

AKUSTYCZNIE STYMULOWANE PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE OBSERWOWANE W OŚRODKACH POROWATYCH NASYCONYCH WODĄ LUB ROPĄ

**Acoustically stimulated electromagnetic radiation of water
or hydrocarbon saturated porous media**

Jerzy SOBOTKA

*Uniwersytet Wrocławski, Wydział Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Geologicznych;
ul. Cybulskiego 32, 50-203 Wrocław; e-mail: jertzysob@ing.uni.wroc.pl*

Treść: Przedstawiono wyniki badań zjawiska generacji wtórnego pola elektromagnetycznego w nasyconych skałach zbiornikowych znajdujących się pod wpływem drgań sprężystych. Ośrodek geologiczny, np. porowate, nasycone skały osadowe, składa się z szeregu energetycznie aktywnych elementów. Oznacza to możliwość wyprowadzenia ich ze stanu równowagi energetycznej przez doprowadzenie dodatkowej energii zewnętrznej (np. akustycznej), co w konsekwencji powoduje reakcję systemu w postaci, między innymi, wtórnego promieniowania elektromagnetycznego. Charakter promieniowania (amplituda, widmo częstotliwościowe, charakterystyki czasu) w dużej mierze uzależnione są od własności fizykochemicznych fazy stałej oraz nasycającego medium. W skałach nasyconych ropą generowane impulsy charakteryzują się podwyższonymi częstotliwościami i małymi amplitudami w porównaniu ze skałami nasyconymi wodą. Na podstawie badań teoretyczno-eksperymentalnych został udowodniony rezonansowy charakter tego zjawiska. Otrzymane wyniki wskazują na możliwość opracowania nowej diagnostycznej metody geofizyki poszukiwawczej.

Słowa kluczowe: pole ultradźwiękowe, promieniowanie elektromagnetyczne, ciecz porowa, skała osadowa, geofizyka poszukiwawcza

Abstract: Physical properties of saturated porous media are unstable, which can be related to changes in their internal energy due to e.g. changes of acoustic pressure. Such processes usually are accompanied by electromagnetic radiation, parameters of which must be in strong relation to physical properties of rocks and the type of pore liquid. Results of experimental studies of electromagnetic radiation parameters of saturated sedimentary rock samples and borehole models in a powerful ultrasonic field are presented. It is shown that the amplitude of electromagnetic radiation induced in rock samples, saturated with electrolyte (NaCl solution) and subjected to a field of ultrasonic energy, increases dramatically compared to the amplitude of electromagnetic radiation induced in the same samples saturated with petroleum. The described results suggest that the field of ultrasonic energy alters the electromagnetic radiation of rock in various ways, depending on the type of pore liquid and on the relation between the liquid and the solid phases. A theoretical model explaining the obtained experimental results is proposed. Such behaviour of a multiphase system under the influence of an ultrasonic field enhances the informative possibilities of the methods of borehole logging and suggests possibilities of inventing new methods in geophysical prospecting.

Key words: ultrasonic field, electromagnetic radiation, pore liquid, sedimentary rock, geophysical prospecting

WSTĘP

Powstaniu deformacji w nasyconym ośrodku porowatym towarzyszy szereg efektów wtórnych, w tym emisja promieniowania elektromagnetycznego (EMP). EMP w większości przypadków jest rozpatrywane jako jeden ze wskaźników aktywności sejsmicznej Ziemi lub, bardziej ogólnie, jako parametr odzwierciedlający mechaniczne naprężenia powstające w badanym ośrodku (Lonz & Rivers 1975, Perelman & Chatiaszvili 1983, Migunov 1984, Gress *et al.* 1987, Chatiaszvili & Perelman 1988, Prałat *et al.* 2003). Jednakże w literaturze tego tematu brakuje danych o związku EMP z litologiczno-petrofizycznymi właściwościami skał osadowych i typem mediów nasycających, co z punktu widzenia geofizyki poszukiwawczej byłoby bardzo interesujące. Uważa się, że w większości przypadków powstanie wtórnego EMP jest spowodowane zbiorowym wzbudzeniem licznych lokalnych, mechaniczno-elektrycznych przetworników (MEP). Mechanizm wzbudzenia MEP jest tłumaczony osiągnięciem poziomu progowego mechanicznego naprężenia badanego ośrodka, znajdującego się w zasięgu oddziaływania pola mechanicznego (Gochberg *et al.* 1988).

W pracy Perelman & Chatiaszvili (1981) przeanalizowano niektóre możliwe przyczyny powstania EMP, spowodowane propagacją fal sprężystych w krystalicznych dielektrykach. Stwierdzono, że w podobnych substancjach, poddanych działaniu względnie słabego pola ultradźwiękowego, dochodzi do powstania oraz drgania naładowanych dyslokacji liniowych, a przy większym natężeniu pola – do zbliżania i wzajemnego oddalania fluktuacyjnie naładowanych brzegów mikropeknięć.

Generowanie EMP, w trakcie oddziaływania fali ultradźwiękowej na dielektryki, może być skutkiem zjawisk związanych z:

- typem sieci krystalicznej (elektrostrykcja, efekt piezoelektryczny);
- defektami sieci krystalicznej;
- podsystemem elektronów (akustyczna siła elektromotoryczna);
- drganiami dyslokacyjnymi.

Jednakże w systemach heterofazowych, jakimi są skały osadowe, wyżej wymienione procesy nie mogą być odpowiedzialne za generowanie EMP. W takich ośrodkach istnieją mikrosystemy z rozdzielonymi ładunkami elektrycznymi, znajdujące się na granicach fazy stałej i cieczy, oraz ośrodki kontaktowej różnicy potencjałów na granicach fazy stałej. Uważa się (Perelman & Chatiaszvili 1983), że mechanizm powstania wtórnego promieniowania EMP w skałach osadowych wiąże się z aktywacją procesów dyfuzyjno-adsorpcyjnych, naruszeniem stanu energetycznej równowagi systemu ciecz – faza stała w polu fal sprężystych (powstanie ruchu ładunków elektrycznych powiązanych z fazą ciekłą) oraz ze zmianami zachodzącymi w podwójnej warstwie elektrycznej (PWE). Gdy na PWE pada podłużna fala sprężysta, to w stadium rozciągania systemu jego energia wzrasta, a w stadium ściskania – zmniejsza się. Przy tym nadwyżka energii może być wydalona częściowo w postaci energii cieplnej, a częściowo w postaci energii elektromagnetycznej (wtórnego promieniowania EMP). Perelman & Chatiaszvili (1983) uważają, że intensywność wtórnego promieniowania elektromagnetycznego, w zależności od częstotliwości pola akustycznego, jest maksymalna na własnych rezonansowych (mechanicznych) częstotliwościach badanej próbki, a także na częstotliwości i harmonikach pola pobudzającego (akustycznego).

