punkty pomiarowe
 Fig. 5. Isotherm distribution around a longwall heading
 1 - coal, 2 - sandstone, isotherms, 4 - measuring points



Rys. 6. Rozkład izotemper w caliźnie węglowej z postępem ściany
 1 - izotemperry

Fig. 6. Isotherm distribution in unmined coal in the progressing longwall
 1 - isotherms



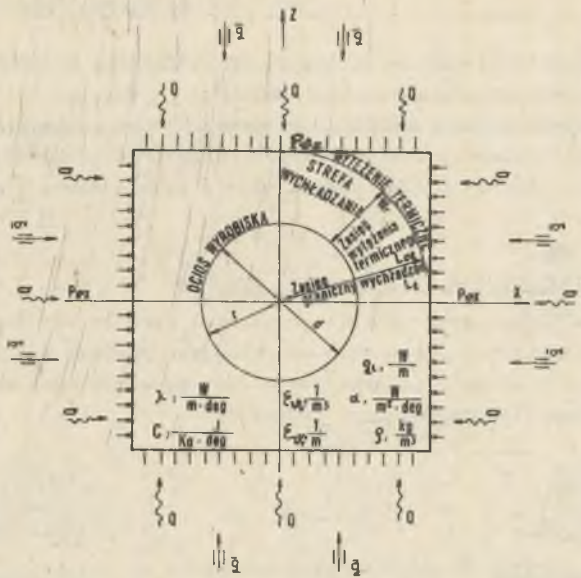
Rys. 7. Kształtowanie się temperatury w zależności od postępu ściany
 Fig. 7. Changes of temperature in the course of the wall advance

Na rys. 6 i 7 przedstawiono rozkład temperatury w caliznie węglowej wraz z postępowaniem ściany. Dane dotyczące rozkładu temperatury w omawianym chodniku zostały przedstawione w tablicy 5. Temperatura na głębokości do 22,5 m w obydwu ociosach wynosiła około 40°C. Jej rozkład w pokładzie węglowym omawianego odcinka daje lokalną anomalię o temperaturze 30°. Przypuszczać należy, że pojawienie się tej anomalii o zwiększonej temperaturze może być wynikiem powstawania ciepła egzogenicznego wskutek zwiększenia otwartej powierzchni w pokładzie (spękania, szczeliny). Wyniki pomiarów temperatur uwzględniających postępowanie ściany pozwalają przypuszczać, że istnieje związek między zmiennością temperatury a postępowaniem ściany, choć nie można w tej chwili definitywnie i jednoznacznie potwierdzić związku między postępowaniem ściany a rozkładem temperatury w caliznie węglowej pokładu. Niemniej jednak, jak wynika z rysunku 6 i 7, związek taki istnieje.

3. WŁAŚCIWOŚCI TERMOSPĘŻYSTE SKAŁ WOKÓŁ WYROBISKA KORYTARZOWEGO

Z chwilą wykonania wyrobisk zostaje naruszona pierwotna równowaga geotermodynamiczna masywu skalnego górotworu, w wyniku której naprężenia geotermiczne w obrębie wyrobiska osiągają inne wartości (zwykle większe) w stosunku do naprężeń geotermicznych panujących w górotworze nienaruszonym.

Naprężenia geotermiczne inaczej kształtują się w strefie jednorodnej pod względem litologicznym masywu skalnego, a inaczej w strefie zmiennej i jeszcze inaczej w strefie o wzmożonej dyslokacji.



Rys. 8. Schemat wyrobiska kołowego w układzie płaskim

P_{gz}, P_{gx} - ciśnienie geotermiczne, Q - energia cieplna, \bar{q} - powierzchniowy współczynnik zagęszczenia ciepła w ziemskim strumieniu, λ - współczynnik przewodzenia ciepła skał, c - właściwa pojemność cieplna skał, q_L - liniowy współczynnik zagęszczenia ciepła w ziemskim strumieniu, α - współczynnik wnikania ciepła, ρ - gęstość przestrzenna skał, $\epsilon_{\bar{v}}$ - objętościowa rozszerzalność termiczna skał, $\epsilon_{\bar{v}L}$ - liniowa rozszerzalność termiczna skał

Fig. 8. Diagram of a flat circular excavation

P_{gz}, P_{gx} - geothermal pressure, Q - thermal energy, \bar{q} - superficial coefficient of heat condensation in the earth flux, λ - thermal conductivity of the orogen, c - specific heat capacity of the orogen, q_L - linear coefficient of heat condensation in the earth flux, α - surface film conductance, ρ - spatial density of the orogen, $\epsilon_{\bar{v}}$ - volumetric thermal expansion of the orogen, $\epsilon_{\bar{v}L}$ - linear thermal expansion of the orogen

Głównym celem przy określeniu naprężeń geotermicznych w górotworze naruszonym jest ustalenie wielkości energii cieplnej przepływającej wokół czynnego wyrobiska. W zależności od charakteru przewietrzania (prędkość powietrza, wilgotność, temperatura itp.) wyrobiska, poziom energetyczny zmienia się, a stąd i stan termodynamiczny górotworu ulega zmianom. W związku z tym określono całkowitą ilość energii i jej emanację, zagęszczenie ciepła w ziemskim strumieniu, współczynnik wnikania ciepła, liniowy współczynnik za-

gęszczenia ciepła w strumieniu górotworu do wyrobiska, wyłączenie geotermiczne skał i jego początkową granicę zasięgu.

Na rys. 8 przedstawiono schematyczny przekrój wyrobiska kołowego, na którym pokazano kierunek przepływu ciepła, ciśnienia termicznego, zagęszczenia ciepła w strumieniu oraz zasięg strefy wychładzania i wyłączenia termicznego.

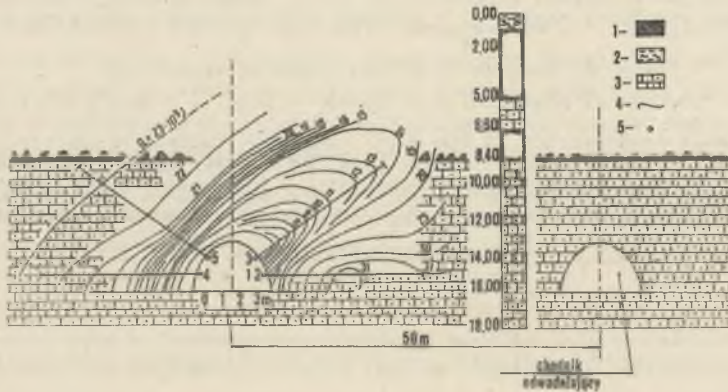
3.1. Całkowita energia cieplna wokół wyrobisk

W górotworze naruszonym robotami górniczymi zmienia się kierunek przepływu energii cieplnej w porównaniu do przepływu energii w górotworze nie naruszonym. Zwykle energia ta skierowana jest do wyrobiska. W określaniu wielkości tej energii wprowadzono zależność:

$$Q = A \cdot L_{OT} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta\psi, J \quad (1)$$

gdzie:

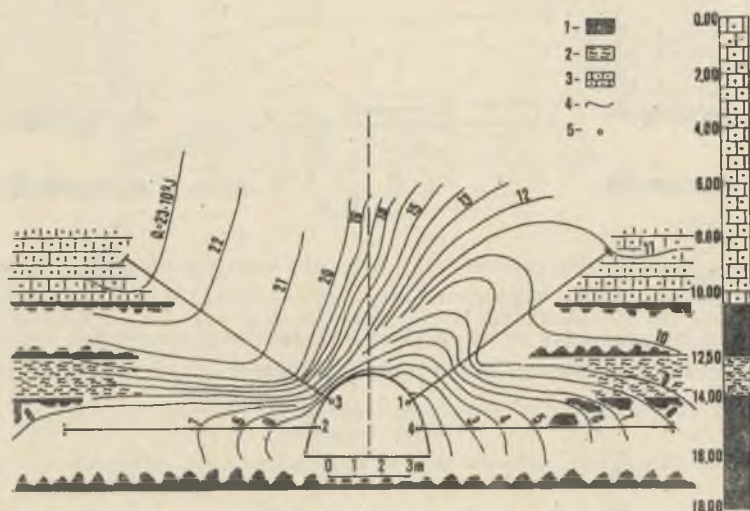
- A - pole powierzchni poprzecznego przekroju wyrobiska, m^2 ,
- L_{OT} - odległość od ośrodku wyrobiska do granicy wychładzania, czyli do zasięgu wyłączenia termicznego, m,
- ρ - gęstość przestrzenna skał w górotworze, kg/m^3 ,
- c - właściwa pojemność cieplna skał, $J/kg \text{ } ^\circ C$,
- $\Delta\psi$ - różnica temperatur między ośrodkiem a temperaturą ustabilizowaną $^\circ C$.



