

Tadeusz Szpunar, Paweł Budak
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Wiesław Witek
Firma Konsultingowa WES, Piaseczno

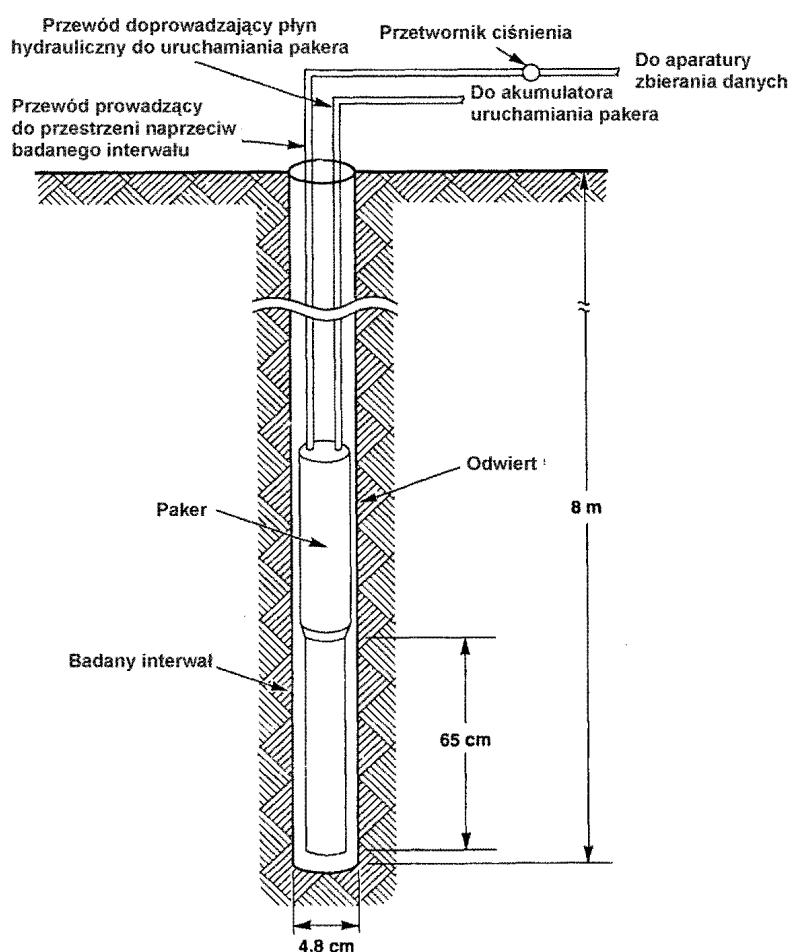
Uwagi na temat interpretacji wyników hydraulicznej próby szczelności w warstwach soli

Wprowadzenie

Inspiracją do napisania niniejszego artykułu była praca [2], w której autorzy w sposób eksperymentalny wykazali, że w wyniku wykonania wyrobiska górniczego w pokładzie soli wokół ścian tego wyrobiska powstaje strefa „odprężona”, charakteryzująca się niezerową przepuszczalnością dla gazu i solanki oraz pewną niewielką porowatością, mieszczącą się w zakresie od 1 do 0,01%. Przedmiotowe badania przeprowadzono w kopalni soli pokładowej, w której zamierzano zmagazynować odpady promieniotwórcze oraz toksyczne, a zatem obowiązywały tam bardzo rygorystyczne wymagania dotyczące szczelności mającej powstać kawerny magazynowej. Przed przystąpieniem do wykonywania tej kawerny-komory, w pokładzie soli odwiercono szereg otworów o średnicy 4,8 cm – do głębokości 8 metrów, wyposażonych w gumowe pakery, umożliwiające odizolowanie interwałów soli i pomiar przepuszczalności soli dla gazu oraz solanki (rysunek 1).

