

Problemy bezpieczeństwa prac podczas rekonstrukcji odwiertów eksploatacyjnych

Security problems during exploitation wells workover works



*Prof. dr hab. inż. Stanisław Dubiel**



*Dr hab. inż. Barbara Uliasz-Misiak**



*Dr hab. inż. Jan Ziąja**



*Mgr inż. Katarzyna Stachowicz**

Treść: Podczas rekonstrukcji odwiertów eksploatacyjnych konieczne jest zapewnienie bezpieczeństwa prac, a zwłaszcza zapobieganie awariom wiertniczym. Dużą rolę odgrywa tutaj dobór odpowiedniej cieczy roboczej. Bardzo ważne są również prędkości operacji dźwigowych rurami w odwiercie oraz wymiary przestrzeni pierścieniowej. Zapobieganie awariom jest możliwe w wyniku prognozowania wartości zmian ciśnienia dennego dynamicznego podczas operacji dźwigowych rurami w odwiercie. Przedstawiony w artykule przykład analizy przyczyn urwania przewodu typu CT podczas prac rekonstrukcyjnych w odwiercie gazowym dowodzi istnienia dużych zagrożeń mogących wystąpić podczas operacji dźwigowych tym przewodem. Rekonstrukcja odwiertów gazowych związana jest z dużym ryzykiem wystąpienia erupcji gazu, która może być spowodowana zbyt szybkim wyciąganiem rur z odwiertu lub zmniejszeniem gęstości cieczy roboczej w wyniku jej nagazowania. Zaproponowano dobór metody usuwania poduszki gazu ziemnego z odwiertu, z uwzględnieniem warunków bezpieczeństwa rekonstrukcji odwiertów gazowych.

Abstract: The purpose of workover of oil or gas production wells is to maintain or regain their full production efficiency, which allows for extension or increase in hydrocarbon production. Workover is carried out in the wells with leakages by use of production pipes or casings or through enhancement procedures in the production wells. It is necessary to ensure safety during the wells workover, especially against drilling operation failures. The selection of the suitable fluid plays a major role in the workover. Speed of the horizontal pipes handling in the well and the size of the tubing-casing annulus are very important as well. Prediction of value of the dynamic bottom hole pressure changes during the horizontal pipes handling, makes the prevention against the drilling operation failures possible. Analysis of the causes of the break-type coiled-tubing during workover works in the gas well, presented in the paper, proves the existence of serious threats that may occur during the operation of the cable handling. Gas wells workover is associated with a high risk of gas blowout which can be caused by too rapid stabblings or a decrease in the density of the working fluid, as a result of its gas saturation. The choice of methods for removing natural gas bubble from the well, including the workover safety conditions of gas wells was presented as well.

Słowa kluczowe:

rekonstrukcja, odwiert, ciśnienie dennego, ciśnienie szczelinowania, erupcja wstępna

Key words:

well workover, bottom pressure, fracturing pressure, preliminary blowout

*) AGH w Krakowie

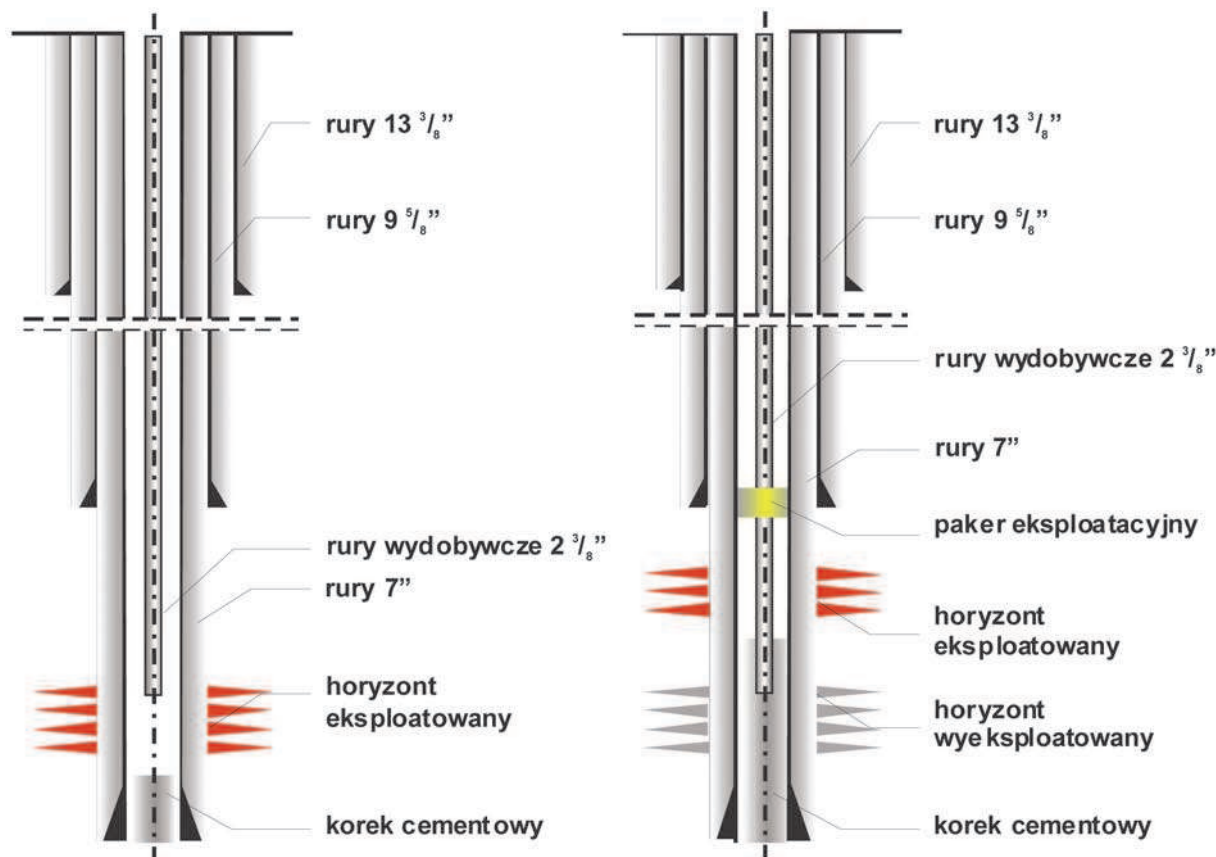
1. Wprowadzenie

Rekonstrukcja odwiertów eksploatacyjnych w górnictwie naftowym i gazownictwie ma na celu przedłużenie lub nawet zwiększenie wydobywania ropy i gazu danym odwiertem. Cel ten można osiągnąć w wyniku zastosowania zabiegów stymulacyjnych, pogłębiania odwiertu, udostępnienia przez perforację rur okładzinowych i uzbrojenie nowego (wyżej lub niżej zalegającego) poziomu produktywnego do eksploatacji. Możliwe jest też podtrzymanie parametrów produkcyjnych odwiertu dzięki wymianie uszkodzonych rur okładzinowych oraz elementów wyposażenia węgłnego, np. nieszczelnych rur wydobywczych, pakerów eksploatacyjnych, względnie wyposażenia pompowego. Przedłużenie zdolności wydobywczych odwiertów prowadzi ostatecznie do zwiększenia współczynnika szczypania zasobów geologicznych.

