

## Analiza decyzji technologicznych podejmowanych w zakresie zarządzania złożem węglowodorów przy dowiercaniu, opróbowaniu i udostępnianiu złóż

Analysis of technology decisions within the scope of hydrocarbons resource management by well completion, drill-stem test and first working



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



*Dr hab. inż. Barbara Uliasz-Misiak\**

**Treść:** W publikacji przedstawiono podstawy teoretyczne oraz elementy zintegrowanego zarządzania złożem węglowodorów, z uwzględnieniem stosowanych technologii, źródeł danych, narzędzi badawczych oraz składu zespołu zarządzającego. Na podstawie analizy danych przemysłowych oraz doświadczeń własnych autorów, sformułowano zakresy problemowe odpowiednio dowiercania i opróbowania złóż węglowodorów. Dowiercanie, opróbowanie i udostępnianie skał zbiornikowych realizowane na etapie poszukiwania i rozpoznania złoża węglowodorów cechują się dużym stopniem ryzyka wystąpienia awarii i komplikacji. Odpowiednie zarządzanie tymi pracami jest kluczowe z punktu widzenia decyzyjnego pod kątem realizacji kolejnych etapów działalności górnictwa naftowego. W postaci opracowanego schematu blokowego, w problematyce procesu dowiercania złoża węglowodorów, rozróżniono aspekt bezpieczeństwa dla załogi, środowiska naturalnego i dla zasobów, w nawiązaniu do odpowiednich regulacji prawnych oraz aspekt źródłowego i bieżącego pozyskiwania w tym procesie danych geologiczno-złożowych stanowiących podstawę zintegrowanego zarządzania złożem. W postaci drugiego schematu blokowego przedstawiono problematykę dotyczącą techniki i technologii udostępniania złoża węglowodorów oraz elementy decyzyjne zalecane podczas analizy produktywności poziomów roponośnych i gazonośnych, a także wyznaczania tych poziomów do zabiegów stymulacji wydobywania, albo też do likwidacji udostępnionego poziomu lub całego odwiertu poszukiwawczego. Schemat ten, mimo koniecznych uogólnień, opracowano na podstawie analizy szczegółowych rozwiązań przemysłowych stosowanych w kraju i zagranicą.

**Abstract:** This paper presents the theoretical basis and elements of the integrated hydrocarbons resource management, taking into account the applied technologies, data sources, research tools and the executive management team. Basing on the analysis of the industrial data and own experience of the authors, the scope of matters concerning well completion and drill-stem test was determined. Well completion, drill-stem test and first working of reservoir rocks implemented in the stage of prospecting and recognition of hydrocarbons resource are characterized by substantial degree of risk of any emergency occurrence. Proper management of these tasks is crucial from the decision-making point of view to implement next stages concerning oil mining activities. The problem of well completion of hydrocarbons resource was illustrated with a block diagram which presents separately the aspect of safety of, among others, the crew, natural environment and resources – with attention to relevant provisions of the law, and the aspect of source and current acquisition of the resource and geological data as the fundamental element for integrated resource management. The second block diagram presents the problem of technique and technology of hydrocarbons resource first working and decision-making factors advisable for the analysis of productivity of oil and gas horizons as well as the determination of these horizons for mining stimulation or the liquidation of the available horizon or the complete exploratory borehole. Despite necessary generalizations, this diagram was developed on the basis of the analysis of detailed industrial solutions applied in Poland and abroad.

### **Słowa kluczowe:**

*zarządzanie złożem, ropa naftowa, gaz ziemny, dowiercanie, opróbowanie i udostępnianie*

### **Key words:**

*resource management, crude oil, natural gas, well completion, drill-stem test and first working*

\*<sup>1</sup>) AGH w Krakowie.

**1. Wprowadzenie**

Działalność górnictwa naftowego: poszukiwanie realizowane jest w trzech podstawowych etapach: poszukiwaniu, rozpoznawaniu i eksploatacji złoża kopaliny. Każdy z nich charakteryzuje się odrębnymi procedurami decyzyjnymi. Na etapie poszukiwania i rozpoznania decyzje w zakresie technologii dowiercania, opróbowania i udostępniania wpływają na specyfikę zarządzania złożem węglowodorów.