Oddziaływanie fali akustycznej o pewnej częstotliwości powinno mieć preferencyjny wpływ na pewną grupę nośników ładunku elektrycznego, różniącą się przede wszystkim swym położeniem w fazie granicznej i, odpowiednio, swą energią. Drgania o niskiej częstotliwości (dziesiątki Hz) powinny mieć swój wpływ głównie na niskoenergetyczne ładunki warstwy dyfuzyjnej, co w konsekwencji spowoduje powstanie słabych impulsów wtórnego EMP. Przy większych częstotliwościach pola (kHz), do formowania wtórnego sygnału włączane są bardziej uporządkowane ładunki elektryczne, charakteryzujące się wysoką energią własną, co powoduje powstanie promieniowania o większej intensywności.

W pracy Perelman & Chatiaszwili (1981) omawiane jest zagadnienie generowania EMP przy powstaniu pęknięć w ciałach stałych oraz przy rozerwaniu się cieczy (w szczególności podczas tworzenia się pęcherzyków) i sumaryczny wkład tych zjawisk w ogólne natężenie pola elektromagnetycznego, powstającego w trakcie trzęsienia ziemi (lub przed nim).

Podczas ruchu ładunków elektrycznych względem nieruchomego ośrodka, periodycznych drgań momentów dipolowych oraz przy przemieszczaniu się części ośrodka z rozdzielonymi ładunkami elektrycznymi mechanizmy generowania EMP są związane z naelektryzowaniem ścianek pęknięć i dynamiką ich ruchu względem siebie (Sobolev *et al.* 1975).

Znane jest też odwrotne zjawisko: w zmiennym polu elektrycznym w PWE powstają efekty elektrostrykcyjne, co wiąże się z generowaniem w takim ośrodku pola ultradźwiękowego (Perelman & Chatiaszwili 1983).

Ośrodek geologiczny, np. porowate, nasycone skały osadowe, składa się z szeregu energetycznie aktywnych elementów. Oznacza to możliwość wyprowadzenia ich ze stanu równowagi energetycznej przez doprowadzenie dodatkowej energii zewnętrznej (np. akustycznej), co w konsekwencji powoduje reakcję systemu w postaci, między innymi, wtórnego promieniowania elektromagnetycznego. Wydaje się możliwa diagnostyka właściwości petrofizycznych, nasyconych, heterofazowych ośrodków (skał) poprzez badanie charakterystyk wtórnego EMP, powstającego na skutek propagowania w nich fali sprężystej. Charakter promieniowania (amplituda, widmo częstotliwościowe, charakterystyki czasowe) w dużej mierze powinien być uzależniony od własności fizykochemicznych fazy stałej oraz nasycającego medium. Można zatem sądzić, że istnieją dostateczne podstawy fizyczne dla dalszego rozwoju aktywnych metod geofizycznych, których charakterystyczną cechą byłaby aktywacja badanego ośrodka polem jednego typu fizycznego, a rejestracja reakcji ośrodka w innym polu. A zatem, proponowana para pól: pole akustyczne – pole elektryczne, wydaje się bardzo obiecująca, jeśli chodzi o możliwość stworzenia nowych metod geofizyki poszukiwawczej.

STANOWISKO POMIAROWE

W celu ustalenia związku parametrów sygnałów wtórnego promieniowania elektromagnetycznego z charakterystykami petrofizycznymi próbek skalnych autor skonstruował stanowisko pomiarowe, którego schemat blokowy przedstawia figura 1.

Podstawową częścią elektroniczną omawianego stanowiska są przedwzmacniacz (4) i wzmacniacz-przetwornik (5), pracujące w następujący sposób: przyjęty przez antenę (2)

sygnał podawany jest na wejście różnicowego wzmacniacza ze współczynnikiem wzmocnienia równym 1 (tranzystory T1–T3), gdzie odejmuje się niezgodną w fazie składową sygnału. Następnie w sekcji wzmacniaczy buforowych (mikroobwód A1–A2) sygnał jest wzmacniany do wartości otwierającej tranzystor T4, który, razem z diodą świetlną D1, spełnia funkcję przetwornika sygnału elektrycznego w jego świetlny odpowiednik. Przetworzony sygnał rozprzestrzenia się wzdłuż światłowodu SW-1. Za pomocą dokładnego ekranowania i uziemienia obwodów elektrycznych zapobiega się przenikaniu do dalszej elektronicznej części stanowiska pomiarowego zakłócających sygnałów. Na końcu światłowodu umieszczona jest fotodioda D2 pełniąca rolę odwrotnego przetwornika impulsu świetlnego w jego elektryczny odpowiednik. Następnie sygnał jest wzmacniany różnicowym wzmacniaczem z regulowanym współczynnikiem wzmocnienia (mikroobwód A3). Końcowy sygnał jest podawany na wejście oscyloskopu z pamięcią (6) podłączonego do komputera PC (7), wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie. Rolę anteny (2) znajdującej się w uziemionym, aluminiowym pudełku ekranującym spełnia obwód rezonansowy, przestrajany w rezonans do częstotliwości promieniowania ultradźwiękowego za pomocą bloku kondensatorów o różnej pojemności.

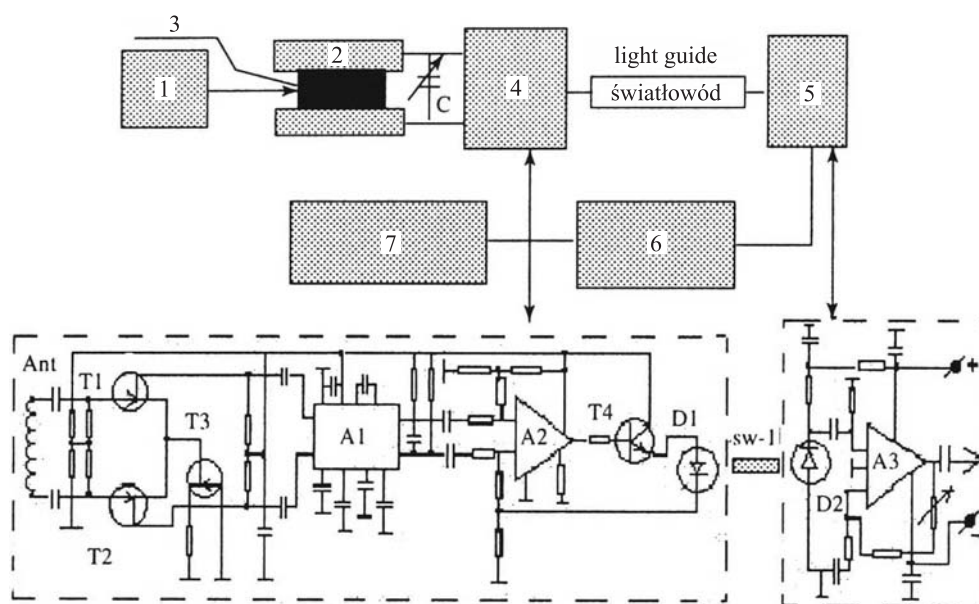


Fig. 1. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego: 1 – generator ultradźwięku z głowicą, 2 – antena, 3 – próbka skalna, 4 – przedwzmacniacz, 5 – wzmacniacz-przetwornik, 6 – oscyloskop z pamięcią, 7 – komputer PC

Fig. 1. Diagram of the laboratory installation: 1 – the transducer of magneto-electrostriction, 2 – antenna, 3 – the sample of rock, 4 – initial amplifier, 5 – amplifier-transducer, 6 – oscilloscope with memory, 7 – PC-computer

Liczba zwojów obwodu rezonansowego (solenoidu) została obliczona według wzoru (Goncarskij *et al.* 1969)

$$\omega = \sqrt{\frac{L(3D_k + 9l + 10t)}{0.08D_k^2}} \quad (1)$$

gdzie:

- L – indukcyjność [μH],
- l – długość zwoju [cm],
- t – grubość obwodu [cm],
- D_k – średnica obwodu [cm],
- ω – liczba zwojów.