Dzięki rekonstrukcji odwiertów eksploatacyjnych możliwe jest utrzymanie lub odzyskanie przez nie pełnej sprawności wydobywczej. Prace rekonstrukcyjne przeprowadza się w odwiertach, w których powstały nieszczelności rur okładzinowych lub wydobywczych w wyniku oddziaływania na nie różnych szkodliwych czynników występujących w czasie eksploatacji złoża (korozja elementów stalowych w środowisku solnym lub siarkowodorowym, wytarcie mechaniczne, gwałtowne zmiany temperatury i ciśnienia). Prace te przeprowadza się również w przypadku konieczności bądź zastosowania zabiegów intensyfikacji wydobywania (np. kwasowanie, szczelinowanie hydrauliczne), bądź udostępnienia kolejnego poziomu produktywnego do eksploatacji (rys.1).

Podczas rekonstrukcji odwiertów eksploatacyjnych konieczne jest zapewnienie bezpieczeństwa prac (zapobieganie awariom wiertniczym, ochrona osobista załogi), ochrony złoża (przepuszczalności skał zbiornikowych i zasobów) oraz ochrony środowiska przyrodniczego oraz efektywności prowadzonych prac (niezawodność stosowanej techniki, skuteczność stosowanej technologii, adekwatne koszty zabiegów). Dużą rolę odgrywa przy tym dobór odpowiedniej cieczy roboczej (rodzaj, receptura) oraz jej parametry reologiczne (gęstość i lepkość). Bardzo ważne są prędkości operacji dźwigowych rurami w odwiercie, zwłaszcza zapuszczanie i wyciąganie kolumn rur okładzinowych, względnie wydobywczych podczas ich wymiany. Istotne są przy tym prześwity technologiczne (wymiarzy międzyrurowej przestrzeni pierścieniowej).

Problematyka w artykule dotyczy odwiertów eksploatacyjnych pionowych wydobywających gaz ziemny i ropę naftową oraz odwiertów iniekcyjnych służących do zatłaczania do złoża płynów zabiegowych lub wody złożowej. Rekonstrukcja odwiertów wydobywczych kierunkowych, z końcowym odcinkiem poziomym w strefie złożowej, względnie wielodennych, wymaga zastosowania specjalnych, często bardzo kosztownych rozwiązań. Ze względu na bezpieczeństwo prac unika się cieczy roboczych zawierających tlen, mogący tworzyć mieszanek wybuchową z metanem podczas rekonstrukcji odwiertów gazowych i ropnych. Obecnie coraz częściej odwierty ponafotowe poddaje się rekonstrukcji w celu ich wykorzystania w systemach geotermalnych (rys. 1).



Rys. 1. Rekonstrukcja odwiertu eksploatacyjnego polegająca na udostępnieniu nowego horyzontu gazonośnego po wcześniejszym zamknięciu horyzontu niżej leżącego. a) stan techniczny odwiertu przed rekonstrukcją; b) stan techniczny odwiertu po rekonstrukcji (na podst. [1])

Fig. 1. Reconstruction of the producing well consisting in the opening of a new gas-bearing horizon after the closing of the lower horizon. a) technical condition of the well before reconstruction; b) technical condition of the well after reconstruction (on the basis of [1])

2. Warunki bezpieczeństwa podczas rekonstrukcji gazowych odwiertów eksploatacyjnych

Bezpieczne prowadzenie prac rekonstrukcyjnych, zwłaszcza w odwiertach gazowych, wymaga sterowania ciśnieniem dennym. Jest to szczególnie ważne podczas operacji wyciągania i zapuszczania rur okładzinowych, przewodu wiertniczego, albo wydobywczego, jak też podczas likwidacji erupcji wstępnej. Operacje zapuszczania rur, często powodują niezamierzone szczelinowanie hydrauliczne skał zbiornikowych i zanik cieczy roboczej, a następnie wystąpienie erupcji wstępnej w postaci przyływu gazu ziemnego do odwiertu, lub też szczelinowanie skał pod butem eksploatacyjnej kolumny rur okładzinowych i wystąpienie erupcji pozarurowej. Zjawiska te w wielu przypadkach powstają wskutek nadmiernych przyrostów (dodatnich) ciśnienia dennego, wywołanych ruchem w dół kolumny rur w odwiertcie wypełnionym cieczą roboczą o znacznej gęstości i lepkości. Operacje wyciągania rur z odwiertu (ujemne wartości przyrostu ciśnienia) mogą powodować znaczne zmniejszenie wartości ciśnienia dennego wywieranego przez słup cieczy roboczej i wywołać niekontrolowany przyływ gazu ziemnego do odwiertu.

W celu utrzymywania bezpiecznej wartości ciśnienia dennego dynamicznego podczas operacji dźwigowych rurami konieczne jest regulowanie ciśnienie hydrostatycznego cieczy roboczej w odwiertcie poprzez zmianę jej gęstości oraz lepkości, a także przestrzeganie dopuszczalnej prędkości ruchu rur (rys. 2). Kolumna rur w czasie ruchu w odwiertcie przemieszcza się ze zmienną prędkością. Na wartość przyrostów zmian ciśnienia ma wpływ również to, czy rury mają otwarty, czy też zamknięty dolny koniec oraz charakter przepływu cieczy roboczej (laminarny lub turbulentny) w przestrzeni pierścieniowej odwiertu.

2.1. Ciśnieniowe warunki bezpieczeństwa

Wartość ciśnienia dennego dynamicznego (p_{dd}) cieczy roboczej w odwiertcie wiertniczym podczas zapuszczania, względnie wyciągania rur określa się wzorem

$$p_{dd} = p_h \pm \Delta p_h = H \cdot \rho_p \cdot g \pm \Delta p_h \quad (1)$$

gdzie:

p_{dd} – ciśnienie denne dynamiczne słupa cieczy roboczej w odwiertcie, Pa;

p_h – ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy roboczej w odwiertcie, Pa;

Δp_h – przyrost ciśnienia hydrostatycznego słupa cieczy roboczej w odwiertcie spowodowany ruchem rur (zapuszczanie rur znak „+”, wyciąganie rur znak „-”), Pa;

H – głębokość zalegania spągu warstwy perspektywicznej, m, (przy czym w obliczeniach przyjmujemy, że długość kolumny rur L jest równa głębokości odwiertu H);

ρ_p – gęstość cieczy roboczej, kg/m^3 ;

g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2 .