Otwory te umieszczono wokół miejsca planowanej komory magazynowej, w odległości: 1,25; 1,5; 2; 3 i 4 r , gdzie r jest to promień komory. Zatłaczanie gazu lub solanki do izolowanych w otworach interwałów soli wykazało, że przebieg zmian ciśnienia w przypadku solanki można modelować zakładając nieustalony stan przepływu w ośrodku poro-

watym oraz jego radialny charakter. Równanie opisujące izotermalny przepływ radialny cieczy słabościśliwej w ośrodku porowatym – użyte do interpretacji zmian ci-



Rys. 1. Schemat konstrukcji otworu do pomiaru przepuszczalności soli [2]

śnienia w pokładzie soli – otrzymano z równania ciągłości oraz zakładając prawo Darcy'ego. Równanie to ma postać:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{k}{\mu} r \frac{\partial p}{\partial r} \right) \quad (1)$$

gdzie:

p – ciśnienie,

t – czas,

r – odległość od osi otworu,

μ – lepkość płynu,

k – przepuszczalność soli,

s – współczynnik wyrażony wzorem

$$s = (c - c_s) + \phi (c_f - c_s) \quad (2)$$

gdzie:

c – całkowita ściśliwość soli,

c_s – ściśliwość masy solnej,

c_f – ściśliwość solanki nasycającej,

ϕ – porowatość.

W przypadku przepływu gazu, do interpretacji zmian ciśnienia używane było równanie podobne do podanego wzorem (1), przy czym p zastąpione zostało przez p^2 oraz wprowadzono odpowiednie parametry gazu. Interpretacja przebiegu zmian ciśnienia przy zatłaczaniu gazu/solanki do izolowanych interwałów soli przed wykonaniem komory (niezależnie od odległości interwału od miejsca planowanej komory) wykazała, że:

- przepuszczalność dla gazu zawiera się w granicach od $1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ do $5 \times 10^{-22} \text{ m}^2$,
- przepuszczalność dla solanki zawiera się w granicach od $1 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ do $1,7 \times 10^{-22} \text{ m}^2$.

Przepuszczalności te uznać należy za krańcowo małe i niemierzalne w warunkach laboratoryjnych, a sól – za nieprzepuszczalną.

Następnie odwiercono otwór – komorę o średnicy 48,3 cm (również do głębokości 8 m); jego środek znajdował się w podanych wcześniej odległościach od otworów pomiarowych, do których ponownie zatłoczono gaz lub solankę i na podstawie zachowania ciśnienia określono przepuszczalność oraz porowatość soli. Wyniki interpretacji dla solanki i gazu zestawiono odpowiednio w tablicach 1 i 2.

Przytoczone w pracy [2] wyniki dowodzą, że:

- przepuszczalność niezaburzonej mechanicznie soli praktycznie równa jest zeru (od 2×10^{-20} do $5 \times 10^{-22} \text{ m}^2$). Podane wielkości określono na podstawie interpretacji zmian ciśnienia w otworach testowych w funkcji czasu, zakładając, że zmiany ciśnienia opisać można za

Tablica 1. Przepuszczalność i porowatość soli po wykonaniu komory, określone w wyniku testu zatłaczania solanki [2]

Odległość otworu testowego od środka komory (r)	Przepuszczalność [m^2]	Porowatość (ułamek)
1,25	$5,7 \times 10^{-18}$	0,01
1,25	$5,7 \times 10^{-18}$	0,01
1,5	$1,5 \times 10^{-19}$	0,005
2	$1,8 \times 10^{-20}$	0,001
3	$4,5 \times 10^{-21}$	0,001
4	$5,5 \times 10^{-21}$	0,001

Tablica 2. Przepuszczalność i porowatość po wykonaniu komory, określona w wyniku testu zatłaczania gazu

Odległość otworu testowego od środka komory (r)	Przepuszczalność [m^2]	Porowatość (ułamek)
1,25	$4,5 \times 10^{-18}$	0,01
1,25	$9,0 \times 10^{-16}$	0,01
1,5	$2,0 \times 10^{-19}$	0,005
2	$3,0 \times 10^{-21}$	0,001
3	$6,0 \times 10^{-21}$	0,001

pomocą równania (1). Przepuszczalności z podanego zakresu nie można zmierzyć laboratoryjnie,

- wykonanie wyrobiska (komory) powoduje powstanie wokół niego strefy „odprężonej”, o niezerowej porowatości i przepuszczalności, których wielkości zależą od odległości od środka wyrobiska. W strefie tej, w wyniku powstania sieci mikroszczelin oraz mini pustek międzykrystalicznych, przepuszczalność w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska dochodzić może do 10^{-13} m^2 , a porowatość do 1% – co umożliwia przepływ gazu i solanki.