Rys. 9. Rozkład izolinii energii cieplnej wokół wyrobiska (przekop)
1 - węgiel, 2 - piaskowiec, 3 - iłowiec, 4 - izolinie energii, 5 - otwory badawcze

Fig. 9. Distribution of thermal energy isolines around the cross-heading
1 - coal, 2 - sandstone, 3 - silt, 4 - energy isolines, 5 - prospect holes

Ustalona ilość energii cieplnej wokół wyrobisk zmienia się zarówno w ławicy piaskowca, iłowca, jak i w węglu. Na rysunkach 9, 10, 11 przedstawiono rozkład izolacji energii cieplnej ziemskiego strumienia ciepła wokół omawianych wyrobisk.

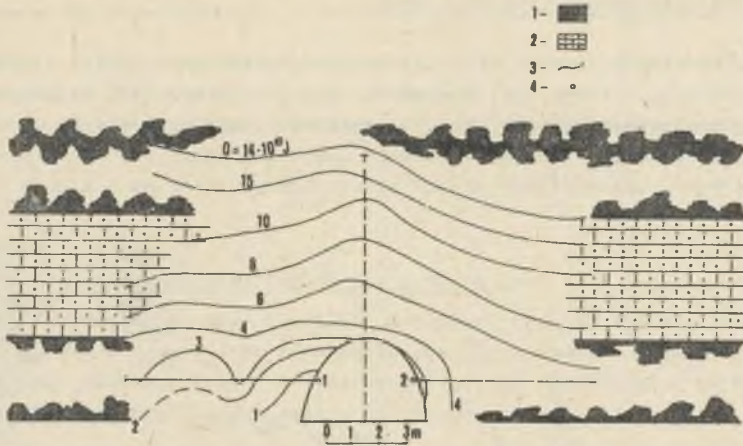


Rys. 10. Rozkład izolacji energii cieplnej wokół wyrobiska (przecinka) 1 - węgiel, 2 - mułowiec z iłowcem, 3 - piaskowiec, 4 - izolacje energii, 5 - otwory badawcze

Fig. 10. Distribution of thermal energy isolines around the break-through 1 - coal, 2 - mudstone with silt, 3 - sandstone, 4 - energy isolines, 5 - prospect holes

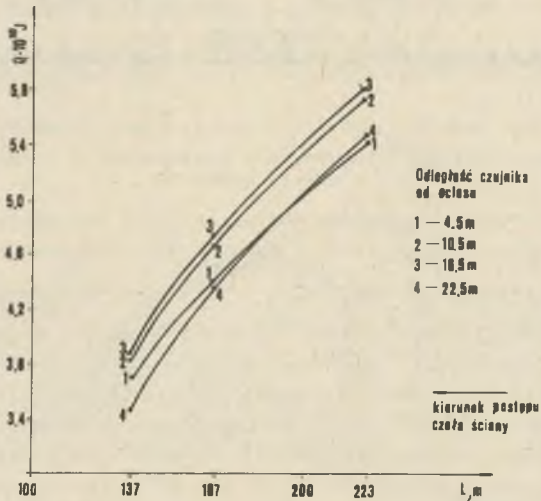
Wokół wyrobiska pierwszego (rys. 9) energia cieplna ziemskiego strumienia tworzy wyraźną anomalię w postaci mocno wydłużonej soczewki o osi nachylonej około 30° do płaszczyzny poziomej. Wzrost energii występuje wzdłuż otworu badawczego 5, gdzie na 30 m od lewego ociosu osiąga 23×10^9 J. Druga anomalia wzrostu energii cieplnej występuje w prawym ociosie wzdłuż otworu 1 i 2, gdzie w odległości około 15 m od ociosu wzrost tej energii jest uwarunkowany kompaktacją skał, przewodnością oraz zawodnieniem górotworu, jak też warunkami przewietrzania.

W drugim wyrobisku rozkład izolacji energii cieplnej kształtuje się nieco odmiennie. Maksymalny jej wzrost notuje się w lewym ociosie wyrobiska (otwór 3), gdzie wartość tej energii osiąga na 30 m od ociosu 23×10^9 J, podczas gdy w prawym ociosie (otwór 4) waha się od $1-11 \times 10^9$ J. Najmniejszą energię zauważa się w pokładzie węgla, gdzie rozkład izolacji jest dość stabilny. Natomiast w mułowcu i iłowcu energia zmienia się nieraz na

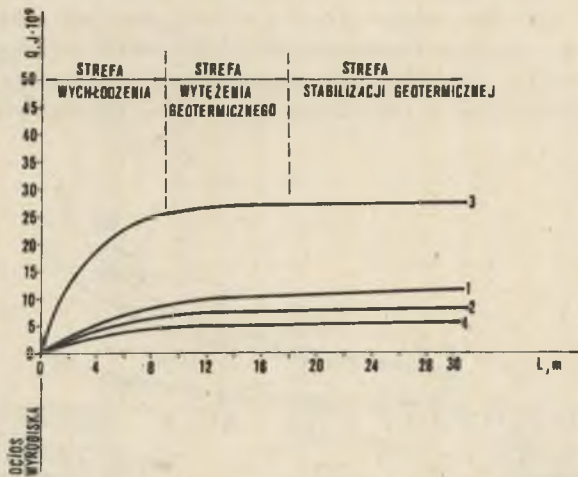


Rys. 11. Rozkład izolacji energii cieplnej wokół chodnika podścianowego
1 - węgiel, 2 - piaskowiec, 3 - izolacje energii, 4 - otwory badawcze

Fig. 11. Distribution of thermal energy isolines around the longwall
1 - coal, 2 - sandstone, 3 - energy isolines, 4 - prospect holes



Rys. 12. Zmianność energii cieplnej w caliznie węglowej od postępu ściany
Fig. 12. Changes of the thermal energy in unmined coal with the advance of the longwall



Rys. 13. Kształtowanie się energii cieplnej w zależności od odległości od ociosu wyrobiska

1, 2, 3, 4 - energia w poszczególnych otworach badawczych (przecinka)

Fig. 13. Changes of the thermal energy depending on the distance from the side of work

1, 2, 3, 4 - energy in the respective prospect holes (in the break-through)

bardzo krótkich odcinkach. W trzecim wyrobisku (rys. 11) rozkład energii w poprzecznym przekroju chodnika podścianowego wykazuje na ogół równomierny przebieg izolinii. Jej wartość osiąga $5,48 \times 10^{10}$ J.

Na rys. 12 przedstawiono zmienność energii cieplnej w caliznie węglowej pokładu w zależności od postępu ściany, a na rys. 13 przedstawiono kształtowanie się energii cieplnej w zależności od odległości od ociosu wyrobiska. Największa zmienność tej energii zaznacza się w strefie wychładzania dochodzącej do 12 m od ociosu. Natomiast w strefie wyłężenia termicznego zmienność ta jest znacznie ograniczona. Zasięg tej strefy dochodzi do 20 m.

3.2. Zagęszczenie ciepła w ziemskim strumieniu wokół wyrobisk korytarzowych

Powierzchniowy współczynnik zagęszczenia ciepła obliczono wg wzoru:

$$\bar{q} = \frac{\lambda \Delta \psi}{\delta}, \quad \frac{W}{m^2} \quad (2)$$

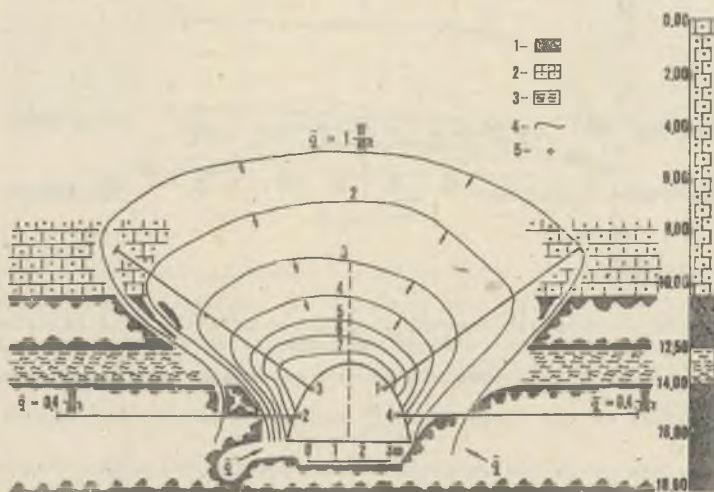
gdzie:

λ - współczynnik przewodzenia ciepła skał, $W/m^{\circ}C$.

$\Delta \psi$ - różnica poziomów energetycznych, $^{\circ}C$,

δ - grubość skały w górotworze ograniczonej poziomami energetycznymi m.