Ciśnieniowy warunek bezpieczeństwa wyrażony jest nierównościami:

$$p_z < p_{dd} < p_{sz} \quad (2)$$

gdzie

p_z – wartość ciśnienia złożowego po danym okresie eksploatacji złoża, Pa;

p_{sz} – ciśnienie hydraulicznego szczelinowania skał zbiornikowych, Pa.

Podczas zapuszczania rur do odwiertu, aby uniknąć hydraulicznego szczelinowania skał i ucieczki cieczy roboczej w wytworzone szczeliny, powinna być spełniona nierówność

$$p_{dz} < p_{sz} \quad (3)$$

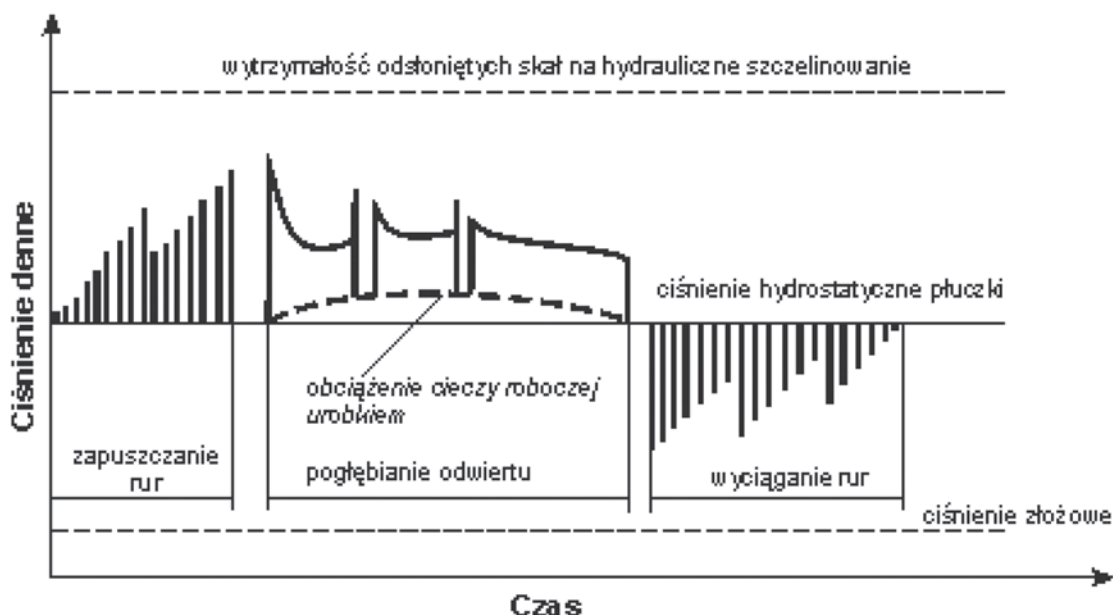
natomiast podczas wyciągania rur z odwiertu, aby uniknąć erupcji płynu złożowego, powinna być spełniona nierówność

$$p_{dw} < p_z \quad (4)$$

gdzie

p_{dz} – ciśnienie denne w przypadku zapuszczania rur, Pa;

p_{dw} – ciśnienie denne w przypadku wyciągania rur, Pa.



Rys. 2. Zmiany ciśnienia słupa cieczy roboczej (lub płuczki) w odwiertcie podczas jego pogłębiania [3]
Fig. 2. Changes in pressure of column of liquid (or washer) in the well during its deepening [3]

2.2. Prognozowanie przyrostu ciśnienia dennego i hydraulicznego szczelinowania w odwiercie

2.2.1. Przyrost ciśnienia dennego podczas manewrowania rurami

W przypadku zapuszczania (lub wyciągania) kolumny rur wydobywczych z zamkniętym dolnym końcem (np. z pakerem wydobywczym lub eksploatacyjnym) i przepływu turbulენტnego cieczy roboczej w przestrzeni pierścieniowej odwiertu występują największe zmiany ciśnienia dennego. W takim przypadku szacunkową wartość Δp_h można prognozować z zastosowaniem specjalnych wzorów empirycznych i nomogramów [2]:

$$\Delta p_h = 2,71 \cdot B \cdot L \cdot \eta^{0,21} \cdot \rho_p^{0,806} \cdot v_{rmax}^{1,8} [\text{N/m}^2] \quad (5)$$

gdzie:

- B – współczynnik uwzględniający wymiary przekroju przestrzeni pierścieniowej (średnicy wewnętrznej ostatniej kolumny rur okładzinowych D , m oraz zewnętrznej średnicy kolumny rur wydobywczych lub płuczkowych d_z , m), dobierany w oparciu o nomogram przedstawiony na rys. 3);
 - L – długość odcinka odwiertu o niezmiennym przekroju poprzecznym przestrzeni pierścieniowej, m;
 - η – współczynnik lepkości dynamicznej cieczy roboczej, $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$;
 - v_{rmax} – maksymalna prędkość ruchu rur, m/s;
- pozostałe oznaczenia jak poprzednio.

2.2.2. Ciśnienie hydraulicznego szczelinowania skał

Znając dla danego złoża wartości gradientów ciśnienia geostatycznego G_g oraz ciśnienia złożowego G_z , a także wartość współczynnika Poissona n dla skał zbiornikowych (piaskowców lub węglanowych), można określić gradient hydraulicznego szczelinowania skał G_{sz} , stosując wzór Eatona [5]

$$G_{sz} = \frac{v}{1-v} (G_g - G_z) + G_z, [\text{Pa/m}] \quad (6)$$

Wartość ciśnienia hydraulicznego skał wynosi

$$p_{sz} = G_{sz} \cdot H_s \quad (7)$$

gdzie:

