

ZYGMUNT DRWIĘGA, MIECZYSLAW JASTRZĄB

Przedsięb. Geofizyki GN - Kraków, Przedsięb. Poszuk. Naftowych - Wołomin

## ZAGADNIENIE STOSOWANIA PROFILOWANIA TERMICZNEGO DO OKREŚLANIA WYSOKOŚCI WYTŁOCZENIA CEMENTU POZA RURY OKŁADZINOWE Z UWZGLĘDNIENIEM PROFILOWANIA AKUSTYCZNEGO

UKD 550.832.6:622.245.42:550.832.44

Podstawową metodą stosowaną dotychczas w wiertnictwie naftowym przy określaniu wysokości wytłoczenia cementu poza rury okładzinowe jest profilowanie termiczne, oparte na wykorzystaniu ciepła wydzielającego się przy wiązaniu cementu. Wydzielające się ciepło przekazywane jest przez rury okładzinowe do płuczki wiertniczej lub wody wypełniającej otwór wiertniczy. W czasie zachodzącej reakcji egzotermicznej wiązania cementu wydzielają się znaczne ilości ciepła uzależnione od następujących czynników:

- 1) asortymentu (gatunku) cementu,
- 2) ilości roztworu cementowego uzależnionego od stopnia skawernowania otworu w danym przedziale głębokościowym,
- 3) jakości i ilości stosowanych opóźniaczy bądź przyspieszaczy reakcji wiązania cementu dodawanych do roztworu cementowego,
- 4) rodzaju domieszek dodawanych do suchego cementu (np. popiół),
- 5) głębokości, na jaką wytłoczono roztwór cementowy i panującej w niej naturalnej temperatury skał, uzależnionej w danym rejonie badań od wielkości stopnia geotermicznego.

Pokrótko rozpatrzmy wpływ niektórych czynników wpływających na wielkość anomalii geotermicznej przy wiązaniu cementu.

### Asortyment cementu

Z praktyki wiertniczej wiadomo, że cemeny różnych asortymentów różnią się wielkościami maksymalnych temperatur powstających w procesie reakcji egzotermicznej wiązania masy cementowej oraz wpływem czasu, jaki jest liczony od momentu rozpoczęcia wiązania cementu do powstania maksymalnej temperatury. Na podstawie danych zaczerpniętych z literatury (2) dla różnych asortymentów cementu maksymalne temperatury powstają w granicach 6—18 godz. od momentu rozpoczęcia wiązania cementu, a zatem ilości ciepła wydzielanego przy wiązaniu różnych roztworów cementowych są niejednakowe. Stwierdzono również na podstawie wy-

ników badań termicznych, że ilość ciepła wydzielającego się przy wiązaniu roztworu cementowego wzrasta:

- a) ze wzrostem zawartości w cemencie krzemianu wapnia  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,
- b) ze zmniejszeniem współczynnika wodno-cementowego wyrażonego stosunkiem wagowym ilości wody do ilości wagowej suchego cementu.

Ilość roztworu cementowego zależy od stopnia skawernowania otworu w danym przedziale głębokościowym.

Jak dowiodły doświadczenia uzyskane z interpretacji wykresów profilowań termicznych wykonanych do określenia wysokości wytłoczenia cementu poza rury okładzinowe — zwiększenie anomalii geotermicznej w danym przedziale głębokościowym przypisywane jest wzrostowi średnicy otworu powyżej wartości nominalnej i na odwrót zmniejszenie anomalii geotermicznej w danym przedziale głębokościowym występuje przy zmniejszeniu średnicy otworu.

Zależność anomalii geotermicznej przy określaniu wysokości wytłoczenia cementu poza rurami okładzinowymi od wielkości gradientu geotermicznego.

W rejonie działania Przedsiębiorstwa Poszukiwań Naftowych w Wołominie średnie wartości gradientu geotermicznego  $G_{gr}$  kształtują się dla poszczególnych utworów geologicznych następująco (w  $^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ ).

I. Dla synklinorium lubelskiego w utworach:

a) kredy	— 1,07—2,23,
b) jury	— 1,06—2,91,
c) triasu	— 1,54—1,70,
d) permu	— 1,29—1,98,
e) karbonu	— 1,78—3,39,
f) dewonu	— 1,38—2,63.

Ia. Dla podniesienia łukowsko-hrubieszowskiego w utworach:

a) kredy	— 0,79—1,99,
b) jury	— 0,58—1,79,
c) karbonu	— 1,31—2,47,
d) dewonu	— 1,44—2,40,
e) syluru	— 0,98—2,66,
f) ordowiku	— 1,07,
g) kambru	— 1,03,
h) eokambru	— 1,09.

II. Dla obniżenia podlaskiego w utworach:

a) kredy	— 0,87—3,37,
b) jury	— 1,00—2,93,
c) triasu	— 0,98—3,13,
d) permu	— 1,06—2,50,
e) syluru	— 2,18—4,18,
f) ordowiku	— 2,18—4,26,
g) kambru	— 1,16—1,91.

III. Dla synklinorium warszawskiego w utworach:

a) kredy	— 1,42—3,36,
b) jury	— 1,50—2,83,
c) triasu	— 1,77—3,00,
d) permu	— 0,92—1,80,
e) syluru	— 2,46,
f) ordowiku	— 3,44,
g) kambru	— 2,62—4,09.