Po 240 dniach obserwacji zachowania ciśnienia w testowanych otworach stwierdzono, że:

- przepuszczalność dla gazu zachowana została w odległości 1,25 r od środka wyrobiska,
- przepuszczalność dla solanki zachowana została w odległości 2 r od środka wyrobiska,
- porowatość w zakresie wielkości mierzalnych (1%) zachowana została w odległości 1,5 r od środka wyrobiska,
- w odległości większej od 3÷4 r od środka wyrobiska sól zachowała swoje oryginalne parametry (brak przepuszczalności i porowatości).

Na podstawie podanych wyników pracy [2] należy

wnioskować, że podobna strefa zaburzona powstaje wokół każdego wyrobiska wykonanego w soli, w tym również wokół kawern przeznaczonych do magazynowania gazu. Strefa ta charakteryzuje się występowaniem sieci szczelin i spękań oraz niezerową przepuszczalnością i porowatością. Gdyby założyć, że w przypadku komór magazynowych zachowana jest skala eksperymentu (to znaczy przepuszczalność dla gazu zachowana jest do głębokości $1,25 r$, gdzie r jest promieniem komory) oraz przyjąć porowatość soli w strefie zaburzonej (czyli 1%), to wynika stąd, że wokół komory powstaje dodatkowa (niewielka wprawdzie)

pojemność magazynowa, do której gaz wpływa lub jest odbierany (w wyniku filtracji) z pewną zwłoką czasową – w zależności od różnicy ciśnień w komorze i w strefie zaburzonej.

Przykładowo, przyjmując promień komory $r = 30$ m, wysokość 100 metrów oraz porowatość 1%, wówczas otrzymamy objętość magazynową strefy zaburzonej równą około 1600 m^3 , co przy całkowitej pojemności ww. komory (ok. $282\,600 \text{ m}^3$) stanowi 0,6% – jest to objętość, która może w sposób zauważalny wpłynąć na zachowanie ciśnienia oraz wyniki próby szczelności komory.

Wpływ strefy zaburzonej na wynik hydraulicznego testu szczelności interwału soli

Hydrauliczna próba szczelności interwału soli w otworze wiertniczym polega na zainstalowaniu pakerów powyżej i poniżej badanego interwału, zapięciu ich w celu odizolowania interwału, wywarciu ciśnienia próby oraz obserwacji tego ciśnienia przez pewien czas w celu sprawdzenia szczelności soli. Sposób wykonania próby szczelności, ciśnienie próby oraz użyte wyposażenie dobierane jest każdorazowo do sytuacji przez dozór techniczny. Interwał solny uznaje się za szczelny, jeżeli spadek ciśnienia naprzeciw interwału nie przekracza określonej wielkości w zadanym czasie. W przypadku gdy spadek ciśnienia cieczy w określonym czasie jest większy od zadanego, wówczas rozważane są rozmaite przyczyny tego stanu rzeczy, w tym: szczelność pakerów, możliwość ubytku cieczy podczas zamykania zaworu obrotowego itp. oraz brak szczelności soli.

Zdaniem autorów, jedną z możliwych przyczyn zbyt dużego spadku ciśnienia próby szczelności interwału soli może być istnienie – omawianej wyżej – strefy zaburzonej wokół badanego interwału. Wielkość dodatkowego spadku ciśnienia podczas hydraulicznej próby szczelności soli w wyniku filtracji cieczy do tej strefy można obliczyć przyjmując następujące założenia:

- wokół badanego interwału istnieje strefa zaburzenia do głębokości $1,5 r$ od osi otworu (porowatość w zakresie wielkości mierzalnych),
- do chwili wywarcia ciśnienia próby, w systemie mikroszczelin strefy zaburzonej panuje ciśnienie równe ciśnieniu hydrostatycznemu w otworze – z racji kontaktu hydrodynamicznego tej strefy z otworem,
- w odległości większej od $1,5 r$ filtracja nie zachodzi – z racji bliskiej zeru porowatości i przepuszczalności.