H_s – głębokość zalegania stropu skał zbiornikowych, m

2.2.3. Analiza wyników symulacji warunków bezpieczeństwa prac rekonstrukcyjnych

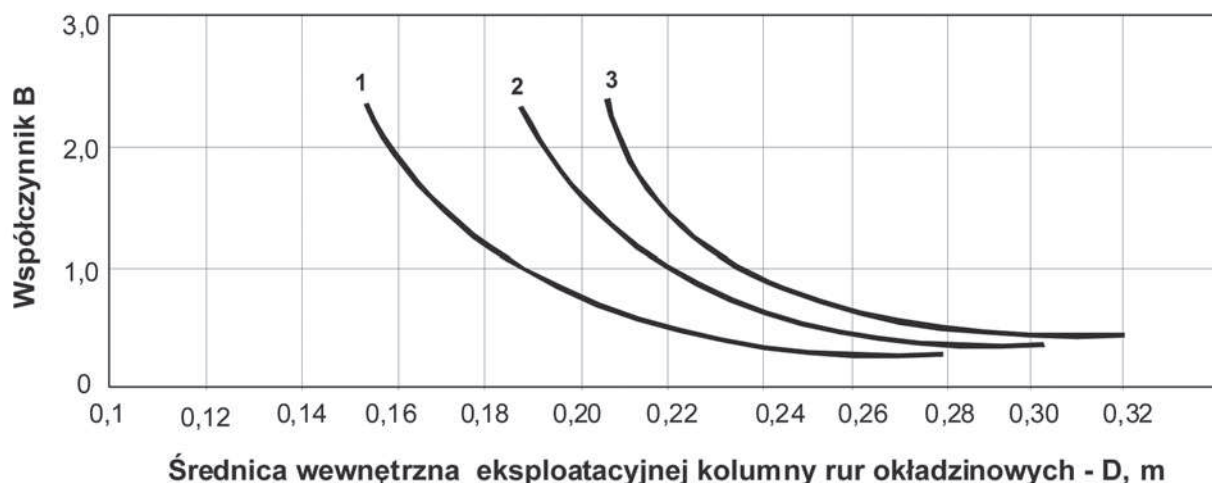
Symulację wielkości przyrostu ciśnienia dennego oraz ciśnienia hydraulicznego szczelinowania wykonano dla przypadku zapuszczania lub wyciągania rur wydobywczych o średnicy zewnętrznej $d_z = 0,089$ m w odwiercie orurowanym rurami okładzinowymi o średnicy wewnętrznej $D = 0,16744$ m. Podstawiając do wzoru (5) przyjęte wartości liczbowe odpowiednich wielkości zmiennych szacunkowe wartości przyrostu ciśnienia dennego Δp_h (tab. 1). Oszacowania wykonano dla kolumn rur długości 1000, 2000 i 3000 m. Założono, że w pracach będzie wykorzystywana ciecz robocza o gęstościach: 1300, 1500 i 1800 kg/m^3 . Przyjęto, że prędkości z jakimi wykonywane są prace dźwigowe rurami wynoszą: 0,25, 0,5, 1,0; 1,5 i 2,0 m/s.

Wartości ciśnienia hydraulicznego szczelinowania skał oszacowano w oparciu o wzór (7) (tab. 2). Wykorzystując dane z tab. 1, oszacowania te wykonano dla gradientów ciśnienia złożowego wynoszących: 0,013; 0,015 i 0,018 MPa/m oraz gradientu ciśnienia litostatycznego 0,0235 MPa/m . Uwzględniono przy tym, że dla skał osadowych współczynnik Poissona wynosi: 0,18, 0,22 i 0,28.

Wykorzystując dane z tabeli 1 i tabeli 2, przeanalizowano spełnianie warunków bezpieczeństwa podczas operacji dźwigowych, dla prędkości ruchu rur równej 1,5 m/s i 0,25 m/s, w trakcie rekonstrukcji (tab. 3) oraz gradientcie ciśnienia geostatycznego równym 0,0235 MPa/m .

Analizując otrzymane wyniki symulacji zestawione w tabeli 3, można zauważyć, że:

- prędkość ruchu rur 1,5 m/s jest niedopuszczalna, zwłaszcza w przypadku ich wyciągania, gdyż dla wszystkich analizowanych przypadków istnieje niebezpieczeństwo wystąpienia erupcji gazu ziemnego; natomiast niebezpieczeństwo hydraulicznego szczelinowania skał występuje tylko w przypadku wysokich wartości gradientu ciśnienia złożowego ($G_z \geq 0,018$ MPa/m) i małych wartości współczynnika Poisson'a ($n \leq 0,18$);



Rys. 3. Nomogram służący do określania współczynnika B dla przepływu turbulენტnego: 1, 2, 3 – średnice zewnętrzne rur płuczkowych lub wydobywczych odpowiednio 0,088 m, 0,114 m i 0,127 m [3]

Fig. 3. Nomogram for determining B coefficient for the turbulent flow: 1, 2, 3 – external diameters of the drill pipes or lifting casings 0,088 m, 0,114 m and 0,127 m [3] respectively

Tablica 1. Zestawienie danych oraz wyników symulacji zmian ciśnienia dennego podczas operacji dźwigowych rurami w trakcie rekonstrukcji

Table 1. Summary of data and results of the simulation of bottom-hole pressure changes during crane operation with pipes in the course of the reconstruction

Długość rur, L=H, m	Gęstość cieczy roboczej ρ_c , kg/m ³	Współ. lepkości dynamicznej, η , Pa·s	Prędkość ruchu rur, v m/s	Zmiany ciśnienia cieczy roboczej, Δp_h , MPa	Ciśnienie dennego podczas zapuszczania rur, p_{dz} , MPa	Ciśnienie dennego podczas wyciągania rur p_{dw} , MPa	
1000	1100	0,01	1,0	0,321	7,68	7,04	
			1,5	0,666	8,02	6,69	
			2,0	1,117	8,47	6,24	
	1300	0,015	1,0	0,441	10,25	9,37	
			1,5	0,914	10,72	8,90	
			2,0	1,534	11,34	8,28	
	1500	0,031	1,0	0,634	13,39	12,12	
			1,5	1,315	14,07	11,44	
			2,0	2,208	14,96	10,55	
	1700	0,024	1,0	0,674	15,39	14,04	
			1,5	1,399	16,11	13,32	
			2,0	2,348	17,06	12,37	
	1900	0,05	1,0	0,911	18,57	16,75	
			1,5	1,890	19,55	15,77	
			2,0	3,173	20,83	14,49	
	2000	1100	0,01	1,0	0,642	15,36	14,07
				1,5	1,332	16,05	13,38
				2,0	2,235	16,95	12,48
1300		0,015	1,0	0,881	20,50	18,74	
			1,5	1,828	21,45	17,79	
			2,0	3,068	22,69	16,55	
1500		0,031	1,0	1,268	26,77	24,24	
			1,5	2,631	28,14	22,88	
			2,0	4,415	29,92	21,09	
1700		0,024	1,0	1,349	30,78	28,08	
			1,5	2,798	32,23	26,63	
			2,0	4,696	34,23	24,73	
1900		0,05	1,0	1,822	37,14	33,49	
			1,5	3,781	39,10	31,54	
			2,0	6,346	41,66	28,97	
3000		1100	0,01	1,0	0,963	23,04	21,11
				1,5	1,997	24,07	20,08
				2,0	3,352	25,42	18,72
	1300	0,015	1,0	1,322	30,75	28,11	
			1,5	2,742	32,17	26,69	
			2,0	4,603	34,03	24,83	
	1500	0,031	1,0	1,902	40,16	36,36	
			1,5	3,946	42,2	34,31	
			2,0	6,623	44,88	31,64	
	1700	0,024	1,0	2,023	46,17	42,12	
			1,5	4,197	48,34	39,95	
			2,0	7,044	51,19	37,10	
	1900	0,05	1,0	2,733	55,71	50,24	
			1,5	5,671	58,65	47,30	
			2,0	9,519	62,49	43,46	