W niektórych przypadkach była także wykorzystywana antena typu toroidalnego (Migunov *et al.* 1976). Jako źródło ultradźwięków stosowano przetwornik magnetostrykcyjny UZDN-1 (1 – Fig. 1) o maksymalnej mocy do 100 W/cm^2 , ze zmiennymi głowicami przetwarzającymi, pracującymi na częstotliwościach 15, 22, 35 kHz. W trakcie badań głowica przetwornika magnetostrykcyjnego kontaktowała z badaną próbką za pośrednictwem cienkiej przejściówki (mika) z warstwą wazeliny silikonowej, zastosowanej do zapewnienia dokładnego kontaktu akustycznego. Do przeprowadzenia doświadczeń temperaturowych skonstruowano blok grzewczy, umożliwiający kontrolowane podgrzewanie próbki bezpośrednio wewnątrz anteny odbiorczej.

METODYKA BADAŃ

Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano odpowiednio przygotowane próbki skalne o różnej litologii (długości 80 mm oraz średnicy 30 mm), nasycone metodą standardową wybranymi cieczami (roztwór NaCl koncentracji 0.1–12%, ropą naftową, pobraną z różnych otworów, oraz bezwodny olej napędowy). Aby zapobiec wyschnięciu powierzchniowemu, próbki były pokryte cienką, elastyczną powłoką, pozostawiającą nieosłoniętą jedynie część kontaktującą z przejściówką. Próbki umieszczano wewnątrz anteny (obwodu rezonansowego) i wprowadzano w kontakt z głowicą ultradźwiękową. Natężenie pola ultradźwiękowego, w przypadku badania oddzielnych próbek skalnych, nie przewyższało wartości 50 W/cm^2 . Pomiary wykonywano w trybie ciągłym, jednocześnie automatycznie rejestrując generowane sygnały wtórne EMP (Sobotka 1994).

Doświadczenia przeprowadzono także z wykorzystaniem modelu otworu wiertniczego (Sobotka *et al.* 1991). W badaniach tych został wykorzystany analog sondy indukcyjnej (solenoid nadawczy zastąpiono przetwornikiem magnetostrykcyjnym), równomiernie przemieszczającej się wzdłuż modelu za pomocą specjalnego mechanizmu ciągnącego. Eksperymenty przeprowadzono w dwóch wariantach rozmieszczenia sondy pomiarowej oraz głowicy ultradźwiękowej. W pierwszym z nich ultradźwiękowa stymulacja odbywała się poprzez „płuczkę” (przetwornik magnetostrykcyjny znajdował się w środku modelu i synchronicznie przemieszczał się z anteną, znajdującą się na zewnątrz modelu). W drugim

przypadku zahermetyzowana klejem epoksydowym antena znajdowała się w środku modelu, a głowica ultradźwiękowa kontaktowała się z badanym fragmentem modelu od strony zewnętrznej (Fig. 2). Jak się okazało w trakcie eksperymentów, metodyka pomiarowa z wykorzystaniem zewnętrznego ułożenia głowicy ultradźwiękowej jest bardziej efektywna, ponieważ w tym przypadku zwiększa się selektywność badanego sygnału. Dlatego też dalsze badania przeprowadzono z zastosowaniem właśnie takiej metodyki. Zarejestrowane sygnały porównywano według ich amplitud oraz morfologii (charakteru zmian krzywych), wyznaczając wpływ właściwości badanej próbki skalnej na parametry wtórnego EMP.

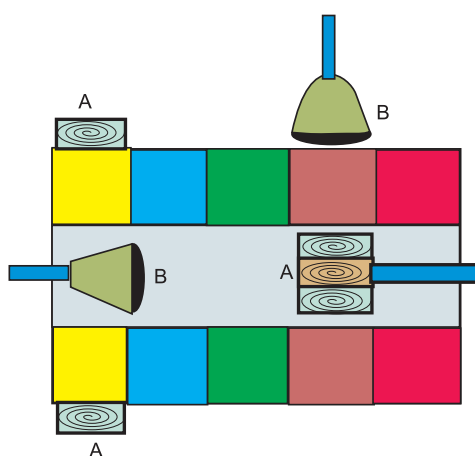


Fig. 2. Warianty rozmieszczenia głowicy ultradźwiękowej oraz anteny odbiorczej w modelu otworu wiertniczego: A – antena, B – głowica ultradźwiękowa

Fig. 2. Transducer of magneto-electrostriction and antenna arrangement inside the borehole model: A – antenna, B – transducer of magneto-electrostriction

OTRZYMANE WYNIKI

W trakcie przeprowadzonych badań EMP zarejestrowano przy ultradźwiękowym napromieniowaniu próbek skalnych nasyconych w pełni. W niektórych wypadkach EMP było obserwowane także przy oddziaływaniu pola sprężystego na próbki, które celowo nie były w pełni nasycone. Wówczas amplituda sygnałów EMP była znacznie mniejsza w porównaniu z amplitudą sygnałów EMP otrzymanych z identycznych próbek nasyconych. Zjawisko to może być wytłumaczone obecnością w porach skalnych wilgotności resztkowej, wystarczającej do wywołania procesów generujących wtórne EMP. Potwierdzeniem tego mechanizmu może być fakt, że sygnałów EMP nie zarejestrowano w wypadku wysuszonych próbek skalnych (uprzednio znajdujących się przez 5 godzin w wysokiej temperaturze (ok. 105°C) w suszarce laboratoryjnej).

Wyniki badań otrzymane dla próbek o różnej porowatości wykazują zależność amplitudy wtórnego EMP od tego charakterystycznego parametru skały, a mianowicie przy zwiększeniu otwartej porowatości (w przedziale 3–25%) amplituda badanego sygnału nieliniowo wzrasta (Fig. 3).