Powyższy wzór do obliczania zagęszczenia ciepła wokół wyrobiska jest wzorem ogólnym do określenia wartości tego współczynnika, przy czym za grubość kompleksów (δ) przyjęto przedział między poziomem energetycznym o wyższej wartości a poziomem energetycznym o niższej wartości. Na rys. 14 przedstawiono rozkład powierzchniowego współczynnika zagęszczenia ciepła w ziemskim strumieniu wokół drugiego omawianego wyrobiska, a na rys. 15 zależność tego współczynnika względem odległości od ociosu w tym wyrobisku.



Rys. 14. Rozkład powierzchniowego współczynnika zagęszczenia ciepła w ziemskim strumieniu wokół wyrobiska (przecinka)

1 - węgiel, 2 - piaskowiec, 3 - iłowiec z mułowcem, 4 - izoliny powierzchniowego współczynnika zagęszczenia ciepła, 5 - otwory badawcze

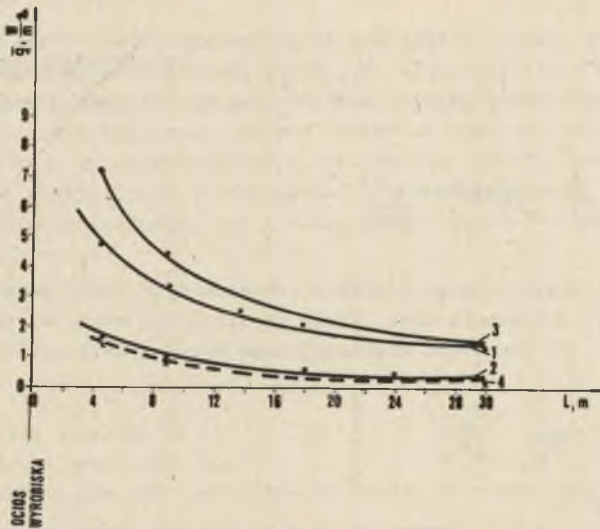
Fig. 14. Distribution of the superficial coefficient of heat condensation in the earth flux around the breakthrough

1 - coal, 2 - sandstone, 3 - silt with mudstone, 4 - isolines of the superficial coefficient of heat condensation, 5 - prospect holes

Jak wynika z rysunku 14, izoliny tego współczynnika układają się dość równomiernie, przy czym wartości liczbowe są najwyższe w pobliżu ociosu. W pozostałych wyrobiskach (pierwszym i trzecim) przebieg izoliny tego współczynnika kształtuje się podobnie. Dane liczbowe tego współczynnika dla omawianych wyrobisk podano w tablicach 1, 3 i 5.

W obliczeniach właściwości termomechanicznych skał, oprócz powierzchniowego współczynnika zagęszczenia ciepła, uwzględniono liniowe zagęszczenie ciepła.

Proces przepływu energii cieplnej z górotworu do wyrobiska jest uwarunkowany liniowym współczynnikiem zagęszczenia ciepła w strumieniu skierowanym do wyrobiska. Przy określeniu tego współczynnika przyjęto, że ciepło



Rys. 15. Kształtowanie się powierzchniowego współczynnika zagęszczenia ciepła w zależności od odległości od ociosu

1, 2, 3, 4 - powierzchniowy współczynnik zagęszczenia ciepła w poszczególnych otworach badawczych

Fig. 15. Changes of the superficial coefficient of heat condensation depending on the distance from the side of work

1, 2, 3, 4 - superficial coefficient of heat condensation in the respective prospect holes

emanuje z górotworu do wyrobiska korytarzowego liniowo i prostopadle do powierzchni otwartej, wzdłuż której przepływa powietrze.

W tym zakresie posłużono się zależnością:

$$q_L = \frac{\pi(\phi_d - \phi_w)}{\frac{1}{\alpha_d d_d} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d^{\alpha+1}}{d_d} + \frac{1}{\alpha_w \cdot d_w}}, \quad \frac{W}{m} \tag{3}$$

gdzie:

- q_L - liniowy współczynnik zagęszczenia ciepła w strumieniu, W/m,
- ϕ_d - temperatura w obszarze stabilizacji termicznej, °C,
- ϕ_w - temperatura na ociosie wyrobiska, °C,
- α_w - współczynnik wnikania ciepła na ociosie wyrobiska W/m² °C,
- α_d - współczynnik wnikania ciepła w obszarze stabilizacji W/m² °C,
- λ_i - współczynnik przewodzenia ciepła skał, W/m °C,
- d - promień wyrobiska, m,

d_w - odległość od środka wyrobiska do obszaru stabilizacji temperatur, m.

W procesie wymiany ciepła między górotworem a powietrzem uwzględniono współczynnik wnikania ciepła (α), który określa stan termodynamiczny układu górotwór-powietrze. W naszych obliczeniach wartość tego współczynnika ma postać:

$$\alpha = 0,135 \cdot \Delta\psi^{1/3}, \quad \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (4)$$

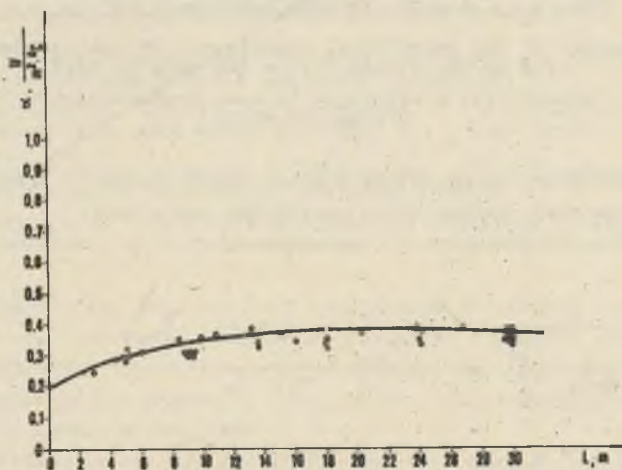
gdzie: 0,135 odnosi się do iloczynu kryterialnych liczb bezwymiarowych Prandtla (Pr) i Grashofa (Gr), który to iloczyn w naszych rozważaniach wynosi 2×10^7 , co odpowiada wielkości tego współczynnika;

lub

$$\alpha = \frac{\dot{q}}{\sqrt{d} - \psi_w}, \quad \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (5)$$

gdzie:

\dot{q}_α - współczynnik zagęszczenia ciepła w procesie wnikania energii cieplnej z górotworu do powietrza, W/m^2 .



Rys. 16. Zależność współczynnika wnikania ciepła z odległością od ociosu wyrobiska

Fig. 16. Dependence of the surface film conductance on the distance from the side of work

Zależność tego współczynnika względem odległości od ociosu przedstawiono na rys. 16, a dane liczbowe tego współczynnika dla omawianych wyrobisk przedstawiono w tablicach 1, 3 i 5.

3.3. Ciśnienie geotermiczne

Ciśnienie geotermiczne nie było do tej pory szerzej uwzględniane w mechanice górotworu. Wykorzystywano przede wszystkim ciśnienie geostatyczne. Analiza zjawisk geotermicznych wskazuje, że omawiany rodzaj ciśnienia w górotworze odgrywa zasadniczą rolę w procesie geotermosprężystym. Podobnie jak w górotworze nienaruszonym, tak i tutaj można wyznaczyć ciśnienie geotermiczne z zależności:

$$P_{\psi} = \frac{Q}{d} \cdot \epsilon_{\psi_{ob}} \cdot H, \quad \text{Pa} \quad (6)$$

gdzie:

- Q - energia cieplna, J,
- d - średnica wyrobiska, m,
- $\epsilon_{\psi_{ob}}$ - termiczny współczynnik rozszerzalności objętościowej skał, $1/m^3$.

Wyliczone wartości ciśnienia omawianych wyrobisk ujęto w tablicach 2, 4 i 6.

3.4. Wyświetlenie termiczne skał w górotworze - jego zasięg

Wyświetlenie termiczne lub udarność termiczna (W_T) jest to właściwość określająca stan termodynamiczny górotworu przy określonym poziomie energetycznym i termosprężystym. Właściwość tę wyznaczono wg wzoru:

$$W_T = \psi_{max} \cdot r^2 \cdot \rho \cdot c \cdot \epsilon_{\psi_L}, \quad \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \quad (7)$$

gdzie:

- ψ_{max} - temperatura maksymalna górotworu ustalona po stabilizacji, °C,
- r - promień wyrobiska, m,
- c - właściwa pojemność cieplna skał w górotworze, J/kg 1°C,
- ϵ_{ψ_L} - termiczny współczynnik rozszerzalności liniowej skał, $1/m$.