Przyjmując porowatość strefy zaburzonej wokół otworu równą 1%, zgodnie z wynikami pomiarów podanymi w [2], można łatwo obliczyć objętość porową tej strefy (V_1). Zna-

na jest również objętość cieczy hydraulicznej pomiędzy pakerami (V_0) oraz ciśnienie próby hydraulicznej (p_0). Po podniesieniu ciśnienia w przestrzeni pomiędzy pakerami (naprzeciw interwału soli) do ciśnienia próby (p_0), ciśnienie to będzie się obniżać – w wyniku kontaktu tej przestrzeni (V_0, p_0) z przestrzenią zaburzoną (V_1, p_1) – i spadnie ono do wielkości końcowej p_k , pośredniej pomiędzy p_0 i p_1 , zależnej od wielkości tych ciśnień oraz objętości płynu pomiędzy pakerami (V_0) i w przestrzeni zaburzonej (V_1). Zakładamy, że objętości V_0 i V_1 nie zależą od ciśnienia, czyli są stałe. Tak postawione zagadnienie sprowadza się do określenia ciśnienia w układzie dwóch zbiorników – o różnej, ale stałej pojemności, wypełnionych całkowicie cieczą o różnym ciśnieniu, po połączeniu ich w celu zrównoważenia ciśnień.

Niech pierwszy zbiornik o objętości V_0 reprezentuje przestrzeń pomiędzy pakerami. Ciśnienie w tym zbiorniku równe jest ciśnieniu próby hydraulicznej p_0 . Drugi zbiornik o objętości V_1 reprezentuje strefę zaburzoną, w której w chwili początkowej panuje ciśnienie p_1 , przy czym $p_0 > p_1$. Wyrównanie ciśnień pomiędzy zbiornikami następuje w wyniku przepływu masy, po zakończeniu którego ustala się ono na poziomie pośrednim pomiędzy p_0 i p_1 . Po wyrównaniu ciśnień spełniona musi być zależność:

$$V_0 \rho(p_0) + V_1 \rho(p_1) = (V_0 + V_1) \rho(p_k) \quad (3)$$

gdzie:

V_0 – objętość cieczy w przestrzeni pomiędzy pakerami,

p_0 – ciśnienie próby hydraulicznej,

V_1 – objętość porowa (systemu mikroszczelin) badanego interwału soli,

p_1 – ciśnienie w systemie mikroszczelin,

$\rho(p)$ – gęstość cieczy hydraulicznej w funkcji ciśnienia p ,

p_k – ciśnienie końcowe.

Gęstość cieczy w funkcji ciśnienia wyrazić można wzorem:

$$\rho(p) = \frac{\rho(p_p)}{1 - \frac{p_k - p_p}{E}} \quad (4)$$

gdzie:

p_p – ciśnienie początkowe,

E – objętościowy moduł sprężystości

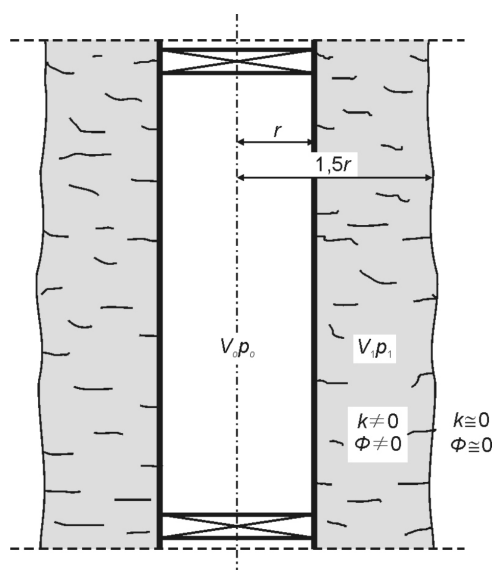
(dla wody $E = 2,15 \times 10^9$ N/m²).

Reszta oznaczeń pozostaje taka sama jak w opisie wzoru (3).