IV. Dla syneklizy perybaltyckiej w utworach:

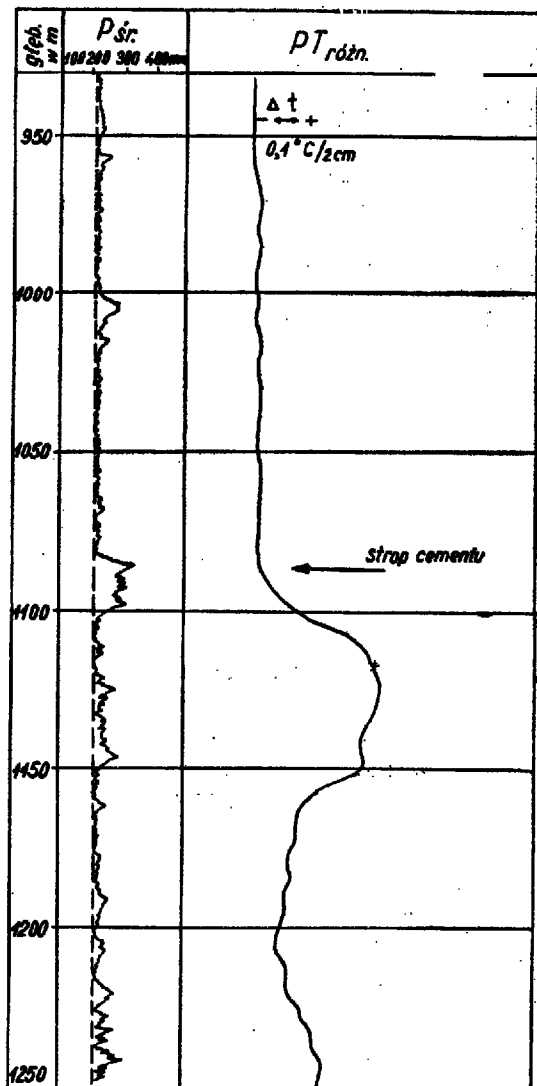
a) kredy	— 0,99—1,32,
b) jury	— 1,19—2,34,
c) triasu	— 1,61—2,94,
d) permu	— 1,28—1,65,
e) syluru	— 1,63—2,19,
f) ordowiku	— 2,19—2,34,
g) kambru	— 1,18—1,32.

Maksymalne temperatury pomierzone w poszczególnych rejonach geologicznych termometrami wgłębnymi zarówno typu ETMI-55, jak i TEG-2 dla głębokości 2000 m wynoszą odpowiednio:

1) w synklinorium lubelskim	— 37,9—61,3°C,
2) w podniesieniu łukowsko-hrubieszowskim	— 50,0—57°C,
3) w obniżeniu podlaskim	— 40,0—72°C,
4) w synklinorium warszawskim	— 39,0—57,5°C,
5) w syneklizie perybaltyckiej	— 35,7—56,2°C.

Na podstawie powyższych danych (uzyskanych z profilowań termicznych) przy ustalonej równowadze cieplnej stwierdzono, iż temperatury wiązania cementu są wyższe od naturalnej temperatury warstw w omawianych rejonach. Stąd też profilowanie termiczne wykonywane dla określenia wytlóczenia cementu poza rury okładzinowe daje miarodajne wyniki przy odpowiednim okresie wykonania tegoż profilowania po zakończeniu cementowania rur okładzinowych. Przy zależności równej lub odwrotnej konieczne jest wykonywanie różnicowego profilowania termicznego dla określenia wysokości wytlóczenia roztworu cementowego poza rury okładzinowe.

Nadmienić należy, że metoda różnicowego profilowania termicznego w stosunku do zwykłego profilowania termicznego jest bardziej efektywna przy określaniu stropu cementu, gdyż pozwala zarejestrować krzywą temperatury w czułej skali zapisu. Określenie wysokości wytlóczenia cementu poza rury na podstawie zwykłego profilowania termicznego wykonanego oporowymi termometrami wgłębnymi jest utrudnione i może prowadzić do błędnego określenia stropu cementu we wspomnianym przypadku. Przykład określenia stropu cementu na podstawie różnicowego profilowania termicznego  $PT_{różn}$  wykonanego w otworze P-1 w rejonie Przedgórze Karpat przed-



Ryc. 1. Przykład określenia wysokości wytlóczenia cementu poza rurami okładzinowymi za pomocą różnicowego profilowania termicznego (otwór P-1).

Fig. 1. Example of determination of altitude to which cement was squeezed up outside well casing, by means of differential thermal logging (the borehole P-1).

stawiono na ryc. 1, gdzie przeważnie naturalne temperatury warstw są wyższe od temperatur powstających w wyniku reakcji egzotermicznej wiązania cementu.

**Problem właściwego okresu stosowania profilowania termicznego PT przy wyznaczaniu wysokości wytlóczenia cementu poza rury okładzinowe.**

Dotychczas na podstawie danych uzyskanych z literatury krajowej i zagranicznej przyjmowano, iż optymalny czas wykonawstwa profilowania termicznego w celu wyznaczenia wysokości wytlóczenia cementu poza rury okładzinowe wynosi od 24 do 72 godzin, od ukończenia cementowania. Na tej podstawie w praktyce przedsiębiorstw wiertniczych ściśle przestrzegany był termin wykonawstwa profilowania termicznego do określenia wysokości wytlóczenia cementu poza rury okładzinowe. Autorzy niejednokrotnie stwierdzili, że stosowana dotychczasowa metoda określania wysokości wytlóczenia cementu poza rury okładzinowe w oparciu o profilowania termiczne PT była niewłaściwa. Koncepcja ta wyłoniła się