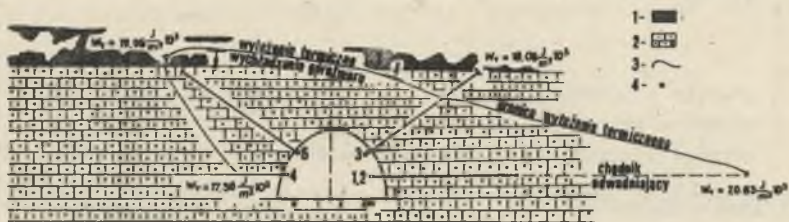
Zasięg granicy strefy wychładzania ze strefą wyświetlenia geotermicznego zmienia się w zależności od stopnia przewietrzania wyrobisk i ich zawodnienia. Ustalona wielkość liniowa występowania granicy obu stref przy dość stabilnych warunkach przewietrzania jest w każdym punkcie górotworu różna. Określa się ją z zależności:

$$L_{OT} = \frac{q_L}{(\alpha_d - \alpha_w)(\psi_d - \psi_w)}, \quad \text{m} \quad (8)$$

gdzie:

- q_L - liniowy współczynnik zagęszczenia ciepła w ziemskim strumieniu górotworu, W/m,
- α_d - współczynnik wnikania ciepła z górotworu do powietrza w głębi górotworu przy maksymalnej temperaturze ustabilizowanej, W/m² °C,
- α_w - współczynnik wnikania ciepła z górotworu do powietrza na ociosie wyrobiska W/m² °C,
- ψ_d - maksymalna temperatura ustabilizowana w głębi górotworu, °C,
- ψ_w - temperatura na powierzchni ociosu wyrobiska, °C.

Wyliczone wielkości tego wyłężenia, jak i jego zasięg wokół wyrobisk przedstawiono na rys. 17 i 18 oraz w tablicach 2, 4 i 6.



Rys. 17. Zasięg strefy wychładzania z granicą wyłężenia termicznego wokół wyrobiska (przekop)

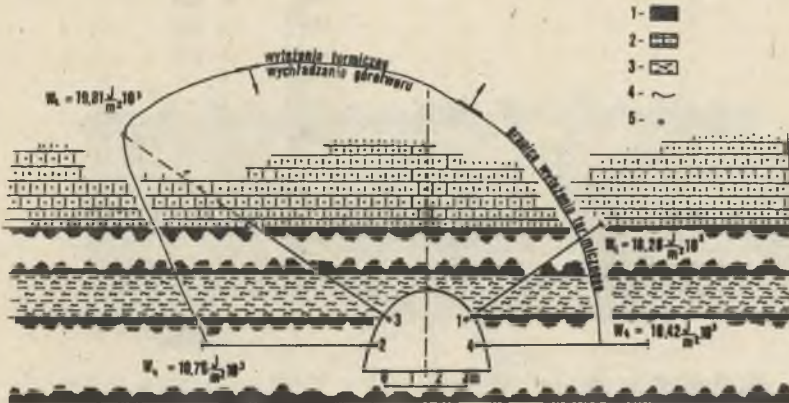
1 - węgiel, 2 - piaskowiec, 3 - granica wyłężenia, 4 - otwory badawcze
Fig. 17. Range of the chilling zone with a thermal effort limit around the cross-heading

1 - coal, 2 - sandstone, 3 - thermal effort limit, 4 - prospect holes

3.5. Naprężenia geotermiczne

Po wykonaniu wyrobisk górniczych naprężenia geotermiczne w górotworze ulegają zmianie w porównaniu ze stanem nienaruszonym górotworu, ponieważ zostaje naruszona równowaga termodynamiczna i ulega zachwianiu stabilny dotąd przepływ ciepła. Jest to związane z przewietrzaniem wyrobisk strumieniem powietrza, którego temperatura jest niższa od temperatury górotworu. W związku z tym następuje naturalny proces przepływu energii cieplnej z górotworu do wyrobiska i zachodzi tak zwane wychładzanie górotworu w otoczeniu wyrobiska. Proces ten zachodzi tym szybciej, im większa jest różnica temperatury między górotworem a wyrobiskiem i większa zdolność skał do przewodzenia ciepła. Z upływem czasu zachodzi stan równowagi termodynamicznej. Wartość tego naprężenia została określona w zależności:

$$\sigma_{\psi} = p_{\psi} \frac{\alpha \cdot L_{OT}}{\lambda} + \frac{W_{T_1}}{L_{T_1}} + \dots + \frac{W_{T_n}}{L_{T_n}}, \quad \text{Pa} \quad (9)$$



Rys. 18. Zasięg strefy wychładzania z granicą wyżeżenia termicznego wokół wyrobiska (przecinka)

1 - węgiel, 2 - piaskowiec, 3 - mułowiec z iłowcem, 4 - granica wyżeżenia, 5 - otwory badawcze

Fig. 18. Range of the chilling zone with a thermal effort limit around the break-through

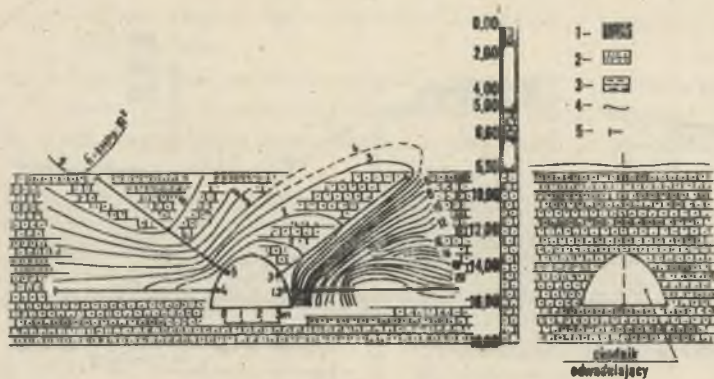
1 - coal, 2 - sandstone, 3 - mudstone with silt, 4 - thermal effort limit, 5 - prospect holes

gdzie:

- P_g - ciśnienie geotermiczne, Pa,
- α - współczynnik wnikania ciepła z górotworu do powietrza w wyrobisku, $W/m^2 \cdot ^\circ C$,
- L_{OT} - odległość od ociosu do granicy strefy wychładzania i wyżeżenia termicznego, m,
- L_T - odległość od środka wyrobiska do granicy strefy wychładzania.

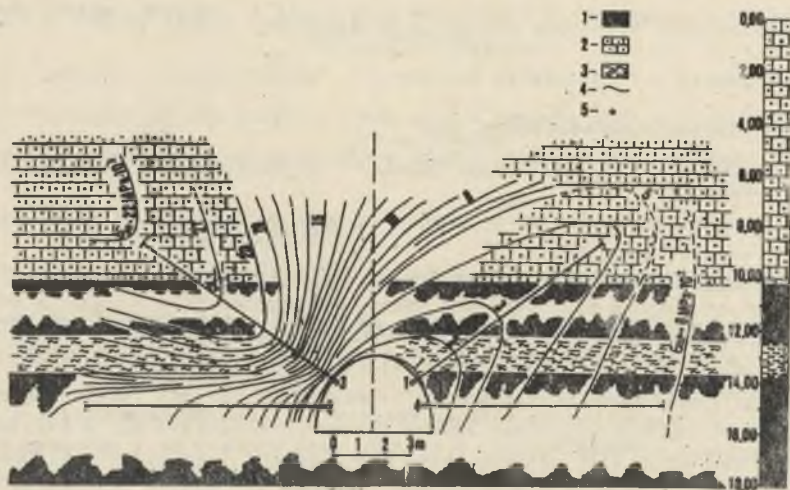
Wyliczone wielkości tego naprężenia zostały przedstawione w tablicach 2, 4 i 6, a rozkład tych naprężeń wokół wyrobisk przedstawiony został na rys. 19 i 20, 21.

Na rys. 22 przedstawiono poziomy rozkład naprężeń geotermicznych w całości węglowej czynnej ściany. Z rysunku tego wynika, że z postępem ściany pojawiają się anomalie naprężeń geotermicznych, układające się mniej więcej równoległe do kierunku postępu ściany. Zmienność tych naprężeń z postępem ściany wyraźniej uwidocznił na rys. 23. Ogólnie biorąc, spadek naprężeń geotermicznych jest ewidentny w strefie wychładzania, co zostało przedstawione na rys. 24.