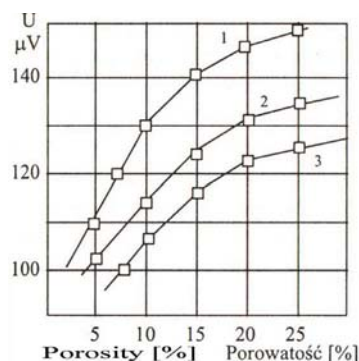


Fig. 3. Wpływ porowatości próbek skalnych (nasylenie roztworem soli 2%) na amplitudę sygnałów wtórnego EMP dla różnych częstotliwości ultradźwięku: 1–35 kHz, 2–22 kHz, 3–15 kHz

Fig. 3. The influence of rock samples porosity on the magnitude of secondary electromagnetic radiation for the different ultrasonic frequencies (2% NaCl saturation): 1–35 kHz, 2–22 kHz, 3–15 kHz

Podczas zwiększania zawartości składnika pelitycznego w próbkach (dla jednolicie nasyconych próbek) można zauważyć nieliniowe zmniejszenie amplitudy sygnałów EMP. Zmiana koncentracji nasycającego roztworu wpływa na amplitudę wtórnych sygnałów następująco: w przedziale koncentracji 0.1–0.9% obserwuje się liniowy wzrost, przy koncentracji 1–10% amplituda wzrasta nieliniowo, a dla koncentracji 10.1–11% obserwuje się nasycenie (asymptotę) badanego sygnału, później, w miarę dalszego zwiększania koncentracji, intensywność generowanych sygnałów zaczyna stopniowo maleć. Obserwowane zjawisko zależności intensywności sygnałów EMP od koncentracji medium da się wyjaśnić zmianami odbywającymi się w podwójnej warstwie elektrycznej (PWE) w trakcie oddziaływania na nią fali sprężystej. Energia elektrostatyczna PWE jest wprost proporcjonalna do powierzchniowej gęstości ładunków elektrycznych σ_i (Czelidze *et al.* 1977, Perelman & Chatiasvili 1983). Wzrost σ_i powoduje jednoczesny wzrost natężenia prądu, ale tylko w pewnym przedziale koncentracji. Przy znacznym wzroście koncentracji nasycającej cieczy, dyfuzyjna warstwa w PWE zmniejsza się, ilość ładunków wyniesionych poza granice tej warstwy także maleje, wskutek czego zmniejsza się intensywność generowanych sygnałów wtórnego EMP. Badanie zależności amplitudy EMP od częstotliwości pola ultradźwiękowego wykazało nieliniowy jej wzrost w przedziale częstotliwości 15–35 kHz, co zgadza się z teoretycznymi obliczeniami podanymi w pracach Perelman & Chatiasvili (1983) oraz Gochberg *et al.* (1988).

Niestety z powodu braku odpowiednich urządzeń wystarczającej mocy nie udało się przeprowadzić badania wykorzystującego niskie częstotliwości pola akustycznego.

W trakcie oddziaływania silnego pola ultradźwiękowego (30–50 W/cm²) obserwuje się znaczny wzrost temperatury badanej próbki, co wpływa na gęstość cieczy porowej, ruchliwość ładunków elektrycznych i zmienia parametry PWE w całości. Dlatego dodatkowo przeprowadzono badanie wpływu temperatury na charakter emitowanych sygnałów EMP. W przedziale temperatur 20–100°C zaobserwowano nieliniowe zmniejszanie amplitudy badanych sygnałów, co tłumaczy się zmniejszeniem energii aktywacji jonów tworzących okładki PWE podczas wzrostu temperatury i zwiększeniem ich ruchliwości, co w konsek-

wencji zwiększa prawdopodobieństwo ich przejścia do warstwy dyfuzyjnej. Tym samym zmniejsza się ilość aktywnych cząsteczek zdolnych do generowania EMP, co w ostateczności powoduje spadek amplitudy badanego sygnału. Z przeprowadzonego doświadczenia temperaturowego wynika wniosek o konieczności stabilizacji termicznej badanych ośrodków w polu ultradźwiękowym, w celu wyeliminowania wpływu temperatury na obserwowane zjawisko. Podczas pomiarów w głębokich otworach, w rejonach o wysokim stopniu geotermicznym wysoka temperatura ośrodka skalnego może powodować obniżenie poziomu mierzonego sygnału.

Dalsza część badań została przeprowadzona z wykorzystaniem jednolitych modeli piaszczystych oraz modelu otworu wiertniczego. Natężenie pola ultradźwiękowego zwiększono do 80 W/cm^2 .

Na figurze 4 przedstawiono przykład otrzymanych sygnałów wtórnego EMP dla modelu piaszczowego nasyconego 1,5-procentowym roztworem soli kuchennej w proporcji 1:10 (krzywa 1) i dla identycznego modelu, zawierającego ropę naftową, w takiej samej proporcji (krzywa 2). W pierwszej kolejności należy podkreślić znaczną różnicę w morfologii otrzymanych krzywych dla modeli nasyconych wodą i ropą. Sygnały EMP w przypadku nasyce-
nia ropą charakteryzują się bardziej skomplikowanym kształtem i są modulowane drganiami o wyższej częstotliwości oraz wykazują obniżoną amplitudę w porównaniu do sygnałów otrzymanych w modelu nasyconym roztworem soli kuchennej. Jednak przy dłuższym (ponad 4–5 minut) napromieniowaniu ultradźwiękowym modelu ropnego intensywność generowanych sygnałów nieco wzrasta. Ten wzrost ma gwałtowny charakter, przy czym zanika charakterystyczna modulacja sygnału drganiami o wyższej częstotliwości. Obserwowane zjawisko tłumaczy się zwiększeniem ilości swobodnych rodników w ropie pod wpływem energii ultradźwiękowej (Petkiewicz *et al.* 1989, Sobotka 1992).

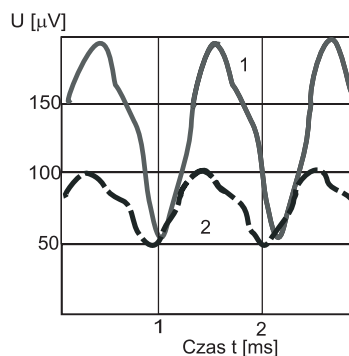


Fig. 4. Krzywe sygnałów wtórnego EMP otrzymane dla piaszczowego modelu skały nasyconego wodą (1) oraz ropą (2)

Fig. 4. Secondary electromagnetic radiation received for sandstones model of rock saturated by soil solution (1) and hydrocarbon (2)

W modelu otworu nasyconego 5-procentowym roztworem NaCl badania częstotliwościowe także wykazały wzrost amplitudy EMP przy przejściu do wyższych częstotliwości ultradźwięku (15–35 kHz). W warstwach o podwyższonej porowatości, analogicznie jak

przy badaniach na oddzielnych próbkach skalnych, zaobserwowano zwiększenie amplitudy generowanych sygnałów. W przypadku warstw zawierających znaczną ilość substancji ilastej, obserwowano nieliniowy spadek amplitudy EMP. Tak na przykład, dla jednolicie nasyconego fragmentu modelu, zawierającego 5% składnika pelitycznego ($f = 35$ kHz, $P = 70$ W/cm²), intensywność sygnału była równa 146 μ V, a w wypadku fragmentu tego samego modelu zawierającego 35% iłu amplituda sygnału obniżyła się do 118 μ V (Tab. 1).