Ponieważ wygodniej jest przyjmować $\rho(p_p) = \rho_o$ dla $p_p = 0$, zatem posługiwać się będziemy wzorem:

$$\rho(p) = \frac{\rho_o}{1 - \frac{p}{E}} \quad (5)$$

W pokładzie soli, w otworze o średnicy $\phi 216$ odizolowano za pomocą pakerów interwał o długości 15 metrów i wykonano hydrauliczną próbę szczelności soli, przez podniesienie ciśnienia do wysokości 25 MPa. Zakładamy istnienie systemu mikroszczelin odpowiadających porowatości 0,01 (1%) do głębokości 1,5 r od osi otworu, gdzie r jest promieniem otworu. W systemie mikroszczelin, w chwili początkowej panuje ciśnienie p_1 równe ciśnieniu hydrostatycznemu w otworze – z racji niezerowej przepuszczalności tego systemu oraz kontaktu hydrodynamicznego z otworem (rysunek 2). Przyjmujemy, że $p_1 = 18$ MPa, co



Rys. 2. Schemat otworu

Podstawiając (5) do (3) otrzymamy po przekształceniach:

$$p_k = E - \frac{(V_o + V_1)(E - p_o)(E - p_1)}{V_o(E - p_1) + V_1(E - p_o)} \quad (6)$$

Jeżeli pomiędzy ciśnieniem próby ciśnieniowej p_o oraz ciśnieniem p_1 w otaczającym otwór systemie mikroszczelin nie występuje różnica, tzn. $p_o = p_1$, to – jak wynika z (6) – ciśnienie końcowe p_k równe jest p_o , czyli spadek ciśnienia nie występuje ($\Delta p = p_o - p_k = 0$). Przyjmując moduł sprężystości objętościowej $E = (2,15)(10^3)$ MPa (woda; moduł E dla solanki ma zbliżoną wartość, którą można odczytać z tablic), otrzymamy z (6):

$$p_k [\text{MPa}] = (2,15 \cdot 10^3) - \frac{(V_o + V_1)[\text{m}^3](E - p_o)[\text{MPa}](E - p_1)[\text{MPa}]}{V_o[\text{m}^3](E - p_1)[\text{MPa}] + V_1[\text{m}^3](E - p_o)[\text{MPa}]} \quad (7)$$

Przykład

odpowiada np. gęstości płynu w otworze $\rho = 1,2$ g/cm³ i głębokości 1500 metrów. Objętość płynu hydraulicznego (V_o) pomiędzy pakerami, z uwzględnieniem objętości przewodu, przyjmujemy jako równą 0,45 m³, a objętość mikroprzestrzeni szczelinowej (V_1) wokół otworu – jako równą 0,007 m³.

Po wyrównaniu ciśnień pomiędzy przestrzenią między-pakerową a systemem mikroszczelin, w wyniku filtracji płynu hydraulicznego ciśnienie w otworze ustali się na poziomie:

$$p_k = (2,15 \cdot 10^3) - \frac{(0,45 + 0,007)[(2,15 \cdot 10^3) - 25][(2,15 \cdot 10^3) - 18]}{0,45[(2,15 \cdot 10^3) - 18] + 0,007[(2,15 \cdot 10^3) - 25]} \cong 24,8 \text{ MPa}$$

czyli zaobserwowany będzie spadek ciśnienia o około dwie atmosfery. Podany spadek ciśnienia nie następuje momentalnie, ale po pewnym (nie długim) czasie, zależnym od prędkości filtracji płynu. W rozpatrywanym przypadku spadek ten byłby znacznie większy, gdyby V_o było mniejsze – przy niezmiennych pozostałych danych (np. otwór o mniejszej średnicy).

Z przytoczonych rozważań i załączonego przykładu wynika, że przy wykonywaniu hydraulicznej próby szczelności soli należy spodziewać się pewnego niewielkiego spadku ciśnienia, będącego wynikiem filtracji płynu hydraulicznego do otaczającego systemu mikroszczelin.

W przypadku istnienia systemu mikroszczelin wokół otworu spadek ten może być mylnie zinterpretowany jako pewna nieszczelność – skądinąd szczelnego górotworu solnego, gdyż dla $r > 1,5$ przepuszczalność i porowatość soli są praktycznie równe zero. Spadek ten będzie tym większy, im mniejsza będzie V_0 a większa V_1 , oraz im większa będzie różnica ciśnień pomiędzy otworem a systemem mikroszczelin. Spadek ciśnienia w przestrzeni pomiędzy pakierami podczas próby szczelności może być większy od podanego, gdyż – o ile objętość V_0 jest stała, to V_1 jest przestrzenią otwartą od góry i dołu.