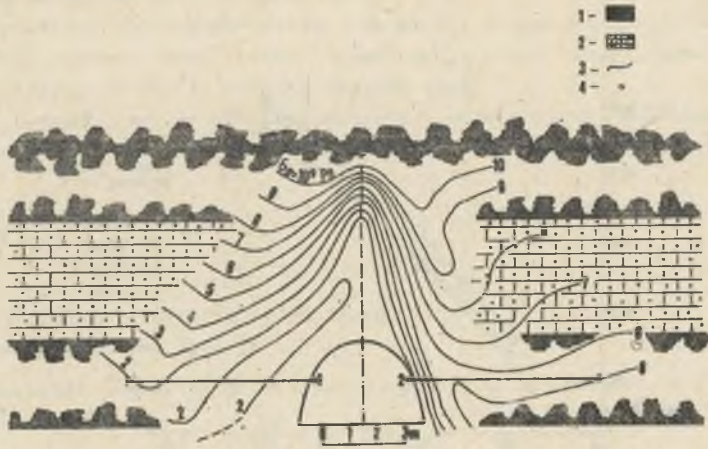
Rys. 19. Rozkład naprężeń geotermicznych wokół wyrobiska (przekop)
 1 - węgiel, 2 - piaskowiec, 3 - mułowiec z iłowcem, 4 - izoliny naprężenia, 5 - otwory badawcze

Fig. 19. Distribution of geothermal stresses around the cross-heading
 1 - coal, 2 - sandstone, 3 - mudstone with silt, 4 - isolines of thermal stresses, 5 - prospect holes



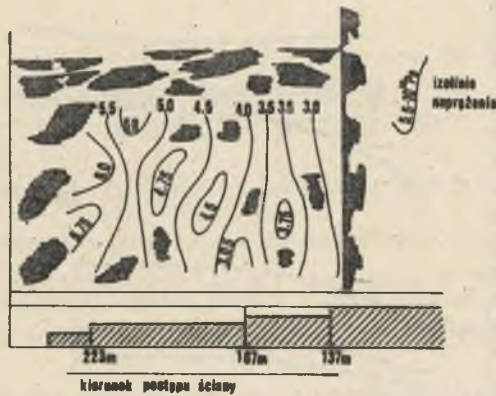
Rys. 20. Rozkład naprężeń geotermicznych wokół wyrobiska (przecinka)
 1 - węgiel, 2 - piaskowiec, 3 - mułowiec z iłowcem, 4 - izoliny naprężenia, 5 - otwory badawcze

Fig. 20. Distribution of geothermal stresses around the break-through
 1 - coal, 2 - sandstone, 3 - mudstone with silt, 4 - isolines of thermal stresses, 5 - prospect holes



Rys. 21. Rozkład naprężeń geotermicznych wokół chodnika podścianowego
 1 - węgiel, 2 - piaskowiec, 3 - izolinie naprężenia, 4 - otwory badawcze

Fig. 21. Distribution of thermal stresses around the longwall heading
 1 - coal, 2 - sandstone, 3 - isolines of thermal stresses, 4 - prospect holes

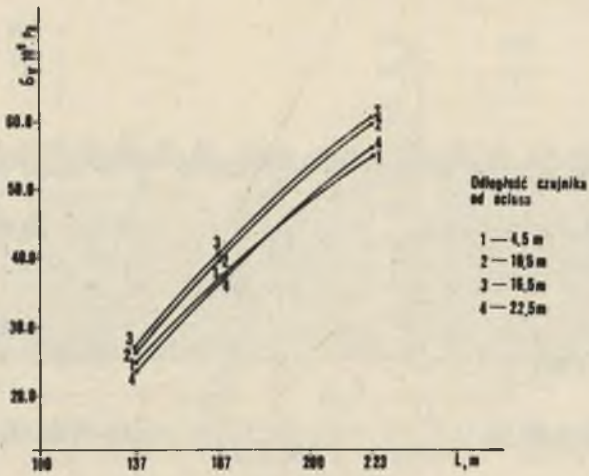


Rys. 22. Rozkład naprężeń geotermicznych w całości węgla czynnej ściany wydobywczej

1 - izolinie naprężenia

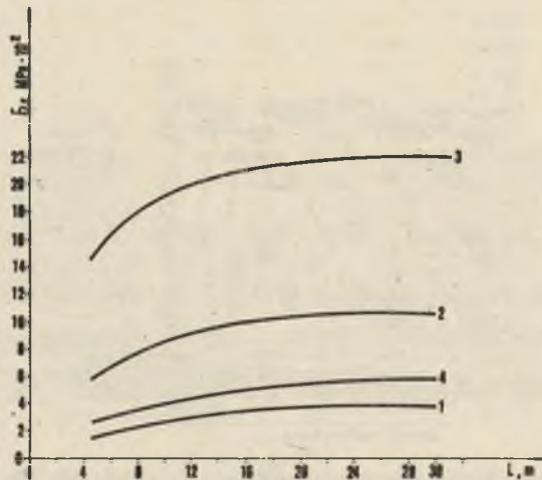
Fig. 22. Distribution of geothermal stresses in unmined coal of a mined longwall

1 - isolines of thermal stresses



Rys. 23. Kształtowanie się naprężeń geotermicznych z postępem ściany w całźnie węglowej

Fig. 23. Changes of geothermal stresses with the wall advance in unmined coal



Rys. 24. Zależność naprężeń geotermicznych od odległości od ociosu

1, 2, 3, 4 - naprężenia geotermiczne w otworach badawczych

Fig. 24. Dependence of geothermal stresses on the distance from the side of work

1, 2, 3, 4 - geothermal stresses in the prospect holes

3.6. Ciepłna kompaktacja objętościowa skał

Stan termodynamiczny górotworu określa nam między innymi kompaktacja objętościowa. Jest to objętość skał zdolna do akumulacji pewnej ilości energii cieplnej przy określonym stanie termosprężystym skał.

W badaniach naszych przy wyznaczaniu kompaktacji objętościowej posłużono się wzorem:

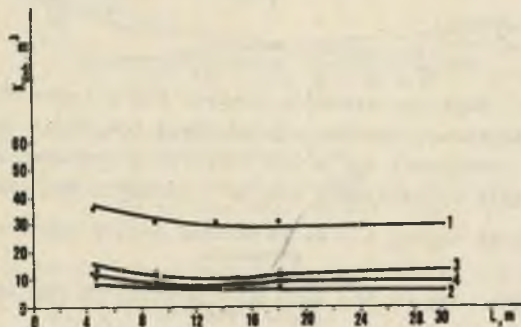
$$K_{ob} = \frac{Q}{\sigma_{th}}, \quad m^3 \quad (10)$$

gdzie:

Q - energia cieplna w określonym obszarze, J,

σ_{th} - naprężenia geotermiczne, Pa.

Wyliczone wartości kompaktacji objętościowej podano w tablicach 2, 4 i 6 i na rysunku 25.



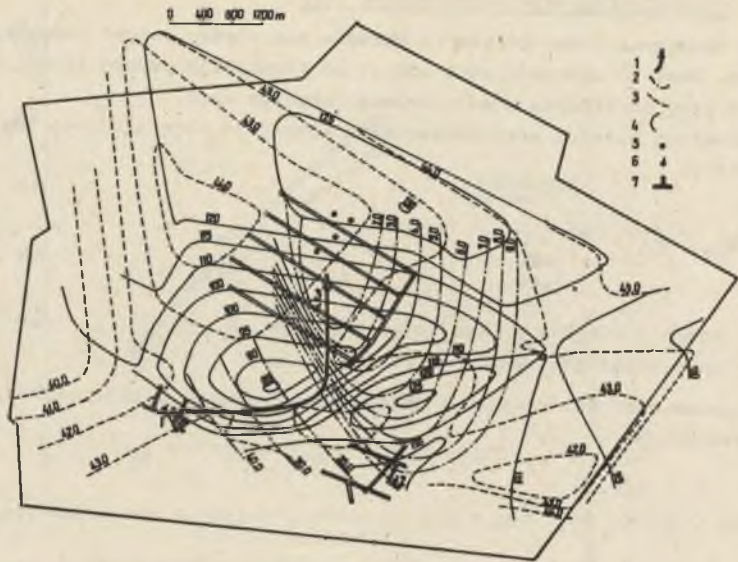
Rys. 25. Zależność objętościowej kompaktacji termicznej skał od odległości od odcisu (przecinka)

1, 2, 3, 4 - wartości kompaktacji w poszczególnych otworach

Fig. 25. Dependence of the volumetric thermal compaction of the orogen on the distance from the side of work (in the break-through)

1, 2, 3, 4 - compaction values in the respective prospect holes

Na rys. 26 przedstawiono rozkład izolinii objętościowej kompaktacji termicznej na tle pierwotnego stanu termodynamicznego masywu skalnego (izolinie - pierwotnej temperatury i powierzchniowego współczynnika zagęszczenia ciepła w ziemiim strumieniu). Jak wynika z rysunku, izolnie objętościowej kompaktacji termicznej przebiegają prostopadle do izolinii tworzących anomalie powierzchniowego współczynnika zagęszczenia ciepła. Ponadto wartość omawianej kompaktacji termicznej maleje w kierunku centralnego obszaru pola górniczego, w którym to obszarze występują zjawiska tafań.