Tablica 2. Zestawienie danych oraz wyników symulacji ciśnienia hydraulicznego skal
Table 2. Summary of data and results of the simulation of hydraulic pressure of the rocks

Długość rur, m	Ciśnienie złożowe, G_z MPa	Współczynnik Poissona [-]	Ciśnienie szczelinowania, p_{sz} MPa
1000	7,5	0,18	11,01
		0,22	12,01
		0,28	13,72
	10,0	0,18	12,96
		0,22	13,81
		0,28	15,25
	13,0	0,18	15,30
		0,22	15,96
		0,28	17,08
	15,0	0,18	16,87
		0,22	17,40
		0,28	18,31
18,0	0,18	19,21	
	0,22	19,55	
	0,28	20,14	
2000	15,0	0,18	22,02
		0,22	24,03
		0,28	27,44
	20,0	0,18	25,93
		0,22	27,62
		0,28	30,50
	26,0	0,18	30,61
		0,22	31,92
		0,28	34,17
	30,0	0,18	33,73
		0,22	34,79
		0,28	36,61
36,0	0,18	38,41	
	0,22	39,10	
	0,28	40,28	
3000	22,5	0,18	33,04
		0,22	36,04
		0,28	41,17
	30,0	0,18	38,89
		0,22	41,42
		0,28	45,75
	39,0	0,18	45,91
		0,22	47,88
		0,28	51,25
	45,0	0,18	50,60
		0,22	52,19
		0,28	54,92
54,0	0,18	57,62	
	0,22	58,65	
	0,28	60,42	

Tablica 3. Ocena bezpieczeństwa prac rekonstrukcyjnych dla odwiertów gazowych
Table 3. Evaluation of safety of the reconstruction works for gas wells

Długość, m	Współ. Poissona [-]	Gradient ciśn. złożowego, G_z , MPa/m	Gradient szczelinowania ciśn., G_{sz} , MPa/m	Gradient ciśn. dennego podczas zapuszczania rur, G_{dz} , MPa/m	Gradient ciśn. dennego podczas wyciągania rur, G_{dw} , MPa/m	Warunki bezpieczeństwa dla prędkości ruchu rur, $v=1,5$ m/s		Warunki bezpieczeństwa dla prędkości ruchu rur, $v=0,25$ m/s	
						$G_{dz} < G_{sz}$	$G_{dz} < G_z$	$G_z < G_{dw}$	$G_z < G_{dw}$
1000	0,18	0,0075	0,01101	0,00802	0,00669	-	+	+	+
	0,22		0,01201	0,00802	0,00669	+	+	+	+
	0,28		0,01372	0,00802	0,00669	+	+	+	+
	0,18	0,01	0,01296	0,01072	0,00890	-	+	+	+
	0,22		0,01381	0,01072	0,00890	-	+	+	+
	0,28		0,01525	0,01072	0,00890	+	+	+	+
	0,18	0,013	0,01530	0,01407	0,01144	-	+	+	+
	0,22		0,01596	0,01407	0,01144	-	+	+	+
	0,28		0,01708	0,01407	0,01144	+	+	+	+
	0,18	0,015	0,01687	0,01611	0,01332	-	+	+	+
	0,22		0,01740	0,01611	0,01332	-	+	+	+
	0,28		0,01831	0,01611	0,01332	+	+	+	+
0,18	0,018	0,01921	0,01955	0,01577	-	-	+	+	
0,22		0,01955	0,01955	0,01577	-	-	+	+	
0,28		0,02014	0,01955	0,01577	-	-	+	+	
2000	0,18	0,0075	0,01101	0,00802	0,00669	-	+	+	+
	0,22		0,01201	0,00802	0,00669	+	+	+	+
	0,28		0,01372	0,00802	0,00669	+	+	+	+
	0,18	0,01	0,01296	0,01072	0,00890	-	+	+	+
	0,22		0,01381	0,01072	0,00890	-	+	+	+
	0,28		0,01525	0,01072	0,00890	+	+	+	+
	0,18	0,013	0,01530	0,01407	0,01144	-	+	+	+
	0,22		0,01596	0,01407	0,01144	-	+	+	+
	0,28		0,01708	0,01407	0,01144	+	+	+	+
	0,18	0,015	0,01687	0,01611	0,01332	-	+	+	+
	0,22		0,01740	0,01611	0,01332	-	+	+	+
	0,28		0,01831	0,01611	0,01332	+	+	+	+
0,18	0,018	0,01921	0,01955	0,01577	-	-	+	+	
0,22		0,01955	0,01955	0,01577	-	-	+	+	
0,28		0,02014	0,01955	0,01577	-	-	+	+	
3000	0,18	0,0075	0,01101	0,00802	0,00669	-	+	+	+
	0,22		0,01201	0,00802	0,00669	+	+	+	+
	0,28		0,01372	0,00802	0,00669	+	+	+	+
	0,18	0,01	0,01296	0,01072	0,00890	-	+	+	+
	0,22		0,01381	0,01072	0,00890	-	+	+	+
	0,28		0,01525	0,01072	0,00890	+	+	+	+
	0,18	0,013	0,01530	0,01407	0,01144	-	+	+	+
	0,22		0,01596	0,01407	0,01144	-	+	+	+
	0,28		0,01708	0,01407	0,01144	+	+	+	+
	0,18	0,015	0,01687	0,01611	0,01332	-	+	+	+
	0,22		0,01740	0,01611	0,01332	-	+	+	+
	0,28		0,01831	0,01611	0,01332	+	+	+	+
0,18	0,018	0,01921	0,01955	0,01577	-	-	+	+	
0,22		0,01955	0,01955	0,01577	-	-	+	+	
0,28		0,02014	0,01955	0,01577	-	-	+	+	