Tabela (Table) 1

Przykładowe amplitudy wtórnego EMP, zarejestrowane dla poszczególnych fragmentów modelu otworu wiertniczego

Examples of the secondary EMI magnitudes received for the different parts of the borehole model

Numer próbki <i>Sample number</i>	Frakcja piasku [mm] <i>Grain size of sand [mm]</i>	Zawartość iłu [%] <i>Quantity of clay [%]</i>	Amplituda EMP [μ V] <i>EMI magnitude [μV]</i> ($f = 35$ kHz, $P = 25$ W/cm ²)			
			Nasycenie ropą <i>Oil saturated</i>		Roztwór NaCl <i>NaCl solution</i>	
			Ujęcie ropy w Boryslawiu (<i>Boryslav oilfield</i>) $R^* = 1.2 \cdot 10^{11} \Omega \cdot m$ $KCP^{**} = 10.67 \cdot 10^{17}$ $PCC^{**} = 10.67 \cdot 10^{17}$	Ujęcie ropy w Delatynie (<i>Delatyn oilfield</i>) $R^* = 7.8 \cdot 10^{10} \Omega \cdot m$ $KCP^{**} = 21.17 \cdot 10^{17}$ $PCC^{**} = 21.17 \cdot 10^{17}$	5%	1%
1	0.1	5	49	51	91	97
2	0.3	5	57	62	112	117
3	0.5	5	68	70	135	144
4	0.63	5	70	74	146	150
5	0.8	5	74	76	154	159
6	1.0	5	62	66	138	143
7	0.1	35	42	48	110	113
8	0.63	35	58	61	118	129
9	0.8	35	62	65	123	127
10	0.1–1.0	35	52	59	105	111

* oporność nasycającej ropy naftowej, **KCP – koncentracja centrów paramagnetycznych

* *oil resistivity*, **PCC – *paramagnetic centres concentration*

W modelu otworu, którego oddzielne fragmenty były nasycone roztworem soli kuchennej o różnej koncentracji (0.2–5%), podwyższonymi wartościami EMP charakteryzują się granice kontaktowe pomiędzy warstwami o podobnym składzie litologicznym, ale nasyconymi roztworem o odmiennej mineralizacji, przy czym w miarę zwiększania różnicy koncentracji amplituda rejestrowanych sygnałów wykazuje tendencję wzrostową. Zjawisko

to jest tłumaczone przyspieszeniem procesów wyrównania koncentracji w polu ultradźwiękowym oraz zmianami upakowania jonów PWE.

Analiza charakteru zmiany sygnałów wtórnego EMP zarejestrowanego wzdłuż modelu otworu składającego się z identycznych warstw wykazuje, że typ cieczy porowej ma decydujący wpływ na amplitudę generowanych sygnałów w trakcie ultradźwiękowego napromieniowania.

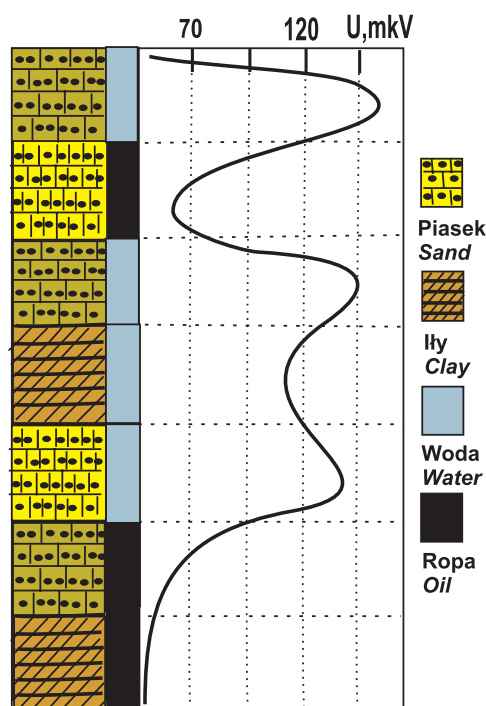


Fig. 5. Przykładowa krzywa „profilowania” wzbudzonych wtórnych EMP wzdłuż jednego z wariantów modelu otworu

Fig. 5. Example of secondary electromagnetic radiation received during borehole model logging

Na figurze 5 jest pokazana przykładowa krzywa „profilowania” EMP, zarejestrowana dla jednego z wariantów modelu otworu wiertniczego. W warstwach nasyconych ropą charakterystyczna jest znacznie obniżona amplituda generowanego EMP z „modulacją” sygnału drganiem o wyższej częstotliwości. Warstwy nasycone roztworem soli kuchennej charakteryzują się wysokimi wartościami EMP. Maksymalną amplitudę sygnałów EMP zaobserwowano dla fragmentów modelu zawierającego 10-procentowy roztwór soli NaCl, zbliżonych litologicznie do słabo zailonych, porowatych, średnioziarnistych piaskowców. Nasycenie ropą naftową całego modelu powoduje obniżenie amplitudy EMP do poziomu 10–20 μV , przy czym nie zaznaczają się granice pomiędzy sąsiednimi warstwami.

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów można stwierdzić, że parametry sygnałów EMP zależą od szeregu czynników charakteryzujących skałę:

- wykształcenia litologiczno-mineralogicznego,
- typu medium porowego,
- parametrów pola ultradźwiękowego.

Statystyczne opracowanie wyników badań wykonano za pomocą oprogramowania STATGRAPH. Poniżej opisano niektóre przykłady amplitudowej analizy wtórnego EMP z zastosowaniem modelu regresji liniowej.

W celu oceny możliwości prognozowania zbiornikowo-filtracyjnych właściwości skał na podstawie amplitud sygnałów wtórnego EMP wybrano 30 próbek skalnych piaskowców, na których przeprowadzono doświadczenia. Zbiór ten poddano analizie porównawczej według następujących parametrów: otwartej i ogólnej porowatości, logarytmu przepuszczalności absolutnej oraz wartości amplitudy EMP w przypadku nasycenia wodą złożową (1- i 5-procentowe roztwory NaCl) i ropą dla częstotliwości 22 i 35 kHz. Obliczono macierz korelacyjną. Otrzymano wysoki współczynnik korelacji pomiędzy otwartą i ogólną porowatością a logarytmem absolutnej przepuszczalności, co wskazuje na strukturalną jednorodność badanych próbek. Niezależnie od typu nasycenia, koncentracji elektrolitu oraz częstotliwości pola ultradźwiękowego, wszystkie amplitudy EMP charakteryzują się pozytywnymi współczynnikami korelacji o dużej wartości ze zbiornikowo-filtracyjnymi parametrami badanych próbek. Jednakże współczynnik korelacji amplitudy EMP z porowatością otwartą ($R \sim 0.95$) jest większy niż w przypadku porowatości ogólnej ($R \sim 0.84$), co jest zgodne z naturą generacji wtórnego EMP. Dla logarytmu przepuszczalności także otrzymano wysokie wartości współczynnika korelacji z amplitudą EMP ($R \sim 0.86$), jednak dla próbek skalnych danego zbioru o porowatości powyżej 20% zależność regresyjna nieco odchyła się od liniowej w stronę zmniejszenia amplitud EMP. Wynik ten może być wytłumaczony zwiększeniem ilości dużych porów, co w konsekwencji powoduje zmniejszenie powierzchni kontaktowej fazy stałej i ciekłej w przestrzeni porowej próbki skalnej. W wypadku znacznych amplitudowych wartości EMP (powyżej 120 μV) obserwuje się tendencję odchylenia punktów eksperymentalnych od linii regresji w stronę większych wartości logarytmu przepuszczalności.