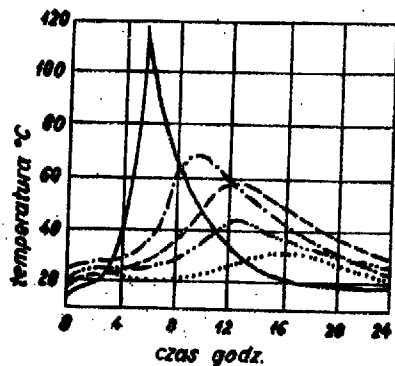
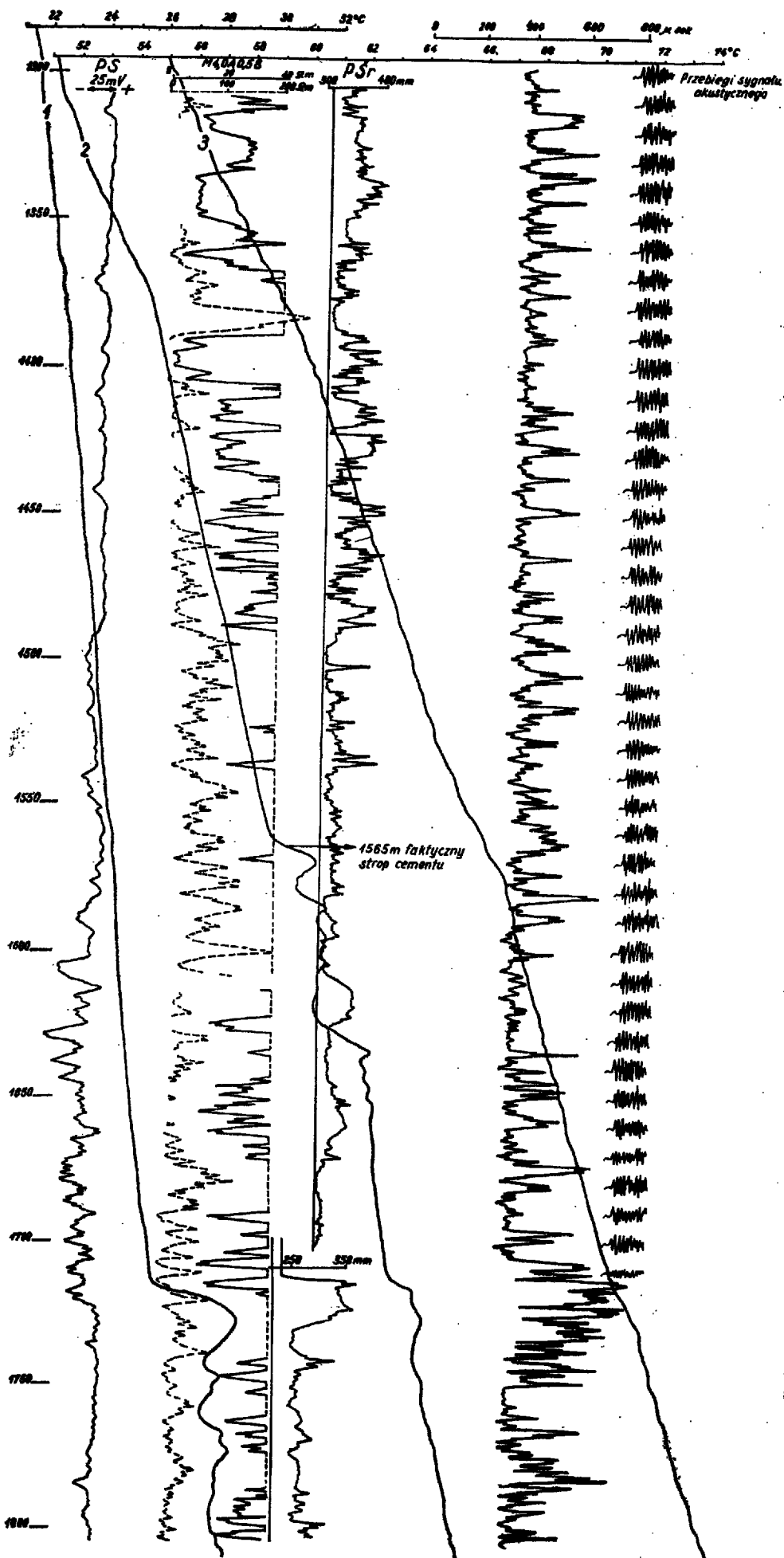
1.  $I = 14,2 \text{ mA}$   
 $T_0 = 27,70^\circ \text{C}$

2.  $I = 6,5 \text{ mA}$   
 $T_0 = 27,9^\circ \text{C}$

3.  $I = 6,5 \text{ mA}$   
 $T_0 = 27,9^\circ \text{C}$

PA (krzywa czasu)

typ aparatury SP61/68, sonda SA-80/100  
 wzmacnienie - 7, baza pomiaru NB - 4,8 m



Ryc. 3. Zmiana temperatury przy wiązaniu różnych gatunków cementu.

— cement glinoziemisty, --- cement szybkowiążący, ---- cement portlandzki, -.-.- cement żelazoportlandzki, ..... cement żużlowy.

Fig. 3. Changes in temperature during fixation of different types of cement.

— clay-earthy cement, --- rapid-hardening cement, ---- Portland cement, -.-.- Portland-slag cement, ..... slag cement.

Ryc. 2. Zestawienie profiliwań termicznych PT wykonanych w różnym czasie po zakończeniu cementowania, otw. L-1.

1 - pomiar PT wykonany po 30-godzinnej stójce otworu, 2 - pomiar PT wykonany po 10-dniowej stójce otworu, 3 - pomiar PT wykonany po 14,5-dniowej stójce otworu.

Fig. 2. Thermic logging, PT, made at various times after cementation has ended (the borehole L-1).