- największe niebezpieczeństwo wystąpienia hydraulicznego szczelinowania skał i ucieczki cieczy roboczej w powstałe szczeliny lub erupcji pozaotworowej, występuje przy prędkości zapuszczania rur większej lub równej 1m/s oraz anomalnie wysokim gradientcie ciśnienia złożowego 0,18 MPa/m. Równocześnie w tych samych warunkach występuje zagrożenie erupcyjne podczas wyciągania rur;
- dla wszystkich zestawów danych bezpieczna wartość prędkości zapuszczania rur wynosi około 1 m/s, poza przypadkami występowania anomalnie wysokiego ciśnienia złożowego (G_z równe lub większe od 0,018 MPa/m), w których to przypadkach występuje niebezpieczeństwo niezamierzonego, hydraulicznego szczelinowania skał zbiornikowych ze wszystkimi awaryjnymi konsekwencjami.

2.3. Niebezpieczeństwo urwania przewodu Coiled Tubing na przykładzie prac rekonstrukcyjnych w odwiercie G

Podczas zapuszczania przewodu Coiled Tubing (CT) w celu wypłukania strefy złożowej przy użyciu dyszy obrotowej, w głębokości 3200 m przewód CT zaczął w niekontrolowany sposób opadać w dół. Szybkie opadanie przewodu doprowadziło do złamania się przewodnika głowicowego, a w konsekwencji do gwałtownego (udarowego) zatrzymania się i urwania przewodu. Do odwiertu spadło ok. 3650 m przewodu CT 2 3/8" z zestawem narzędzi do płukania odwiertu w trakcie jego rekonstrukcji. Parametry wytrzymałościowe elastycznego przewodu przedstawione są w tabeli 4.

Parametry technologiczne zarejestrowane tuż przed awarią:

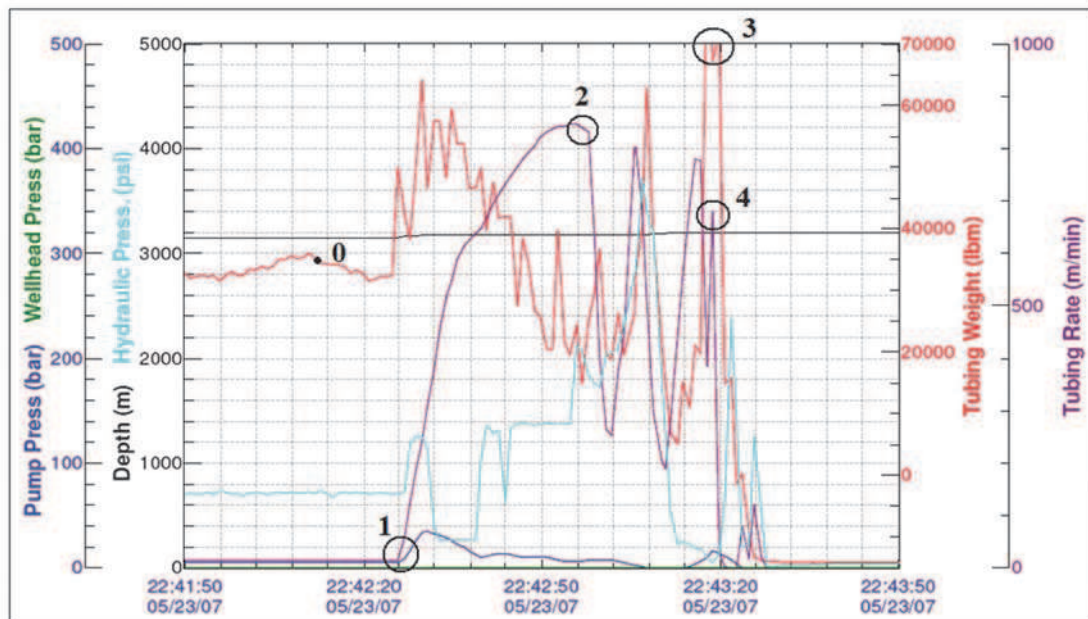
- prędkość zapuszczania przewodu – 0,25 m/s,
- ciśnienie na głowicy przeciwrurowej (*Wellhead Pressure*) - 0,02 MPa,
- ciśnienie na głowicy do wciskania przewodu (*Pressure Injection CT*) – 0,52 MPa.

Na głębokości ok. 3200 m doszło do niekontrolowanego rozwijania się przewodu z bębna i swobodne opadanie do odwiertu ze wzrastającą prędkością. Chwilę później nastąpiło uszkodzenie przewodnika głowicy. Nagłe zatrzymanie przewodu CT spowodowało jego urwanie. W odwiercie pozostało 3650 m elastycznego przewodu z bębna.

Analizując wykresy z aparatury kontrolno-pomiarowej, (rys. 4) można dojść do końcowego wniosku, iż bezpośrednią przyczyną zerwania przewodu CT było przekroczenie wytrzymałości na rozrywanie stali w przekroju krytycznym (u wylotu odwiertu). Mianowicie, analiza przebiegu wykresu ciężaru przewodu wiertniczego wskazuje na jego spadek (punkt 0), świadczący o występowaniu dodatkowego ciśnienia hydraulicznego pod zapuszczanym narzędziem, przeciwstawiającego się zapuszczaniu CT. Wzrost oporów hydraulicznych wypierania cieczy roboczej przez CT, ponad narzędzie prowadzi w konsekwencji do szczelinowania hydraulicznego skał pod zapuszczanym narzędziem i ucieczkę cieczy roboczej. Spowodowało to (pkt.1) niekontrolowane (coraz szybsze) rozwijanie przewodu. W pkt. 2 przewód CT opadał z prędkością 14,1 m/s na drodze 450 m. Następnie nastąpiło wahanie prędkości spowodowane prawdopodobnie zniszczeniem przewodnika głowicy do wciskania przewodu. Ostatecznie przewód gwałtownie wyhamował z prędkości 11,4 m/s (pkt. 4) w ciągu 1 s do prędkość 0 m/s). Spowodowało to zmianę zwrotu wektora siły bezwładności na przeciwny, powodując wzrost siły rozciągającej. Z wykresu wynika, iż wartość siły rozciągającej (wskazanie ciężarowskazu) przekroczyło zakres tj. 311 381 N (pkt. 3) i była większa od wartości dopuszczalnej tj. 321 600 N (tab. 4).