Rys. 26. Mapa geotermiczna obszaru KWK Halemba poz. 1030 m
 1 - kierunek najwyższego spadku objętościowej kompaktacji termicznej, 2 - izoliny kompaktacji termicznej $K_{\psi_{ob}} \text{ m}^3$, 3 - izoliny temperatury rzeczywistej $\psi, ^\circ\text{C}$, 4 - izoliny zagęszczenia ciepła w ziemskim strumieniu $\bar{q}, \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, 5 - miejsca lokalizacji tapani, 6 - geotermiczne punkty pomiarowe, 7 - wyrobiska górnicze

Fig. 26. Geothermal map of the site of the colliery "Halemba", item 1030, (level 1030 m)

1 - direction of the greatest reduction of volumetric thermal compaction, 2 - isolines of thermal compaction $K_{\psi_{ob}} \text{ m}^3$, 3 - isolines of actual temperature $\psi, ^\circ\text{C}$, 4 - isolines of heat condensation in the earth flux, $\bar{q}, \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, 5 - spotted crumpings, 6 - geothermal measuring points, 7 - mining excavations

3.7. Odształcenia termiczne górotworu w obrębie wyrobisk

Odształcenie geotermiczne wokół wyrobisk można zaliczyć do odształceń ogólnych, które zależne są od zasięgu granicy między strefą wychładzania a strefą wytężenia termicznego. Na charakter i wielkość odształcenia górotworu decydujący wpływ, obok właściwości fizykomechanicznych skał, ma przede wszystkim zagęszczenie ciepła w strumieniu wokół wyrobiska i to zarówno powierzchniowe, jak i liniowe.

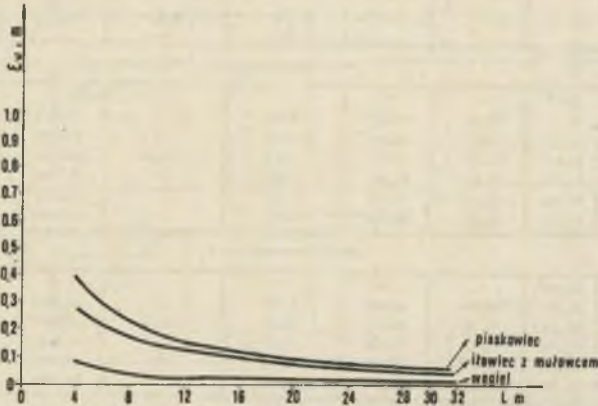
Na badaniach naszych posłużono się wzorem:

$$\varepsilon_{\psi_1} = \frac{q_{\psi_1}}{L}$$

gdzie:

\bar{q} - powierzchniowy współczynnik zagęszczenia ciepła w ziemskim strumieniu górotworu, W/m^2 ,

q_L - liniowy współczynnik zagęszczenia ciepła w górotworze, W/m .



Rys. 27. Odształcenie geotermiczne skał górotworu względem odległości od ociosu wyrobiska

Fig. 27. Geothermal deformations of the orogen in relation to the distance from the side of work

Wyprowadzone odształcenia termiczne w analizowanych wyrobiskach dla poszczególnych skał okalających wyrobiska, tj. piaskowca, mułowca, iłowca, węgla, przedstawiono na rys. 27.

Dla przykładu podajemy skrajne wartości odształcenia geotermicznego skał w poszczególnych otworach:

- otwór 1 - od $23,67 \cdot 10^{-2}$ do $6,75 \cdot 10^{-2}$, m
- otwór 2 - od $7,33 \cdot 10^{-2}$ do $1,73 \cdot 10^{-2}$, m
- otwór 3 - od $21,51 \cdot 10^{-2}$ do $4,31 \cdot 10^{-2}$, m.

Tablica 1

Współczynniki cieplne skał występujących wokół wyrobiska korytarsowego (przekop równoległy zachodni) na głębokości 1030 m w kop. Halemba-Głęboka

Odległość punktu pomiarowego od ośrodku wyrobiska w głąb górotworu	Temperatura górotworu	Różnica temperatury między punktami pomiarowymi	Całkowita energia cieplna w punkcie pomiarowym	Powierzchniowy współczynnik zagęszczenia ciepła w strumieniu	Linowy współczynnik zagęszczenia ciepła w strumieniu	Współczynnik wnikania ciepła	Współczynnik zagęszczenia ciepła w procesie wnikania ciepła z górotworu	Właściwa oporność cieplna skał w ośrodku wyrobiska
l, m	$t, ^\circ C$	$\Delta t, ^\circ C$	$Q, J \times 10^9$	$\bar{q}, \frac{W}{m^2}$	$q_1, \frac{W}{m}$	$\alpha, \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	$q, \frac{W}{m^2}$	$R_w, \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$
Otwór badawczy nr 1								
0,00	17,89	-	-	-	-	-	-	-
4,50	28,44	10,54	24,66	8,46	-	0,2950	3,11	1,24
9,00	30,71	12,81	29,98	5,14	-	0,3160	4,05	2,49
13,50	31,62	13,72	32,11	3,67	25,00	0,3240	4,43	3,73
18,00	31,56	13,68	31,97	2,74	-	0,3226	4,40	4,98
24,00	31,26	13,36	31,27	2,01	-	0,3190	4,26	6,64
30,00	31,13	13,25	30,96	1,59	-	0,3190	4,22	8,31
Otwór badawczy nr 2								
0,00	18,00	-	-	-	-	-	-	-
4,50	28,44	10,44	24,02	8,37	-	0,2950	3,08	1,24
10,50	31,24	13,24	30,46	4,55	26,36	0,3200	4,24	2,90
16,50	31,76	13,76	31,66	3,01	-	0,3230	4,44	4,57
22,50	31,51	13,51	31,08	2,17	-	0,3220	4,35	6,23
28,50	31,37	13,37	30,78	1,69	-	0,3200	4,28	7,89
Otwór badawczy nr 3								
0,00	18,00	-	-	-	-	-	-	-
4,50	27,48	9,48	5,51	7,60	-	0,2860	2,71	1,24
9,00	31,45	13,45	7,82	5,39	-	0,3210	4,32	2,49
13,50	34,64	16,64	9,67	4,45	40,37	0,3390	5,64	3,73
18,00	37,40	19,40	11,27	3,89	-	0,3630	7,04	4,98
24,00	38,07	30,07	11,66	3,01	-	0,3670	7,37	6,64
30,00	39,08	21,07	12,24	2,53	-	0,3730	7,86	8,31
Otwór badawczy nr 4								
0,00	18,00	-	-	-	-	-	-	-
3,00	23,85	5,85	5,95	7,04	-	0,2430	1,42	0,83
6,00	30,96	12,96	13,18	7,80	-	0,3170	4,11	1,66
10,50	36,02	18,02	18,33	6,19	37,03	0,3640	6,56	2,90
15,00	38,06	20,06	20,40	4,82	-	0,3670	7,36	4,15
21,00	38,70	20,70	21,05	3,55	-	0,3730	7,72	5,81
27,00	40,06	22,06	22,44	2,95	-	0,3770	8,32	7,49
Otwór badawczy nr 5								
0,00	18,00	-	-	-	-	-	-	-
4,50	32,28	14,28	14,45	11,45	-	0,3280	4,68	1,24
9,00	38,96	20,96	21,22	8,40	-	0,3580	7,50	2,44
13,50	39,70	21,70	21,97	5,80	36,87	0,3780	8,20	3,73
18,00	40,19	22,19	22,46	4,45	-	0,3790	8,41	4,98
24,00	40,76	22,76	23,04	3,42	-	0,3820	8,69	6,64
30,00	41,03	23,03	23,31	2,77	-	0,3850	8,87	8,31

Tablica 2

Właściwości geotermomechaniczne skał występujących wokół wyrobiska korytarzowego (przekop równoległy zachodni) na głębokości 1030 m w kopalni Halemba-Głęboka

Odległość punktu pomiarowego od ośrodku wyrobiska	Rodzaj skały w ośrodku i gęstość przestrzenna	Ciśnienie geotermiczne na spągu wyrobiska	Wyświetlenie geotermiczne skał w górotworze wyrobiska	Odległość (zasieg) granicy wyświetlenia geotermicznego od ośrodku wyrobiska	Napężenie geotermiczne w górotworze	Kompakcja termiczna górotworu
l, m	$\rho, \frac{kg}{m^3} \times 10^3$	$P_0, MPa \times 10^2$	$W_T, \frac{J}{m^3} \times 10^3$	L_{OT}, m	$\sigma_T, MPa \times 10^2$	K_{Tob}, m^3
Otwór badawczy nr 1						
4,50		2,53			16,57	14,88
9,00	piaskowiec	3,09			21,68	13,82
13,50	2,65	3,31	20,63	80,15	23,74	13,52
18,00		3,29			23,52	13,59
24,00		3,22			22,80	13,71
30,00		3,18			22,52	13,74
Otwór badawczy nr 2						
0,00		-			-	-
4,50	piaskowiec	2,47			15,83	15,11
10,50	2,65	3,14			21,83	13,95
16,50		3,26	20,63	76,45	22,80	13,83
22,50		3,20			22,39	13,88
28,50		3,17			22,04	13,96
Otwór badawczy nr 3						
0,00		-			-	-
4,50	piaskowiec	0,57			0,89	61,91
9,00	2,65	0,81			1,43	54,68
13,50		1,00	18,06	19,82	1,86	51,99
18,00		1,16			2,31	48,79
24,00		1,20			2,42	48,18
30,00		1,26			2,58	47,44
Otwór badawczy nr 4						
0,00		-			-	-
4,50	piaskowiec	0,61			0,43	138,37
9,00	2,65	1,36			1,26	104,60
13,50		1,83	17,58	10,08	2,02	90,74
18,00		2,10			2,26	90,26
24,00		2,17			2,37	88,82
30,00		2,31			2,55	88,00
Otwór badawczy nr 5						
0,00		-			-	-
4,50	piaskowiec	1,49			4,67	30,94
9,00	2,65	2,18				28,44
13,50		2,26	19,96	34,32	8,17	26,89
18,00		2,31			8,37	26,83
24,00		2,37			8,66	26,60
30,00		2,40			8,84	25,37