1 - PT measurement taken after 30 hours, 2 - PT measurement taken after 10 days, 3 - PT measurement taken after 14.5 days.

na podstawie szeregu wykonanych profilowań termicznych do określenia wysokości wytlóczenia cementu poza rury okładzinowe w różnym czasie po zakończeniu cementowania i na podstawie tych pomiarów stwierdzono, że dokładne jego określenie jest możliwe po upływie 240—288 godzin od czasu ukończenia cementowania.

Problem właściwego okresu stosowania profilowań termicznych do określenia wysokości wytlóczenia cementu poza rury okładzinowe wyłonił się przy wykonawstwie profilowań termicznych do określenia stopnia (gradientu) geotermicznego poszczególnych kompleksów litologiczno-stratygraficznych obszaru platformowego. Powyższa metoda określenia wysokości wytlóczenia cementu poza rury okładzinowe na podstawie profilowania termicznego po upływie 240—288 godzin od ukończenia wytlóczenia roztworu cementowego jest najbardziej słuszną, szczególnie dla otworów wiertniczych, które mają być orurowane rurami okładzinowymi od 2000 do 3200 m przy wytlóczeniu roztworu cementowego płuczką w celu cementowania tychże rur na wysokość ok. 1000 m od wierzchu. Do cementowania rur okładzinowych w obu przypadkach, które będą rozważane poniżej zastosowano cement „Portland-350” bez żadnych domieszek i katalizatorów.

Dla udokumentowania naszych rozważań i stwierdzonych prawidłowości podajemy następujące przykłady:

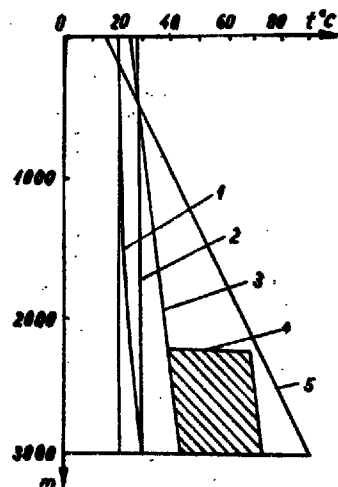
1. W otworze L-1 (ryc. 2) wykonano profilowanie termiczne w skali zapisu  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  do określenia wysokości wytlóczenia roztworu cementowego poza rury okładzinowe po upływie 30 godzin. Po wykonaniu tego pomiaru i interpretacji krzywej profilowania termicznego rzekomy strop cementu zaznaczył się na głębokości 1717,5 m. W następnej kolejności po upływie 240 godzin od zakończenia cementowania wykonano ponownie profilowanie termiczne w tej samej skali zapisu. Założeniem tego pomiaru przy takim okresie stójki otworu i średnicy otworu, zgodnie z danymi (2) było określenie stopnia geotermicznego przewierconego profilu litologiczno-stratygraficznego. Wykonany pomiar i uzyskana krzywa z profilowania termicznego nie sprostowała postawionemu zadaniu. Na krzywej tej stwierdzono wyraźną anomalię geotermiczną zaznaczającą się na głębokości 1565,0 m, pochodzącą od reakcji egzotermicznej wiązania cementu na kontakcie z płuczką wiertniczą. Na tej głębokości po zinterpretowaniu krzywej profilowania termicznego wyznaczono właściwy strop cementu.

W celu uzyskania poprawnej krzywej profilowania termicznego odzwierciedlającej zmiany gradientu geotermicznego przewierconego profilu litologiczno-stratygraficznego wykonano ponowny pomiar po upływie 348 godzin od ukończenia cementowania. Na podstawie uzyskanej krzywej określono gradient geotermiczny poszczególnych kompleksów litologiczno-stratygraficznych. Średnie wartości gradientu geotermicznego  $G_{\text{sr}}$  w tym otworze przedstawiają się następująco:

dla osadów kredy —  $1,61^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,  
 dla osadów jury —  $1,35^{\circ}$   
 dla osadów karbonu —  $2,23^{\circ}$   
 dla osadów dewonu —  $1,79^{\circ}$ .

Zestawienie pomiarów profilowania termicznego wraz z profilowaniem akustycznym, oporności i średnicy przedstawiono na ryc. 2.

2. W otworze A-5 na podstawie wykonanego profilowania termicznego w skali zapisu  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  po upływie 24 godzin od zakończenia cementowania stwierdzono anomalię geotermiczną na głębokości 1445,0 m, odzwierciedlającą rzekomy strop cementu poza kolumną rur okładzinowych. Po upływie ok. 168 godzin stójki otworu od zakończenia cementowania wykonano ponowny pomiar profilowania termicznego, zachowując tę samą skalę zapisu dla porównania obu krzywych PT. Z uzyskanej krzywej stwierdzono anomalię geotermiczną na głębokości 1197,5 m.



Ryc. 4. Krzywe zmiany temperatury przy przemieszczaniu roztworu cementowego w otworze wiertniczym.

1 — w kolumnie rur okładzinowych, 2 — poza kolumną rur okładzinowych, 3, 4 — po 6 godzinach wiązania cementu, 5 — naturalna temperatura skał.

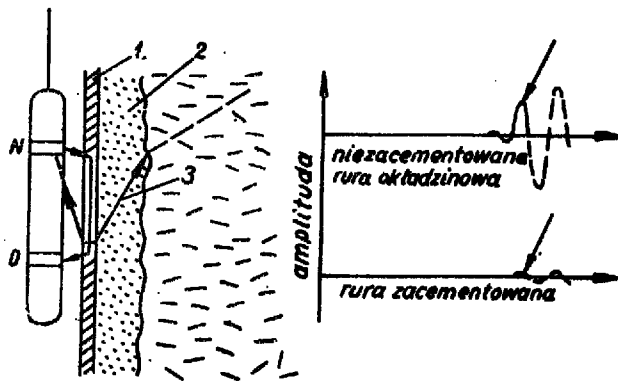
Fig. 4. Curves of changes in temperature during translocation of cement solution in borehole.