Pojęcie zarządzania złożem węglowodorów zostało wprowadzone w latach 70. XX wieku i oznacza wykorzystanie wszelkich możliwych środków (ludzkich, technicznych, technologicznych, organizacyjnych) w celu maksymalizacji zysków z eksploatacji złoża przy minimalizacji nakładów kapitałowych i kosztów operacyjnych [9] oraz maksymalizacji współczynnika szczypania. Proces zarządzania złożem węglowodorów, jest wieloletni i złożony. Rozpoczyna się od prac poszukiwawczych, które prowadzą do odkrycia złoża, poprzez prace rozpoznawcze mające na celu udokumentowanie złoża, eksploatację złoża, aż do jego likwidacji, w połączeniu z rekultywacją terenu pogórniczego. Osiągnięcie sukcesu ekonomicznego i optymalne wykorzystanie zasobów złoża możliwe jest dzięki zastosowaniu zintegrowanego systemu zarządzania złożem.

Celem publikacji jest opis problemowy zarządzania złożem oraz procedur systemu decyzyjnego na etapach dowiercania, opróbowania i udostępniania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego.

**2. Proces zarządzania złożem dowiercaniu, opróbowaniu i udostępnianiu złóż węglowodorów**

Prace wiertnicze (dowiercanie, opróbowanie i udostępnianie skał zbiornikowych) realizowane na etapie poszukiwania i rozpoznania złoża węglowodorów charakteryzują się dużym stopniem ryzyka wystąpienia awarii i komplikacji [4, 5].

Wykonywane podczas tych etapów prace geologiczne mają na celu stwierdzenie występowania i wstępne udokumentowanie złoża węglowodorów. Odpowiednie zarządzanie tymi pracami jest kluczowe z punktu widzenia decyzyjnego pod kątem realizacji kolejnych etapów działalności górnictwa naftowego.

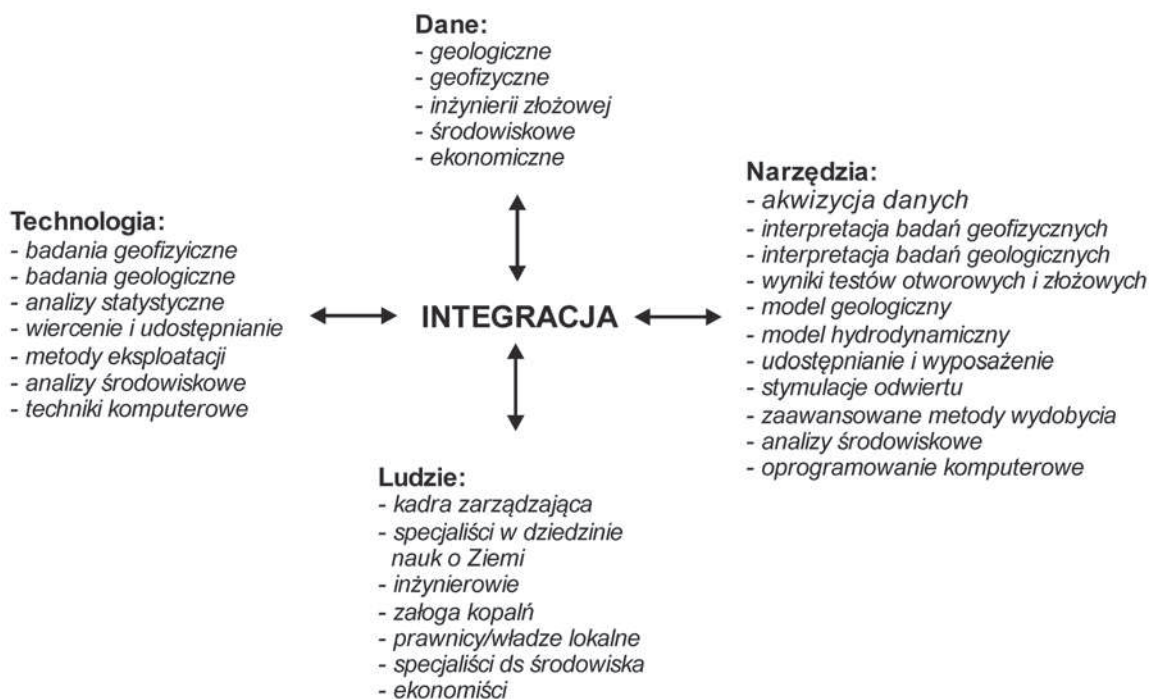
Pewne formy zarządzania złożem były realizowane od dawna, ale tylko w takich przypadkach, gdy planowano działania związane z dużymi nakładami finansowymi (np. zagospodarowanie złoża lub stosowanie wtórnych metod eksploatacji). Tego rodzaju zarządzanie nie było realizowane w sposób zintegrowany, różne dyscypliny realizowały swoje działania oddzielnie. Do lat 70. XX wieku inżynierię złożową uważano za główny element w zarządzaniu złożem. W latach późniejszych koncepcja ta ewoluowała.