Tablica 3

Współczynniki cieplne skał występujących wokół wyrobiska korytarzowego (przekop - przecinka 13) na głębokości 1030 m w kopalni Halemba-Głęboka

Odległość punktu pomiarowego od ośrodku wyrobiska	Temperatura górotworu	Różnica temperatury między punktami pomiarowymi	Całkowita energia cieplna w punkcie pomiarowym	Powierzchniowy współczynnik zagęszczenia ciepła w strumieniu	Linijowy współczynnik zagęszczenia ciepła w strumieniu	Współczynnik wnikańia ciepła	Współczynnik zagęszczenia ciepła w procesie wnikańia z górotworu	Właściwa oporność cieplna skał
l, m	ψ , °C	$\Delta\psi$, °C	Q, J · 10 ⁹	$\frac{Q}{M}$	$q_1, \frac{W}{m}$	$\alpha, \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	$q_{wp}, \frac{W}{m^2} \cdot 10^{-2}$	$R_w, \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$
Otwór badawczy nr 1								
0,00	24,20	-	-	-	-	-	-	-
4,50	32,53	8,33	5,78	4,77	-	0,2727	2,27	1,71
9,00	36,19	12,99	9,02	3,44	20,15	0,3172	4,12	3,49
13,50	37,47	13,71	9,51	2,63	-	0,3226	4,42	5,23
18,00	38,90	14,60	10,13	2,10	-	0,3294	4,81	6,96
30,00	40,01	15,81	10,97	1,36	-	0,3388	5,32	11,62
Otwór badawczy nr 2								
0,00	24,20	-	-	-	-	-	-	-
4,50	34,30	10,10	4,88	1,61	-	0,2916	2,95	6,21
9,00	37,21	13,01	6,28	1,04	21,96	0,3172	4,13	12,50
13,50	38,62	14,42	6,96	0,75	-	0,3280	4,73	18,75
18,00	38,33	15,13	7,31	0,61	-	0,3334	5,04	25,00
24,00	39,42	15,22	7,35	0,46	-	0,3348	5,10	33,33
30,00	39,74	15,54	7,50	0,38	-	0,3368	-	41,66
Otwór badawczy nr 3								
0,00	24,20	-	-	-	-	-	-	-
4,50	36,75	12,55	20,38	7,19	-	0,3132	3,93	1,74
9,00	39,80	15,60	25,33	4,47	33,42	0,3375	5,26	3,49
18,00	40,62	16,42	26,66	2,35	-	0,3432	6,64	6,98
30,00	40,92	16,72	27,15	1,44	-	0,3465	5,79	11,62
Otwór badawczy nr 4								
0,00	24,20	-	-	-	-	-	-	-
4,50	33,002	8,8	3,12	1,41	-	0,2780	2,45	6,25
9,00	35,30	11,1	3,94	0,89	-	0,3140	3,49	12,50
18,99	38,00	13,8	4,89	0,55	21,22	0,3240	4,47	25,00
30,00	39,70	15,5	5,50	0,37	-	0,3360	5,21	41,66

Tabela 4

Właściwości geotermomechaniczne skał występujących wokół wyrobiska korytarzowego (przekop - przecinka 13) na głębokości 1030 m w kop. Halemba-Gięboka

Odległość punktu pomiarowego od odciosu wyrobiska	Rodzaj skały i gęstość przestrzenna	Ciśnienie geotermiczne na spągu wyrobiska	Wyteżenie geotermiczne skał w górotworze wyrobiska	Odległość (zasięg) granicy wyteżenia geotermicznego od odciosu wyrobiska	Napężenie geotermiczne w górotworze	Kompakcja termiczna górotworu
l, m	$\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 10^3$	$P_{\text{g}}, \text{MPa} \times 10^2$	$W_T, \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \times 10^3$	L_{OT}, m	$\sigma_{\text{g}}, \text{MPa} \times 10^2$	$K_{\text{ob}}, \text{m}^3$
Otwór badawczy nr 1						
0,00						-
4,50	piaskowiec	0,60			1,56	37,05
9,00		0,93			2,81	32,02
13,50	2,67	0,98	18,26	24,55	3,01	31,59
18,00		1,04			3,26	31,07
30,00		1,13			3,64	30,14
Otwór badawczy nr 2						
0,00		-			-	-
4,50	węgiel	0,50			5,85	8,34
9,00		0,64	10,76	28,90	8,15	7,71
13,50	1,28	0,72			9,48	7,34
18,00		0,75			10,04	7,28
24,00		0,76			10,22	7,19
30,00		0,77			10,41	7,20
Otwór badawczy nr 3						
0,00		-			-	-
4,50	piaskowiec	2,09			14,63	13,93
9,00	2,67	2,61	19,81	57,67	19,69	12,86
18,00		2,75			21,10	12,63
30,00		2,80			21,69	23,36
Otwór badawczy nr 4						
0,00		-			-	-
4,50	węgiel	0,32			2,63	11,86
9,00		0,41	10,42	21,25	3,80	10,47
18,00	1,28	0,50			4,78	10,23
30,00		0,57			5,65	9,73

Tablica 5

Współczynniki cieplne skał występujących wokół chodnika podścianowego na głębokości 1030 m kop. Halemba-Głęboka

Odległość punktu pomiarowego od odcosu wyrobiska	Temperatura górotworu	Różnica temperatury między punktami pomiarowymi	Całkowita energia cieplna w punkcie pomiarowym	Powierzchniowy współczynnik zagęszczenia ciepła w strumieniu	Liniowy współczynnik zagęszczenia ciepła w strumieniu	Współczynnik wnika- nia ciepła	Współczynnik zagęszczenia ciepła w procesie wnika- nia ciepła z górotworu	Właściwa oporność cieplna skał
l, m	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$Q, \text{J} \cdot 10^{10}$	$\frac{q}{l}, \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$q_L, \frac{\text{W}}{\text{m}}$	$\alpha, \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	$q, \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$R_v, \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$
Otwór badawczy nr 1								
0,00	25,50	-	-	-	-	-	-	-
9,00	38,95	13,45	3,07	1,05	-	0,3210	4,3282	17,85
13,50	37,80	12,30	2,81	0,64	18,01	0,3118	3,8354	19,28
18,00	37,00	11,50	2,63	0,45	-	0,3051	3,5086	25,71
22,50	40,25	14,75	3,37	0,46	-	0,3307	4,8778	32,14
Otwór badawczy nr 2 odległość od czoła ściany 223 m								
0,00	25,50	-	-	-	-	-	-	-
4,50	40,10	14,60	5,44	2,27	-	0,3300	4,8180	6,43
10,50	40,93	15,43	5,75	1,03	22,42	0,3361	5,1860	25,00
16,50	41,02	15,52	5,79	0,66	-	0,3368	5,2271	23,57
22,50	40,20	14,70	5,48	0,45	-	0,3307	4,8613	32,14
Otwór badawczy nr 2 odległość od czoła ściany 167 m								
0,00	25,50	-	-	-	-	-	-	-
4,50	39,96	14,46	4,39	2,25	22,43	0,3287	4,7530	6,43
10,50	40,85	15,36	4,67	1,02	-	0,3355	5,1533	15,00
16,50	41,06	15,56	4,73	0,66	-	0,3370	5,2437	23,57
22,50	39,88	14,38	4,37	0,45	-	0,3282	4,7197	32,14
Otwór badawczy nr 2 odległość od czoła ściany 137 m								
0,00	25,50	-	-	-	-	-	-	-
4,50	39,69	14,19	3,70	2,21	-	0,3267	4,6359	6,43
10,50	40,78	15,28	3,79	1,02	22,41	0,3349	5,1173	15,00
16,50	41,10	15,60	3,87	0,66	-	0,3368	5,2541	23,57
22,50	39,50	14,00	3,47	0,43	-	0,3253	4,5542	32,14