1 — in well casing, 2 — outside well casing, 3—4 — after 6 hours of cement fixation, 5 — natural temperature of rocks.

Z porównania obu krzywych zauważa się zgodny charakter w konfiguracji, z tym że na drugiej krzywej anomalie geotermiczne pochodzące od wiązania roztworu cementowego są zmniejszone w przedziale głębokościowym od 1445 do 2405,0 m.

Zmniejszenie to uwarunkowane jest częściowym związaniem roztworu cementowego. W pomiarze profilowania termicznego przewidzianym do określenia gradientu geotermicznego przewierconego profilu litologiczno-stratygraficznego wykonanego zgodnie z danymi (2) przy odpowiedniej konstrukcji otworu, tj. po upływie 288 godzin od ukończenia cementowania zaobserwowano anomalię geotermiczną wywołaną reakcją egzotermiczną wiązania roztworu cementowego na kontakcie z płuczką wiertniczą na głębokości 1075—1165 m. Na podstawie tej krzywej (1) wyznaczono faktyczny strop cementu na głębokości 1075 m. Profilowanie termiczne wykonano dla określenia gradientu geotermicznego po upływie 308 godzin od ukończenia cementowania. Uzyskana krzywa profilowania termicznego jest typową krzywą odzwierciedlającą zmiany gradientu geotermicznego zależnie od przewierconego profilu litostratygraficznego. Profil litologiczno-stratygraficzny otworu A-5 z podaniem średniej wartości gradientu geotermicznego przedstawia się następująco:

0— 37,5 m czwartorzęd — gliny, żwiry, piaski,  
 37,5— 81,0 m trzeciorzęd — ilowce zapiaszczone,  
 81,0— 785,0 m kreda górna i dolna, margle, wapień margliste z krzemieniami, piaskowce glaukonitowe z przerostami ilowców i mułowców, —  $1,19^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$   
 785,0— 991,0 m jura górna i środkowa wapień pelityczne, olitowe, detrytyczne, piaskowce kwarcowe —  $1,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$



Ryc. 5. Schemat rozchodzenia fal sprężystych przy cementomierzu akustycznym z charakterystycznymi impulsami fali pochodzącej od rur okładzinowych.

Fig. 5. Scheme of propagation of elastic waves in the course of acoustic cementometer, with characteristic impulses of wave originating from well casing.

991,0—2331,0 m	karbon górny, dolny mułowce, łożwce, płaskowce z wkładkami wapieni,	— 2,09°C/100 m
2331,0—2406,0 m	dewon górny wapienie skaliste, gruzłowe.	— 1,54°C/100 m

Jak wynika z uzyskanych doświadczeń przy interpretacji krzywych profilowania termicznego przedstawionych w powyższych przykładach i in. anomalie geotermiczne określające faktyczny strop cementu zaznaczają się po upływie 240—288 godzin od ukończenia cementowania.

Podkreślić należy, iż anomalie geotermiczne nie są wywołane konwekcją ciepłą pochodzącą z oddziaływania górotworu otaczającego, a określają właściwy strop cementu poza rurami okładzinowymi. Przedstawione dane na załączonych ryc. 2 i 3 w pełni potwierdzają wyniki profilowania akustycznego PA; w przypadku otworu L—1 strop cementu zaznacza się na głębokości 1565 m, zaś w przypadku otworu A—5 1075 m.

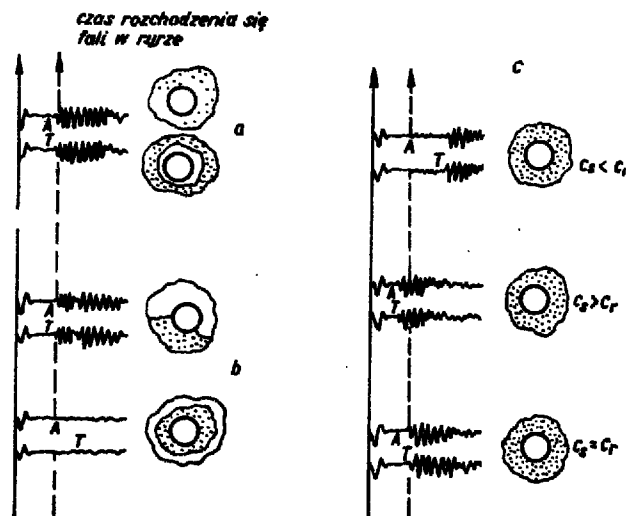
Zanim omówimy interpretację krzywych profilowania akustycznego dla poparcia naszych rozważań w przedstawionej metodyce stosowania profilowania termicznego w otworach wiertniczych do określenia wysokości wytlóczenia cementu poza rury okładzinowe przedstawimy pokrótce wpływ czynników temperaturowych w procesie cementowania rur okładzinowych.

**Uwzględnienie czynników temperaturowych przy cementowaniu rur okładzinowych w otworach wiertniczych.**

Jak już wspomniano ilość ciepła wydzielanego przy wiązaniu różnych roztworów cementowych jest niejednakowa, zależy ona tak od składu chemicznego cementu, jak i współczynnika wodno-cementowego.

$$a = \frac{w}{c}$$

Cementy asortymentu „Portland” o współczynniku  $a = 0,4—0,5$  wydzielają maksimum ciepła w ciągu 10—13 godzin po przygotowaniu roztworu cementowego, zależnie od składu cementu, wydzielić się może ciepło od 1,5 do 5,0 Kcal przy wiązaniu 1 kg cementu. Zachodzące zmiany temperaturowe obserwowane przy twardnieniu adiabatycznym różnych asortymentów cementu przedstawia ryc. 3. Przedstawione na nim krzywe uzyskano na podstawie doświadczeń dla róż-



Ryc. 6. Przebiegi sygnału akustycznego w otworze zarurowanym.

a — niezacementowana rura okładzinowa, b — złe związanie pierścienia cementowego, c — dobre związanie pierścienia cementowego z rurą okładzinową i skałą.