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że do próbek skalnych danego zbioru, nasyconych wodą oraz ropą (dla porowatości 10–15%), jest możliwe wykorzystanie regresji liniowej w prognozowaniu zbiornikowo-filtracyjnych charakterystyk skał, w oparciu o wartości amplitudowe wtórnego EMP. W celu zwiększenia dokładności prognozowania, należy w przyszłości przeprowadzić analogiczne badania z wykorzystaniem próbek skalnych, charakteryzujących się większą zmiennością przestrzeni porowej oraz większym zróżnicowaniem litologicznym.

Przeprowadzona analiza statystyczna pokazuje także, że zadanie odróżnienia próbek skalnych na podstawie typu nasycającego medium z dostateczną dokładnością da się rozwiązać przez analizę amplitud sygnałów generowanego EMP. Analizie poddano średnie wartości amplitud EMP próbek nasyconych wodą oraz ropą, otrzymane przy częstotliwości ultradźwięku 35 kHz. Na figurze 6 pokazano histogram częstotliwościowy jako wynik przeprowadzonej analizy. Widoczne są minimalne nałożenia na siebie amplitud w przedzia-

le intensywności EMP 60–85 μV (obszar zaznaczony kolorem czarnym na rysunku). Jednakże główna część amplitud EMP w próbkach skalnych nasyconych wodą znajduje się w paśmie 90–150 μV , a w próbkach nasyconych ropą – w paśmie 30–90 μV . Można zatem stwierdzić, że analizując amplitudy EMP, przynajmniej z 3-procentową dokładnością, da się odróżnić próbki skalne nasycone wodą od próbek nasyconych ropą naftową.

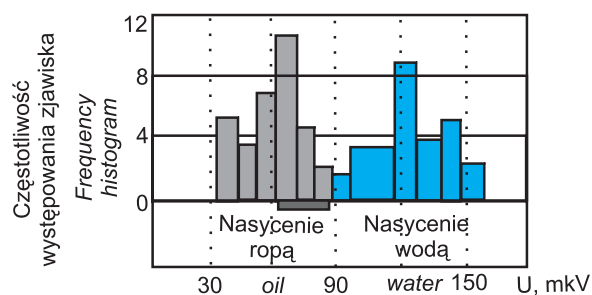


Fig. 6. Histogram częstotliwościowy amplitud wtórnego EMP w próbkach skalnych nasyconych ropą oraz wodą (objaśnienia w tekście)

Fig. 6. The frequency histogram of the secondary electromagnetic radiation signals magnitudes received for the rock samples saturated by soil solution and hydrocarbon (explanation in the text)

REZONANSOWE WZBUDZENIE WTÓRNEGO EMP W NASYCONYCH POROWATYCH OŚRODKACH (REZONANS POROWY)

Wyobraźmy sobie skalę z przestrzenią porową w postaci systemu kapilarnego, wypełnionego cieczą i wyodrębnijmy z tego systemu jedną kapilarę o długości L z powłoką dielektryczną o promieniu r . Średnia grubość warstwy dyfuzyjnej, utworzonej w kapilarze, będzie mniejsza od wartości jej promienia. W trakcie oddziaływania ultradźwiękowego na granice rozdziału ciecz – faza stała w kapilarze powstają mikroprądy przenoszące ładunki elektryczne oraz wzbudzające prądy cieczerwowe.

Przeprowadźmy teraz ocenę charakteru cieczy w porach skały w trakcie oddziaływania pola ultradźwiękowego. W tym celu niezbędne będzie obliczenie wartości liczb Reynoldsa dla cieczy w kapilarze. Biorąc pod uwagę rzeczywiste rozmiary porów oraz przyjętą modelową symulację (Bejgel *et al.* 1979), uzyskano następujące wartości liczb Reynoldsa: $0.9 \cdot 10^4$ – $1.51 \cdot 10^4$, co odpowiada turbulentnemu ruchowi cieczy w kapilarze. Uwzględniając powyższe, natężenie prądu powstającego w trakcie oddziaływania pola ultradźwiękowego na pojedynczą kapilarę można zapisać następująco

$$I_0 = \frac{a \Phi K r_0 f^2}{\Delta r_0} \sqrt{R_k (\Delta P)^2} \quad (2)$$

gdzie:

- K – przepuszczalność skały,
- Φ – porowatość,
- r_0 – promień kapilary,
- Δr_0 – grubość warstwy dyfuzyjnej,
- a – stała cieczy,
- R_k – liczba Reynoldsa,
- f – częstotliwość fali,
- ΔP – ciśnienie fali ultradźwiękowej.

We wzorze występuje częstotliwość fal wzbudzających f , co oznacza, że powstający prąd ma charakter podobny do pola wzbudzającego, czyli jest zmienny w czasie. Jest to zatem przypadek powstania pola elektromagnetycznego podczas oddziaływania ultradźwięku na ośrodek heterofazowy. Wyznamy wartość, np. magnetycznej składowej tego pola w oparciu o modelowe przedstawienie warstwy przewodzącej z prądem harmonicznym, powstałym w wyniku propagowania fali sprężystej (Bejgel *et al.* 1979).

Wartość sumaryczna prądu powstającego w nasyconej próbce skalnej jest opisana wzorem

$$I_{sum} = \sum_{i=1}^n k_i I_0 \quad (3)$$

gdzie:

- k_i – liczba kapilar o danym promieniu,
- n – liczba promieni.

Wzór dla magnetycznej składowej wektora pola przyjmie postać

$$\vec{H} = \frac{4\Phi}{\lambda_0 C} J_2(\zeta) \sum_{i=1}^n k_i I_0 \quad (4)$$

gdzie:

- $J_2(\zeta)$ – funkcja Bessela drugiego rzędu,
- λ_0 – długość fali akustycznej,
- C – prędkość fali w cieczy.

Zatem magnetyczna składowa pola elektromagnetycznego jest uzależniona od własności fizycznych próbki skalnej oraz od warunków jej wzbudzania. Widzimy też, że intensywność sygnałów EMP jest uzależniona od rozmiarów porów oraz częstotliwości pola pobudzającego. Ten fakt pozwala na optymalizację procesu wzbudzania wtórnego pola, powstającego w trakcie oddziaływania fali ultradźwiękowej na próbki skalne.

Wyniki przeprowadzonych wcześniej badań (Petkiewicz *et al.* 1989) wskazują na zwiększenie amplitud EMP w poszczególnych zakresach częstotliwościowych pola ultradźwiękowego (Fig. 7). Świadczy to o istnieniu przedziałów maksymalnego pochłaniania energii sprężystej na granicy rozdziału ciecz – faza stała. Oznacza to, że jednym z warunków optymalizacji procesu wzbudzenia wtórnych pól EMP w skałach nasyconych jest przejście do rezonansowego przekazywania energii sprężystej.