Tablica 6

Właściwości termomechaniczne skał wokół chodnika podścianowego na głębokości 1030 m kop. Halemba-Głęboka

Odległość punktu pomiarowego od odcisu wyrobiska l, m	Rodzaj skały w odcisie i gęstość przestrzenna $\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 10^3$	Cisnienie geotermiczne na spagu wyrobiska $P_{\phi}, \text{MPa} \times 10^2$	Wyżeźnienie geotermiczne skał w górotworze wyrobiska $W_T, \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \times 10^3$	Odległość (zasieg) granicy wyżeźnienia geotermicznego od odcisu wyrobiska l_{OT}, m	Napreźnienie geotermiczne w górotworze $\sigma_{\phi}, \text{MPa} \times 10^4$	Kompakcja termiczna górotworu $K_{\phi, Ob}, \text{m}^3$
Otwór badawczy nr 1						
0,00		-			-	-
9,00	węgiel	3,17			1,97	1,64
13,50		2,90	11,43	128,77	1,66	1,69
18,00	1,27	2,71			1,52	1,72
22,50		3,47			2,11	1,60
Otwór badawczy nr 2 odległość od czoła ściany 223 m						
0,00		-			-	-
4,50	węgiel	5,61			5,55	0,98
10,50		5,93	11,65	210,09	5,98	0,96
16,50	1,27	5,96			6,02	0,97
22,50		5,64			5,60	0,98
Otwór badawczy nr 2 odległość od czoła ściany 167 m						
0,00		-			-	-
4,50	węgiel	4,53			3,64	1,21
10,50		4,81	11,66	171,32	3,95	1,18
16,50	1,27	4,87			4,02	1,18
22,50		4,50			3,61	1,21
Otwór badawczy nr 2 odległość od czoła ściany 137 m						
0,00		-			-	-
4,50	węgiel	3,81			2,49	1,49
10,50		3,91	11,67	139,88	2,61	1,45
16,50	1,27	3,99			2,69	1,44
22,50		3,58			3,33	1,41

4. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć kilka ogólnych wniosków w zakresie warunków geotermicznych i geotermomechanicznych górotworu.

Ujęte w pracy wyniki wskazują na złożoność problemów, a przede wszystkim metod badawczych i dokładności pomiarów. Obserwacje nasze pozwalają wysunąć wnioski na wyprowadzenie w najogólniejszym zarysie związków funkcyjnych między warunkami cieplnymi a mechanicznymi górotworu, mimo szczupłości obserwacji. Na podstawie otrzymanych danych można podać ogólne sugestie co do związków przyczynowych między przepływem ciepła a właściwościami mechanicznymi w górotworze nienaruszonym i naruszonym.

1. Warunki geotermiczne obszaru kopalni Halemba-Głęboka są zróżnicowane. W górotworze nienaruszonym w partii południowo-wschodniej pola górniczego rozkład temperatury na głębokości 1030 m jest w zasadzie równomierny, izotempy układają się monoklinalnie o przebiegu równoleżnikowym (E-W). Uwarunkowane to jest w tej części dość monotonnym rozwojem litologicznym masywu skalnego.

2. Odmienne kształtuje się powierzchniowy współczynnik zapęźnienia ciepła w ziemskim strumieniu. Jego izoliny dają obraz antykliny o wartościach od 70 do 120 $\cdot 10^{-3}$ W/m².

3. Przedstawione dane w pracy z roku 1982 dotyczące potencjalnych naprężeń termicznych w górotworze nienaruszonym odzwierciedlają faktyczny stan termodynamiczny masywu skalnego przed wykonaniem wyrobisk górniczych. Natomiast naprężenia termiczne występujące w górotworze naruszonym robotami górniczymi kształtują się odmiennie ze względu na lokalną akumulację i dysypację energii.

4. Określona temperatura wokół wyrobisk kształtuje się mniej więcej zgodnie z teoretycznymi założeniami. Niemniej jednak rozkład izotemper wokół wyrobisk jest uzależniony od budowy litologicznej górotworu i otwartej powierzchni calizny węglowej.

5. Odnośnie do ziemskiego strumienia w górotworze naruszonym zauważa się zasadnicze zmiany w mocy tego strumienia, kierunku przepływu i czasu emancji. Strumień ten okala wyrobisko ze znacznym zagęszczeniem izoliny i liczbowo wzrasta w kierunku ociosów wyrobisk, osiągając najwyższe wartości w obrębie ociosu. Odwrotnie przedstawia się rozkład energii cieplnej wokół wyrobiska; energia wzrasta od ociosu w głąb górotworu.

6. Zmienność naprężeń geotermicznych w górotworze naruszonym jest znacznie większa aniżeli w masywie skalnym nienaruszonym.

7. Wyprowadzona termiczna kompaktacja objętościowa maleje w obszarach skłonnych do tafań.

8. Znajomość zjawisk termodynamicznych może ułatwić poznanie właściwości mechanicznych górotworu i ukierunkować prognozy odnośnie tafań.

LITERATURA

- [1] Bartoszek P., Janota S.: Naprężenia geotermiczne wokół wyrobisk poziomych w wyrobiskach skalnych i węglowych kop. Halemba. Biblioteka Instytutu Geologii Stosowanej, Gliwice 1987.
- [2] Chmura K.: Związek funkcyjny pomiędzy ziemskim strumieniem ciepła a właściwościami mechanicznymi skał. Rudy i Metale Nieżelazne Nr 10, 1977.
- [3] Chmura K.: Funktionsbeziehung zwischen dem Erdwarmefluss und den mechanischen Eigenschaften der Gesteins im vertikalen Gebirgsprofil - Rock Mechanics nr 10, Wiedeń 1978.
- [4] Chmura K.: Kwarцова sonda termiczna i jej zastosowanie do pomiarów rozkładu temperatury w górotworze wokół wyrobisk górniczych - Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Górnictwo z. 149, 1986.
- [5] Chmura K., Chudek M.: Geotermomechanika górotworu. Wydawnictwo "Śląsk" (w druku).
- [6] Kieźbik H., Mencil W.: Ocena właściwości geotermomechanicznych skał w otoczeniu wyrobisk korytarzowych kopalni Halemba-Głęboka. Biblioteka Instytutu Geologii Stosowanej, Gliwice 1987.
- [7] Twardoch S.: Rozkład naprężeń geotermomechanicznych wokół wyrobiska poziomego KWK Halemba. Biblioteka Instytutu Geologii Stosowanej, Gliwice 1987.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Antoni Goszcz

Wpłynęło do redakcji w kwietniu 1988 r.

ГЕОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД
ВБЛИЗИ УЗКИХ ВЫРАБОТОК ШАХТЫ "ХАЛЕМБА-ГЛУБОКАЯ"

Р е з ю м е

В работе представлены геотермомеханические свойства горных пород трёх избранных выработок на горизонте 1030 м шахты ХАЛЕМБА-ГЛУБОКАЯ, с учётом литологического характера горного массива. В этих выработках произведены исследования распределения температуры на глубину 30 метров от боков с применением оригинальных термических зондов. На основании полученного распределения температуры вблизи выработок выведены функциональные связи между мощностью энергии земной струи тепла и термомеханическими свойствами пород в горном массиве нарушенном при проведении горных работ.

Выведены оригинальные формулы относительно количества общей тепловой энергии, термического натяжения, термического напряжения и давления, предела зоны охлаждения и термического сжатия.

Определены поверхностные и линейные концентрации тепла в земной струе на горизонте 1030 м.

Результаты исследований представлены в виде таблиц и графиков. Представленный метод относительно использования энергии земной струи для определения термомеханических свойств пород является оригинальным и новаторским и должна быть использована в горном деле в области механики горных массивов.

GEOthermomechanical PROPERTIES OF THE OROGEN AROUND THE DOG-HEADINGS
OF THE COLLIERY "HALEMBA-GŁĘBOKA".

S u m m a r y

The paper deals with the thermomechanical properties of the orogen around three selected headings on the level of 1030 m in the colliery Halemba-Głęboka, taking into account the lithological character of the orogen. In these headings the temperature distribution was tested at a depth of 30 m from the side of work by means of an original thermal probe. Basing on the obtained results the functional relations between the power of the heat flux from the earth and the thermomechanical properties of the rock mass already being mined have been deduced.

Original formulae have been developed concerning the total amount of thermal energy, the thermal effort, the pressure and thermal stresses, the range of the chilling zone as well as the thermal compaction. The superficial and linear condensation of heat in the earth flux have been determined at the level of 1030 m.

The results of these investigation have been presented both in Tables and diagrams. The discussed method of utilizing the energy of the earth flux for the determination of the thermomechanical properties of rock is original and innovative and ought to be applied in mining activities as far as rock mechanics is concerned.