Fig. 6. The course of the acoustic signal in well casing.

a — noncemented well casing, b — inadequate fixation of cement ring, c — adequate fixation of cement ring with well casing and surrounding rock.

nych asortymentów cementu na próbach wykonanych w jednakowych warunkach atmosferycznych (2 — doświadczenia Dorsza).

Znając ogólną ilość ciepła, która wydzielana jest przez 1 kg cementu w czasie wiązania i zakładając, że proces wiązania zachodzi natychmiast można określić przyrost temperatury zestalonego roztworu cementowego  $\Delta t_w$  według następującej zależności:

$$\Delta t_w = \frac{q}{C_c} \quad [1]$$

gdzie:  $C_c$  = pojemność ciepła roztworu cementowego.

Ustalenie zależności nagrzewania i ostygnięcia pierścienia cementowego poza kolumną rur okładzinowych i roztworu cementowego jest zagadnieniem bardzo trudnym do rozwiązania. Na proces ten wpływa wiele czynników, w związku z czym przedstawienie analityczne tego zagadnienia jest niemożliwe, może być ono rozwiązane jedynie w przybliżeniu. Jedno z takich rozwiązań podane jest w pracy (2). Ostateczną zależność pozwalającą określić temperaturę roztworu cementowego włożonego w kolumnę rur okładzinowych można przedstawić w następującej postaci:

$$t = t_p + \frac{t_2 - t_1}{H} z + (1 - e^{-az}) \left( t_1 - \frac{t_2 - t_1}{aH} \right) \quad [2]$$

a poza kolumną rur okładzinowych w przestrzeni pozarurowej:

$$t = t_{pe} - aH + (1 - e^{-aH}) \left( t_1 - \frac{t_2 - t_1}{aH} - t_1 + \frac{t_2 - t_1}{bH} \right) \times e^{b(H-z)} - \frac{t_2 - t_1}{bH} + t_1 + \frac{t_2 - t_1}{H} \cdot z \quad [3]$$

gdzie:

$$a = \frac{2\pi rk}{\gamma \pi r_k^2 V_c}$$

$$b = \frac{2\pi rk}{\gamma \pi (r^2 - r_k^2) V_1 C}$$

$r_k, r_1$  — promień wewnętrzny i zewnętrzny kolumny rur okładzinowych w m,

$r$  — promień otworu w m,

$k$  — współczynnik przekazywania ciepła od ośrodka skalnego do roztworu cementowego w kcal/m<sup>2</sup> godz. °C

$t_1$  i  $t_2$  — temperatura skał, odpowiednio przy ujściu i na spodzie otworu w °C,

$t$  — temperatura roztworu cementowego na głębokości  $z$  w °C,

$\gamma$  — ciężar właściwy roztworu cementowego w kg/cm<sup>3</sup>,

$V_c$  — prędkość przemieszczania się roztworu w kolumnie rur okładzinowych w m/godz.

$V_1$  — prędkość przemieszczania się roztworu cementowego poza kolumną rur okładzinowych w m/godz.

$c$  — pojemność cieplna roztworu cementowego w kcal/kg°C,

$H$  — głębokość otworu w m.

Temperaturę roztworu cementowego w ciągu czasu  $\tau$  można określić wg następującej zależności:

$$t = t_1 - \frac{t_2 - t_1}{H} \cdot z - \Delta t_0 \left( 1 - e^{-\frac{d^2}{16 a_0 \tau}} \right) \quad [4]$$

Temperaturę pierścienia cementowego  $t_{pc}$  po zakończeniu wiązania roztworu cementowego określa się następującą zależnością:

$$t_{pc} = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{H} \cdot z - \Delta t_0 \left( 1 - e^{-\frac{d^2}{16 a_0 \tau}} \right) + \Delta t_w \quad [5]$$

gdzie:  $d$  — średnica otworu w m,

$\Delta t_0$  — różnica temperatur skał i roztworu cementowego w początkowym okresie wiązania w °C,

$a_0$  — przewodność temperaturowa ośrodka w m<sup>2</sup>/godz.,

$\Delta t_w$  — przyrost temperatury cementu wywołany reakcją egzotermiczną wiązania cementu w °C,

Na ryc. 4 przedstawiono rozkład temperatur wzdłuż osi otworu w różnym okresie cementowania. Obliczenia wykonano według zależności (2) i (5) przy przyjęciu następujących danych:

$H = 3000$ m	$t_1 = 15^\circ\text{C}$
$r = 0,135$ m	$t_2 = 90^\circ\text{C}$
$a_0 = 5 \times 10^{-2}$ m <sup>2</sup> /godz.	$\tau = 6$ godz
$k = 4$ kcal/m <sup>2</sup> godz°C	$r_1 = 0,073$ m
$v_1 = 1,5$ m/sek	$r_k = 0,061$ m
$q_w = 3$ kcal/kg	$\gamma = 1,85$ g/cm <sup>3</sup>
$t_p = 20^\circ\text{C}$	$v_c = 1$ m/sek

Jak wynika z powyższych rozważań teoretycznych popartych obliczeniami okres wiązania roztworu cementowego z wodą bez opóźniaczy lub przyspieszaczy reakcji wynosi od 2 do 14 dni zależnie od asortymentu cementu; na kontakcie roztworu cementowego z płuczką wiertniczą okres ten jest jeszcze dłuższy.