Tabela 4. Parametry techniczne przewodu Coiled Tubing 2 3/8"
Table 4. Technical parameters of the conduit Coiled Tubing 2 3/8"

Średnica zew.	Wymiary, m		Ciężar N/m	Obciążenie dopuszczalne, kN		Dopuszczalne ciśnienie wewnętrzne, MPa
	Nominalna grubość ścianki	Średnica wew.		Minimalna granica plastyczności	Minimalna wytrzymałość na rozrywanie	
0,0603 (2 3/8")	0,0032	0,0540	43,9	260,7	297,6	47,6
	0,0034	0,0535	46,9	281,6	321,6	51,7
	0,0040	0,0524	54,1	322,5	368,3	59,3
	0,0044	0,0514	60,6	360,7	412,3	66,9
	0,0048	0,0507	64,9	386,5	441,7	72,4



Rys. 4. Wykres parametrów pracy jednostki Coiled Tubing podczas awarii [8]

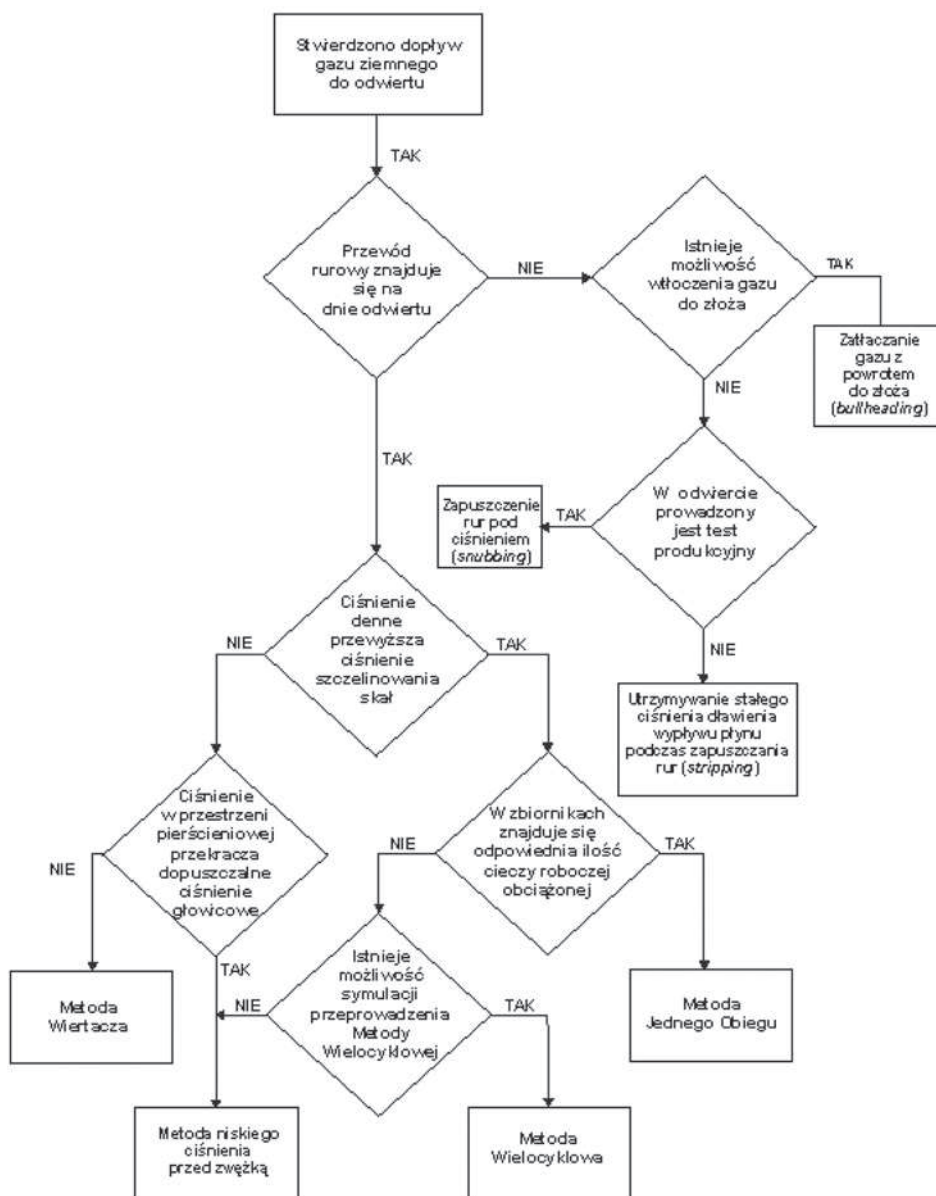
Fig. 4. Graph of parameters of the operation of the unit Coiled Tubing during a break-down [8]

Podsumowując powyższą analizę, można stwierdzić, że w wyniku wnikania cieczy roboczej w powstałe szczeliny, praktycznie zanikły opory hydrauliczne związane z wypieraniem cieczy roboczej przez przewód CT z odwiertu (opadanie przewodu w pustce po wtłoczonej w skałę cieczy roboczej, a nie w cieczy) oraz siły wyporności. Nagłe (awaryjne) wyhamowanie opadającego przewodu spowodowało powstanie nadmiernych sił bezwładności, które w sumie z jego ciężarem spowodowały jego urwanie w górnej części pod głowicą, czyli w przekroju krytycznym.

3. Dobór metody likwidacji erupcji gazu ziemnego podczas rekonstrukcji odwiertów gazowych

Podczas wykonywania odwiertu gazowego (w procesie dowiercania złoża) zawsze występuje znaczny stopień zagrożenia erupcyjnego. Ryzyko wystąpienia trudnej do likwidacji otwartej erupcji gazu ziemnego rośnie w przypadku, gdy do

przestrzeni pierścieniowej odwiertu dopłyne gaz ziemny o objętości większej niż 5 m^3 . Ryzyko to jest duże nawet wówczas, gdy przewód wiertniczy zapuszczony jest do spodu odwiertu. Bowiem w takim przypadku trudno jest usunąć tak dużą objętość gazu z odwiertu, przy równoczesnym utrzymaniu równowagi ciśnień na dnie odwiertu (denne i złożowego). Jeżeli w odpowiednio krótkim czasie nie usuniemy tej poduszki z odwiertu, to bez względu na gęstość stosowanej płuczki, pęcherzyki gazu będą migrować przez słup płuczki ku górze, rozprężając się przy tym i wypierając płuczkę z odwiertu. W przypadku, gdy odwiert jest uszczelniony głowicą przeciwerupcyjną, poduszka gazu będzie przemieszczać się, zachowując swoją objętość i ciśnienie, takie jak w warunkach początkowych na dnie odwiertu (tzn. zaraz po ustabilizowaniu się ciśnienia głowicowego). Migracja poduszki gazu w odwiercie zamkniętym jest niedopuszczalna, gdyż prowadzi do nadmiernego wzrostu ciśnienia dennego przekraczającego ciśnienie hydraulicznego szczelinowania skał i do powstania niekontrolowanej erupcji pozarurowej [3, 4, 7].