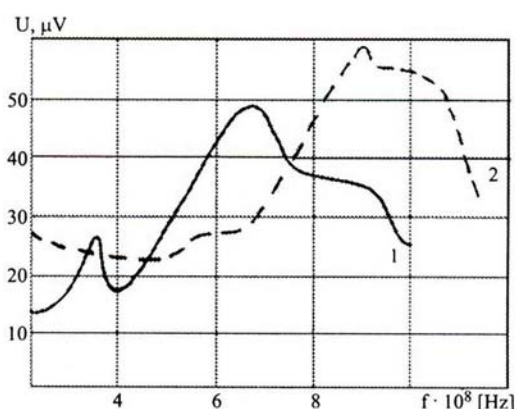


Fig. 7. Częstotliwościowa zależność amplitud stymulowanego ultradźwiękiem EMP dla próbek piaskowca o różnych rozmiarach ziaren: 1 – 0.3–0.6 mm, 2 – 0.08–0.3 mm

Fig. 7. The frequency dependences of the secondary electromagnetic radiation signal magnitudes received for the sandstone rock samples with different grain size: 1 – 0.3–0.6 mm, 2 – 0.08–0.3 mm

Spróbujmy teraz teoretycznie uzasadnić istnienie rezonansowych przedziałów pochłaniania energii sprężystej w skałach. Znany jest fakt powstania sprężystych drgań radialnych w ciałach cylindrycznych podczas rozchodzenia się w nich energii sprężystej, z jednoczesnym powstaniem fali stojącej (pomiędzy osią cylindra a jego powierzchnią) (Bergman 1957).

Zgodnie z teorią Airy’ego (Kratuford 1974), własne częstotliwości takich drgań radialnych da się opisać równaniem

$$f = \frac{x}{2\pi r} \sqrt{\frac{E}{\mu} \frac{1-\delta}{(1+\delta)(1-2\delta)}} \quad (5)$$

gdzie:

- E – moduł Younga,
- δ – współczynnik Poissona,
- μ – gęstość medium,
- x – rozwiązanie równania

$$xJ_0(x) + \frac{2\delta-1}{1-\delta} J_1(x) = 0 \quad (6)$$

gdzie $J_0(x)$, $J_1(x)$ – funkcje Bessela zerowego i pierwszego rzędu.

Wykorzystując wzór (5), możemy obliczyć wartości częstotliwościowe pierwszych drgań radialnych w próbkach skalnych o różnej litologii. Obliczenia pokazują, że przedział częstotliwościowy generowanych sygnałów zależy od litologii badanych próbek.

Próbka skalna jest ośrodkiem porowatym z porami o różnej geometrii i rozmiarach. W oparciu o teorię swobodnych drgań w rezonatorze (Lemb 1960) możemy rozpatrywać pojedynczy por, w twardym szkielecie dielektrycznym skały, jako akustyczny rezonator.

Własna częstotliwość drgań rezonatora można opisać wzorem

$$f_{rez} = \frac{C}{2\pi\sqrt{Q/2\sqrt{S/\pi}}} \quad (7)$$

gdzie:

- Q – objętość rezonatora,
- C – prędkość dźwięku w cieczy nasycającej,
- S – powierzchnia wejściowego otworu pora.

W dalszych rozważaniach przyjmujemy klasyczny model obrazujący pory w skale (Fig. 8). Pory przedstawiają zbiór cylindrów (lub sfer) o promieniu R i długości L , połączonych otworami o promieniu r .

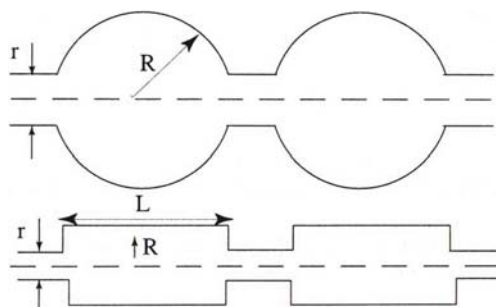


Fig. 8. Modele porowe stosowane w obliczeniu częstotliwości rezonansowych EMP

Fig. 8. Pore models used for calculation of the resonance frequencies of the secondary electromagnetic radiation signals

Uwzględnimy warunki niezbędne do wystąpienia rezonansu, zakładając $R = 10r$. Wtedy wzór (7) przyjmie postać

$$f_{rez} = \frac{C}{20\pi\sqrt{\pi r L/2}} \quad (8)$$

Jeżeli por jest przedstawiony jako połączone sfery o promieniach R i r , to w takim wypadku częstotliwość rezonansowa wyrazi się wzorem

$$f_{rez} = \frac{C\sqrt{3}}{(20\pi)^{3/2} L r} \quad (9)$$

Teraz, zadając wartości C , L i R (lub r), możemy obliczyć częstotliwości, dla których możemy oczekiwać rezonansowego pochłaniania energii fal sprężystych w przestrzeni porowej. Zaznaczmy także, że otrzymane wzory pokazują zależność rezonansowej częstotliwości pochłaniania od typu nasycającego medium, co potwierdza, że otrzymane (opisane wyżej) wyniki badań parametrów wtórnego EMR są prawidłowe.

Rozważmy teraz zmianę energii pochłoniętej przez por, w przypadku różnego typu mediów nasycających (woda, ropa naftowa). Energia skumulowana w rezonatorze określona jest wzorem (Karnauchov 1958, Lemb 1960, Voinova *et al.* 1977)

$$E = \frac{8\pi^2 \mu_{FS}^2 f^2 \mu_C Q}{K^2} \quad (10)$$

gdzie:

- μ_{FS} – gęstość fazy stałej,
- μ_C – gęstość mediów,

$$K = \frac{4\pi^2 \mu_C^2 Q}{C^4} \quad (11)$$

Uwzględniając warunki niezbędne do rezonansu (oraz wzór (9)), otrzymujemy następujące równanie opisujące energię rezonatora

$$E = \frac{\mu_C \mu_{FS}^2 C^8}{2f_{rez}^4 Q} \quad (12)$$

W takim wypadku dla poszczególnych typów nasycającego medium otrzymamy

$$E_{rez}^{ropy} = \frac{\mu_{ropy} \mu_{FS}^2 C_{ropy}^8}{2f_{rez}^4 Q} \quad (13)$$

$$E_{rez}^{wody} = \frac{\mu_{wody} \mu_{FS}^2 C_{wody}^8}{2f_{rez}^4 Q} \quad (14)$$

Podstawiając odpowiednie wartości parametrów C , μ , f_{rez} , otrzymamy w zależności od właściwości fizycznych nasycającej ropy naftowej

$$E_{rez}^{wody} \approx 1.68 \Leftrightarrow 2.1 E_{rez}^{ropy} \quad (15)$$

Oznacza to, że w wypadku nasycenia przestrzeni porowej wodą wartość rezonansowego pochłaniania energii sprężystej może być nawet dwukrotnie większa niż w wypadku nasycenia ropą naftową.