#### Fizyczne podstawy interpretacji krzywych profilowania akustycznego do oceny jakości cementacji rur okładzinowych.

Przy profilowaniu akustycznym PA do oceny jakości cementacji rur okładzinowych rejestruje się amplitudę fali załamanej rozchodzącej się po rurze okładzinowej, a także czas rozchodzenia się drgań

sprężystych. Na ryc. 5 przedstawiono schematycznie drogę rozchodzenia się fal sprężystych przy profilowaniu akustycznym oraz charakterystyczne impulsy przebiegające po rurze okładzinowej. W związku z tym, że przy wzbudzaniu i odbiorze drgań sprężystych przekształtnikami magnetostrykcyjnymi i piezoceramicznymi pierwsze fazy impulsów są małe w stosunku do następnych, przy profilowaniu akustycznym wykonywanych do oceny jakości cementacji rur okładzinowych wykorzystuje się rejestrację drgań o danym natężeniu, niezależnie od ich fazy. Również w profilowaniu akustycznym wykonywanym do kontroli jakości cementacji rur okładzinowych wykorzystuje się zjawisko tłumienia fal sprężystych. Np. w przypadku zacementowanej kolumny rur okładzinowych tłumienie jest znacznie większe niż w niezacementowanej lub w kolumnie, w której pierścień cementowy nie jest związany z rurą okładzinową.

Dla dokładnej interpretacji wykresów PA punktowo wykonuje się rejestrację przebiegów sygnału akustycznego, które w otworach zarurowanych i zacementowanych posiadają charakter skomplikowany. Istniejące sondy do wykonywania PA w celu określenia jakości cementacji rur okładzinowych wzbudzają drgania sprężyste w przedziale częstotliwości 2—30 KHz, przy czym długość fali w materiale, z którego wykonana jest kolumna rur okładzinowych wynosi od 19 do 300 cm, w pierścieniu cementowym od 12 do 170 cm, a w cieczy wypełniającej otwór od 5 do 75 cm. Z powyższego wynika, że długości fal znacznie przewyższają grubość rury okładzinowej, pierścienia cementowego, jak i średnicę otworu. Przy takich zależnościach długości fal rurę okładzinową, jak i pierścień cementowy można rozpatrywać jako cienkie warstwy cylindryczne w przestrzeni sprężystej. Na podstawie prac modelowych wykonanych przez Krauklisa i Mołotkowa ustalono charakterystyczne przebiegi sygnału akustycznego w otworach zarurowanych o różnej jakości cementacji rur okładzinowych. Przebiegi te przedstawiono na ryc. 6 dla następujących przypadków, a mianowicie:

- 1) niezacementowanej rury okładzinowej — ryc. 6a,
- 2) niskiej jakości wiązania pierścienia cementowego — ryc. 6b,
- 3) dobrej jakości wiązania pierścienia cementowego z rurą okładzinową — rys. 6c w trzech wariantach:
  - 1) gdy  $C_s < C_r$ ,
  - 2) gdy  $C_s > C_r$ ,
  - 3) gdy  $C_s = C_r$ .

gdzie:  $C_s$  — prędkość rozchodzenia się drgań sprężystych w skale,

$C_r$  — prędkość rozchodzenia się drgań sprężystych po rurze okładzinowej.

#### Ocena jakości cementacji rur

Ocenę jakości cementacji rur 6 5/8" na podstawie profilowania akustycznego dla otworów L-1 i A-5 oparto na zapisie krzywej czasu rozchodzenia się drgań sprężystych zarejestrowanych sondą jednodzielną następujących typów: SPG-2 i SPG-1/69 o bazach pomiaru odpowiednio:  $L_1 = 1,00$  m,  $L_2 = 1,77$  m oraz rejestracji 1,0 m przebiegu sygnału akustycznego.

W otworze L-1 na podstawie zarejestrowanej krzywej czasu w przedziale głębokościowym 1808—1302 m i wykonanych zdjęć przebiegu sygnału akustycznego od głębokości 1712—1302 m w odstępach głębokościowych co 10 m stwierdza się strop pierścienia cementowego w głębokości 1565 m oraz dobrą jakość cementacji rur okładzinowych w przedziale głębokościowym od 1752 do 1707 m. Przedział głębokościowy od 1707 do 1565 m jest również dobrze zacementowany, zaś zmiana charakteru w zapisie krzywej czasu wywołana jest podwójną kolumną rur okładzinowych. natomiast przedstawione przebiegi sygnału akustycznego w przedziale głębokościowym od 1702 do 1552 m są charakterystyczne dla dobrego

związania cementu z rurami okładzinowymi. Charakter przebiegu sygnału akustycznego w powyższym przedziale głębokościowym jest znamieny dla ośrodka skalnego, którego prędkość rozchodzenia się fali sprężystej jest wyższa lub równa prędkości fali sprężystej przechodzącej po rurze okładzinowej. Powyższą prawidłowość potwierdza przewiercony profil litologiczny.

W przedziale głębokościowym 1702—1552 m przewiercone skały m.in. dewonu górnego — famenu górnego są reprezentowane serią piaskowców kwarcowych o lepizsczu krzemionkowym, posiadające bardzo niskie własności zbiornikowe, zaś powyżej głębokości 1552 m, tj. w przedziale 1552—1302 m zalegają utwory mułowcowo-ilasto-piaskowcowe dewonu górnego i karbonu dolnego, przy czym wkładki piaskowców występują sporadycznie. Wkładki piaskowców posiadają lepsze własności zbiornikowe w odniesieniu do niższego kompleksu piaskowców. Utwory te zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami interpretacji krzywych profilowania akustycznego charakteryzują się zmniejszonymi prędkościami rozchodzenia się drgań sprężystych.