Rys. 5. Dobór metody usuwania poduszki gazu ziemnego z odwiertu, z uwzględnieniem warunków bezpieczeństwa rekonstrukcji odwiertów gazowych (na podst. [4] ze zmianami)

Fig. 5. Selection of the method of removing natural gas cushion from the well taking into account safety conditions for the reconstruction of the gas wells (on the basis of [4] with further changes)

W procesie rekonstrukcji odwiertów eksploatacyjnych na konwencjonalnych złożach gazu ziemnego zagrożenie erupcyjne może być znacznie większe niż w procesie dowiercania złoża, zwłaszcza w przypadkach, gdy przewód wydobywczy (lub wiertniczy) jest wyciągnięty z odwiertu. Stosuje się wówczas specjalne metody likwidacji zagrożenia erupcyjnego, takie jak między innymi (Grace, 1994) [6]: *stripping* (sterowanie ciśnieniem dennym polega na utrzymywaniu stałego ciśnienia dławienia wypływu płynu wypieranego z odwiertu podczas zapuszczania rur); *bullheading* (zatłaczanie płynu złożowego najczęściej wraz z siarkowodorem, który przypląnął do odwiertu, z powrotem do złoża); *snubbing* (zapuszczenie rur pod ciśnieniem, z równoczesnym ich uszczelnianiem na głowicy odwiertu). W procesie pogłębiania odwiertu gazowego, gdy przewód wiertniczy jest zapuszczony do dna odwiertu, stosuje się konwencjonalne metody likwidacji erupcji [4, 7]. Stosowanie tych metod podczas rekonstrukcji odwiertów wymaga jednak użycia nowoczesnego wyposażenia przeciwerupcyjnego.

Czynności związane z likwidacją erupcji wstępnej często komplikują się przez zbyt późne zauważenie objawów dopływu gazu ziemnego do odwiertu. W konsekwencji opóźnia to decyzję o zamknięciu wylotu odwiertu głowicą przeciwerupcyjną i powoduje duży dopływ gazu ziemnego do przestrzeni pierścieniowej. Gaz ten powoduje obniżenie ciśnienia dennego wywieranego przez ciecz roboczą w przestrzeni pierścieniowej i następuje rozprężanie się gazu oraz coraz to większy jego dopływ do odwiertu. Grozi to wystąpieniem erupcji otwartej trudnej do likwidacji. Ciśnienie w przestrzeni pierścieniowej ma największą wartość w przypadku gdy poduszka gazu znajdzie się pod głowicą w trakcie jej wytłaczania z odwiertu, z równoczesnym, kontrolowanym dławieniem wypływu gazu. Biorąc powyższe spostrzeżenia pod uwagę, opracowano schemat blokowy umożliwiający dobór metody usuwania gazu z odwiertu, w różnych sytuacjach technologicznych (rys. 5).

5. Podsumowanie

Rekonstrukcje odwiertów eksploatacyjnych w górnictwie naftowym i gazownictwie mogą przynieść znaczne zyski pod warunkiem skutecznego zapobiegania awariom, takim jak erupcja wstępna gazu ziemnego, erupcja pozarurowa, ucieczka cieczy roboczej lub płuczki wiertniczej w skały zbiornikowe. Zapobieganie tym awariom jest możliwe w wyniku prognozowania wartości zmian ciśnienia dennego

dynamicznego podczas operacji dźwigowych rurami w odwiercie, według przedstawionej metodyki.

Przedstawiony przykład analizy przyczyn urwania przewodu typu CT dowodzi istnienia dużych zagrożeń mogących wystąpić podczas operacji dźwigowych tym przewodem. Rekonstrukcja odwiertów gazowych zawsze związana jest z dużym ryzykiem wystąpienia erupcji gazu, spowodowanej zbyt szybkim wyciąganiem rur z odwiertu lub zmniejszeniem gęstości cieczy roboczej w wyniku jej nagazowania. Szybkie rozpoznanie przez załogę dopływu gazu do odwiertu i zamknięcie głowicy przeciwerupcyjnej jest podstawą późniejszego skutecznego przywracania równowagi ciśnień na spodzie odwiertu (dennego i złożowego), z zastosowaniem konwencjonalnych metod likwidacji erupcji wstępnej (metoda jednego obiegu, metoda wiertacza, metoda wielocyklowa, metoda niskiego ciśnienia przed zwężką dławiacą). Stosowanie specjalnego uzbrojenia wylotu odwiertu eksploatacyjnego oraz nowoczesnych urządzeń do rekonstrukcji umożliwiających prace typu: *stripping*, *snubbing*, *bullheading* w znaczący sposób zwiększa warunki bezpieczeństwa tych prac.

Pracę wykonano w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.190.555.

Literatura

1. *Allen T.O., Roberts A.P.*: Production operations: Well completions, workover, and stimulation. Tulsa: Oil & Gas Consultants International, 1982.
2. *Burkhardt J.A.*: Wellbore pressure surges produced by pipe movement. J. Petrol. Technol. 1961, VI, N6, vol.13.
3. *Dubiel S., Chrzęszcz W., Rzychniak M.*: Problemy dowiercania warstw perspektywicznych w otworach naftowych (monografia). Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2001.
4. *Dubiel S., Ziąja J.*: Schematy blokowe analizy warunków otworowych podczas dowiercania złóż węglowodorów oraz wyboru metody likwidacji erupcji wstępnej. „Wiertnictwo, Nafta, Gaz” 2006, Nr 23/1.
5. *Eaton B.A.*: Fracture gradient prediction and its application in oil fields operations. J. Petrol. Technol. 1969, 21, s. 135-136.
6. *Grace R. D., Cudd B., Carden R. S., Shursen J. L.*: Advanced blowout & Well Control. Gulf Publishing Company, Houston 1994.
7. *Uliasz J., Dudek L., Herman Z.*: Poradnik zapobiegania i likwidacji erupcji. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1984.
8. *Ziāja J., Wiśniowski R.*: Analiza przyczyn występowania awarii przy pracach rekonstrukcyjnych z użyciem coiled tubing. „Wiertnictwo, Nafta, Gaz” 2008, t. 25, z. 2.