Można również w przybliżeniu podać wymagany czas trwania próby szczelności, wykorzystując koncepcję tzw. promienia badania $r_i(t)$, przez co rozumiana jest odległość od otworu, dla której występuje mierzalna zmiana ciśnienia po czasie t , podczas zatłaczania lub eksploatacji ze stałą wydajnością (przy takim podejściu zakładamy, że wydatek filtracji do systemu szczelin wokół otworu jest stały – co nie jest prawdą, a zatem podana niżej zależność ma jedynie charakter orientacyjny). Zakładając, zgodnie z sugestiami podanymi w [2], że zasięg strefy mikroszczelinowej wokół otworu (r_i) równy jest $1,5 r_o$, gdzie r_o jest promieniem otworu, wówczas minimalny wymagany czas trwania próby szczelności wyrazić można wzorem:

$$t[\text{min}] = 4,16 \cdot 10^3 \frac{\phi[\text{ułamek}] \mu[\text{cP}] c[1/\text{MPa}] r_i^2[\text{m}^2]}{k[\text{mD}]} \quad (8)$$

Przyjmując: zasięg strefy występowania mikroszczelinowości $r_i = 1,5 r_o = 0,324$ m; porowatość strefy mikroszczelinowej $\phi = 0,01$; lepkość solanki $\mu = 0,5$; ściśliwość układu sól i solanka w mikroszczelinach $c = 0,02941$ na 1/MPa oraz przepuszczalność strefy mikroszczelinowości $k = 0,01$ mD, otrzymamy:

$$t[\text{min}] = 4,16 \cdot 10^3 \frac{0,01 \cdot 0,5 \cdot 0,0294 \cdot 0,324^2}{0,01} \cong 7 \text{ minut}$$

Z powyższego wzoru wynika, że czoło zaburzenia ciśnienia spowodowanego wpływem solanki do strefy mikroszczelinowej po 7 minutach dotrze do niezaburzonego górotworu solnego, w odległości r_i od ściany otworu.

Czas trwania testu szczelności powinien być kilkakrotnie dłuższy od obliczonej wartości minimalnej. Należy również zauważyć, że – jak wynika z powyższego wzoru – czas ten zależy od przepuszczalności strefy mikroszczelinowej i w przypadku krańcowo małych przepuszczalności może być bardzo długi; przy czym prędkość spadku ciśnienia będzie w takim przypadku bardzo mała, a zatem górotwór solny uznany zostanie za szczelny.

Artykuł nadesłano do Redakcji 3.11.2010 r. Przyjęto do druku 13.01.2011 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Raczkowski

Literatura

- [1] Lee J.: *Well Testing*. Society of Petroleum Engineers, NY, 1982.
- [2] Stormont J.C., Howard C.L., Daemen J.J.K.: *In Situ Measurements of Rock Salt Permeability Due to Nearby Excavation*. Sandia National Laboratory Report, Sand 90–3134, July 1991.



Mgr inż. Paweł BUDAK – starszy specjalista naukowo-badawczy w Zakładzie Inżynierii Naftowej INiG w Krakowie. Zajmuje się realizacją prac naukowych i naukowo-badawczych; głównie z zakresu inżynierii złożowej, wiertnictwa i eksploatacji podziemnych magazynów gazu w kawernach solnych oraz tworzeniem oprogramowania na potrzeby przemysłu naftowego i gazowniczego.



Dr inż. Tadeusz SZPUNAR – adiunkt w Zakładzie Inżynierii Naftowej Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Autor szeregu opracowań z zakresu inżynierii złożowej, eksploatacji, wiertnictwa, magazynowania gazu w kawernach solnych, zagadnień związanych z mechaniką górotworu oraz innych. Autor i współautor kilkudziesięciu publikacji naukowych oraz patentów.



Dr inż. Wiesław WITEK – absolwent AGH oraz Uniwersytetu Rzeszowskiego. Pracownik FMWiG GLINIK w Gorlicach, PRWiG Warszawa oraz PGNiG S.A. jako specjalista ds. wierceń. W latach 1987–1992 praca na kontraktach zagranicznych obejmujących wiercenia i rekonstrukcje głębokich otworów. Aktualnie właściciel Firmy Konsultingowej WES, wykonującej prace na rzecz przemysłu naftowego.