2. Na podstawie krzywej czasu zapisanej w przedziale głębokościowym od 1605—798 m i wykonanych zdjęć przebiegu sygnału akustycznego w otworze A-5 na głębokościach: 1515 m, 1485 m, 1475 m, 1450 m, 1425 m, 1300 m, 1280 m, 1250 m, 1225 m, 1200 m, 1190 m, 1175 m, 1140 m, 1130 m, 1100 m i 1075 m stwierdza się strop pierścienia cementowego na głębokości 1075 m.

Niezależnie od stwierdzenia stropu pierścienia cementowego w przedziale głębokościowym 1605—1075 m wyróżnia się odcinki o dobrej i niskiej jakości cementacji rur okładzinowych. Przebiegi sygnału akustycznego zarejestrowane na głębokościach: 1515 m, 1485 m, 1475 m, 1100 m i 1075 m, są charakterystyczne dla przypadku dobrego związania cementu z rurą okładzinową, pozostałe zaś z wyjątkiem przebiegów zarejestrowanych w głębokościach 1280 i 1300 m świadczą o szczelnym wypełnieniu cementem przestrzeni między rurami okładzinowymi, natomiast przebiegi sygnału akustycznego na głębokościach 1280 i 1300 m są charakterystyczne dla braku cementu w przestrzeni pozarurowej lub nie związania pierścienia cementowego z rurą okładzinową.

#### UWAGI I WNIOSKI

1. Dla poprawnego określenia wysokości wytlóczenia roztworu cementowego poza kolumnę rur okładzinowych, w szczególności przy zapuszczaniu rur okładzinowych do głębokości około 2000—3200 m i wytlóczeniu roztworu cementowego na głębokość około 1000 m od wierzchu, optymalny czas do uzyskania właściwych danych do określenia stropu cementu poza kolumną rur okładzinowych wynosi 10—12 dni przy stosowaniu profilowania termicznego.

#### SUMMARY

Thermic logging presently used in determining the altitude to which cement solution was squeezed up outside the well casing is discussed. Some factors influencing the magnitude of geothermal anomaly originating during fixation of cement solution are characterized. The problem of selecting an optimum time of thermic logging is presented on the basis of the example of two boreholes. The time of thermic logging considered as optimum for determining the altitude to which cement solution had been squeezed up was selected on the basis of an analysis of the effect of temperature factors active during cementation of the well casing and the interpretations of acoustic logging curves for the two boreholes.

2. Do tej pory wykonawstwo pomiarów termicznych przeprowadzane było niewłaściwie, gdyż uważano, iż maksymalny czas związania roztworu cementowego wynosi jedynie do 72 godzin. Jak stwierdzili autorzy czas związania cementu (zwłaszcza na kontakcie płuczki z roztworem cementowym) jest znacznie dłuższy i waha się od 240—288 godzin.

Niejednokrotnie wykonane profilowania termiczne do określenia stropu cementu było podstawą do prowadzenia różnych prac technicznych w otworach wiertniczych, m.in. wycinania zapuszczonych rur i docementowywania rur okładzinowych. Taki stan rzeczy prowadził niejednokrotnie do niewykonania zaplanowanych prac z powodu niewłaściwego stwierdzenia stropu cementu. Jest znanych wiele przykładów z otworów odwierconych przez górnictwo naftowe z rejonu Przedgórze Karpat i Niżu Polskiego, gdzie spotykano wymienione przypadki.

3. Jak wynika z przytoczonych faktów wykonanie profilowania termicznego w okresie od 24 do 72 godzin od czasu zakończenia cementowania daje niewłaściwe wyniki. W związku z powyższym zaleca się nie stosowanie profilowania termicznego we wspomnianym okresie, gdyż zwiększa to jedynie koszty wiercenia, a zastąpienie go profilowaniem akustycznym.

4. Było to ponadto przyczyną strat przedsięwzięcia geofizycznych (zbędne przejazdy grup pomiarowych na otwory wiertnicze, praca tych grup niekiedy w dniach świątecznych i wolnych od pracy, przerywanie pomiarów geofizycznych w innych otworach i spowodowane tym stójki itp.).

#### LITERATURA

1. Anderson W. L., Walker T. — Research predicts improved cement bond evaluations with acoustic logs. J. Petrol. Technol. 1961, Vol. 13, No. 11
2. Dachnow W. N., Diakonow D. I. — Termicheskie issledowanija skwaziń. Gostoptiechizdat, 1958.
3. Grosmanin M. — A sonic method for analysing the quality of cementation of horehole casing. J. Petrol. Technol., 1961, Vol. 13, No. 2.
4. Kuliew S. M., Esman B. I., Gabuzow G. G. — Temperaturnyj režim buriaszczichsja skwaziń. Niedra, 1968.
5. Plewa S. — Geofizyka wiertnicza. Wyd. Geol., 1970.
6. Winn R. H. — A preliminary study of factors influencing cement bond logs. J. Petrol. Technol. 1962, Vol. 14, No. 4.

#### РЕЗЮМЕ

В статье рассмотрены проблемы применения термического профилирования для определения высоты подъема цементного раствора за колонной обсадных труб, с учетом некоторых факторов, влияющих на величину геотермической аномалии, возникающей во время схватывания цементного раствора. На примере двух буровых скважин рассмотрен вопрос о правильном выборе времени термического профилирования для решения упомянутой задачи. С целью подтверждения сделанных выводов относительно времени термического профилирования при определении высоты подъема цементного раствора за обсадными трубами анализируется влияние температурных факторов при цементации обсадных труб и приводятся данные интерпретации кривых акустического профилирования этих двух скважин.