WNIOSKI

Opisane doświadczenia oraz rozważania teoretyczne pozwalają stwierdzić, że zwiększenie amplitudowych wartości sygnałów wtórnego EMP następuje na skutek rezonansowego pochłaniania energii sprężystej i to zjawisko występuje dla głównej częstotliwości rezonansowej lub dla jednej z harmonik. Wniosek ten ma swoje potwierdzenie w zadowalającej zgodności obliczonych częstotliwości rezonansowych pochłaniania ultradźwięku z wynikami przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Otrzymane wyniki mogą się stać podstawą dla stworzenia nowej metody, którą można wykorzystywać w geofizyce poszukiwawczej.

Praca była prezentowana na VI Konferencji Naukowo-Technicznej „Geofizyka w Geologii, Górnictwie i Ochronie Środowiska” w dniu 27 października 2006 r. na WGGiOŚ AGH w Krakowie.

LITERATURA

- Bejgel M.Z., Zelikman M.Z. & Ivanov V.V., 1979. O peredaczach nizkoczastotnogo zvukovogo davlenija pri razlicznych czislach Rejnoldsa. *Akusticzeskij Żurnal*, 6, 44–49.
- Bergman A., 1957. *Ultrazvuk*. Izdatelstvo Inostrannaja Literatura, 756.
- Chatiaszwili N.G. & Perelman M.E., 1988. Elektromagnitnoje izluczenije pri formirovanii dvojnogo elektriczeskogo sloja. *Soobsczenija AN GSSR*, 129, 1, 81–84.
- Czelidze T.L., Derevianenko A.I. & Kurelenko O.D., 1977. *Elektriczeskaja spektroskopija heterogennych sistem*. Naukova Dumka, Kijew, 231.
- Gochberg M.B., Morgunov V.A. & Pochotielov E.A., 1988: *Sejsmoelektromagnitnyje javlenija*. Nauka, Moskva, 169.
- Goncarskij V.N., Kalasznikov N.I. & Kuzovkin S.K., 1969. *Techniczeskije osnovy elektro-razvedki*. Naukova Dumka, Kijew, 117–131.
- Gress G., Brady B. & Rowell G., 1987. Sources of Electromagnetic Radiation from Fracture of Rock Samples in Laboratory. *Geophys. Res. Lett.*, 14, 4, 331–334,
- Karnauchov A.P., 1958. *Kapilarno-kondensacyonnyj gisterezis v sistemie iz pravilno upakovannyh szarov*. Izdatelstvo AN SSSR, Moskva, 71–84.
- Krauford F., 1974. *Volny*. Nauka, Moskva, 528.
- Lemb G., 1960. *Dinamiczeskaja teorija zvuka*. Fizmatgiz, Moskva, 253.
- Lonz Z.J. & Rivers W.K., 1975. Field Measurement of the Electrostatic Response. *Geophysics*, 40, 2, 212–217.
- Migunov I.I., Nikitin A.N. & Seleznev L.D., 1976. O vozmożnosti magnitnych izmierenij piezoelektriczeskogo efekta gornych porod. W: *Regionalnaja razvedka i promyslovaja geofizika*, Moskva, *ONTI VIEMS*, 16, 32–38.
- Migunov I.I., 1984. O rasprostranienii uprugich voln v gruntach s elektrokineticzeskimi svojstvami. *Fizika Ziemli*, 3, 47–55.

- Perelman M.E. & Chatiaszvil N.G., 1983. Generacyja elektromagnitnogo izluczenija pri kolebanii dvojnyh elektriczeskich slojov i jego projavlenie pri zemletriasenijach. *Doklady AN SSSR*, 271, 1, 80–83.
- Perelman M.E. & Chatiaszvil N.G., 1981. O radioizluczenii pri chrupkom razruszenii dielektrikov. *Doklady AN SSSR*, 256, 4, 824–826.
- Petkievicz G.I., Sobotka Yu.G. & Lizun S.A., 1989. Akusticzeski stimulirovannoe vtoricnoje elektromagnitnoje izluczenije v dvuchfaznyh sredach s razlicznym tipom fluida. *Doklady AN USSR, seria B*, 6, 21–23.
- Prąlat A. & Wójtowicz S., 2003. Promieniowanie elektromagnetyczne skał – czy to nowe możliwości oceny zagrożeń w górnictwie? *Warsztaty Górnicze 2003, Mat. Symp.*, PAN, Kraków, 529–541.
- Sobolev G.A., Bożevskij V.N., Lementujeva V.A. & Migunov N.I., 1975. Izuczenije mechanoelektriczeskich javlenij v sejsmoaktivnom režymie. W: *Fizika oczaga ziemletriasenij*, Nauka, Moskva, 25–34.
- Sobotka Yu.G., 1994. Osobennosti amplitudno-czastotnyh charakteristik akustostimulirovannyh EMI v sviazi s tipom fluidonasyszczennosti osadocznyh porod. *Tezisy dokladov miezdunarodnoj konferencii „Anizotropija, Fraktaly. Problemy ich ispolzovanie”*, Kiev, listopad 1994, 1–124.
- Sobotka Yu.G., Lizun S.A. & Pietkievicz G.I., 1991. Modelnyje issledovanija elektrofiziczeskich processov v nasyszczennyh poristych sredach. *Geologija i geochimija gorjuczich iskopajemych*, 76, 82–87.
- Sobotka Yu.G., 1992. Metody akusticzeskoj stimulacii elektrofiziczeskich processov pri issledovanii fluidonasyszczennyh gornych porod. *Avtoreferat dissertacyi na soiskanie uczonoj stepeni kandidata geologo-min. nauk*, Ivano Frankovsk, 20.
- Voinova M.V., Jonson M. & Kasemo B., 1977. Dynamic of Viscous Amphiphilic Films Supported by Elastic Solid Substrates. *Archiv: cond-math/9706058v1*, 6 June 1977, 1–19.

Summary

Physical properties of saturated porous media are unstable, which can be related to changes in their internal energy due to e.g. changes of acoustic pressure. Such processes usually are accompanied by electromagnetic radiation, parameters of which must be in strong relation to physical properties of rocks and the type of pore liquid.

A detailed description of the invented and then elaborated and developed investigation methods as well as of measuring gauges is given (Fig. 1).

Results of experimental studies of electromagnetic radiation parameters of saturated sedimentary rock samples and borehole models (Fig. 2) in a powerful ultrasonic field are presented.

It is shown that the amplitude of electromagnetic radiation (Tab. 1) induced in rock samples, saturated with electrolyte (NaCl solution) and subjected to a field of ultrasonic en-

ergy, increases dramatically compared to the amplitude of electromagnetic radiation induced in the same samples and borehole model saturated with petroleum (Figs 3–7).

A theoretical principles (a physical/mathematical model) explaining the obtained experimental results is proposed (Fig. 8).

Such behaviour of a multiphase system under the influence of an ultrasonic field enhances the informative possibilities of the methods of borehole logging and suggests possibilities of inventing new methods in geophysical prospecting.