Obecnie zarządzanie złożem to działanie zespołu interdyscyplinarnego, w skład którego wchodzi specjalistów z różnych dziedzin (inżynierowie, specjaliści od zarządzania i ochrony środowiska oraz ekonomiści i prawnicy). Postęp w badaniach geofizycznych, geologii, petrofizyce, inżynierii złożowej oraz rozwój technik komputerowych umożliwiają doskonalenie zarządzania złożem [9, 10].

Zarządzanie złożem integruje zagadnienia nauk o Ziemi i inżynierii, obejmuje ono: zasoby ludzkie, technologię, narzędzia i dane źródłowe (rys. 1). Jego podstawą jest połączenie: wymiany informacji, realizacji przyjętych idei, wspólnego wspomagania działań oraz działań zespołowych.

Lepsze narzędzia oraz nowe technologie, takie jak stacje robocze i zintegrowane oprogramowanie, mogą minimalizować bariery pomiędzy poszczególnymi dyscyplinami i tworzyć połączenia pomiędzy specjalistami nauk o Ziemi i inżynierami. Dzięki tej integracji możliwe jest sprawdzenie i walidacja interpretacji sejsmicznej i geologicznej już na etapie prac poszukiwawczych.

Tradycyjnie przy poszukiwaniu złóż węglowodorów dane otrzymywane z różnych źródeł były przetwarzane i analizowane oddzielnie, w efekcie uzyskiwano kilka różnych modeli geologiczny, geofizycznych, eksploatacyjnych i złożowych.



**Rys. 1. Integracja zasobów ludzkich, technologii, danych w zarządzaniu złożem (na podst. Satter, Thakur 1994 ze zmianami)**

**Fig. 1. Integration of human resources, technology and data in the resource management (after Satter, Thakur 1994 with changes)**

Znaczący postęp, który dokonał się w przemyśle naftowym doprowadził do zintegrowania tych modeli, w celu udoskonalenia procesów poszukiwania i rozpoznania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego.

Uwarunkowania środowiskowe musi się uwzględniać na wszystkich etapach prac związanych z poszukiwaniem i eksploatacją złóż węglowodorów, stąd stanowią one ważny element zarządzania złożem. Występowanie akumulacji ropy naftowej lub gazu ziemnego na obszarze chronionym może uniemożliwić jej rozpoznanie i przyszłą eksploatację (parki narodowe lub rezerваты) lub znacznie utrudnić prace (parki krajobrazowe lub obszar NATURA 2000) [11]. Ważnym zagadnieniem jest również minimalizowanie wpływu prac poszukiwawczych i eksploatacyjnych na środowisko naturalne i ludzi do czego zobowiązuje operatorów Prawo Geologiczne i Górnicze [8].

Zarządzanie złożem powinno się rozpocząć w momencie jego odkrycia pracami poszukiwawczymi (geofizycznymi i wiertniczymi), jednak nigdy nie jest za późno, aby zainicjować dobrze przemyślany, zaplanowany i skoordynowany program zarządzania. Wczesne rozpoczęcie tego procesu zapewnia nie tylko lepsze projektowanie, wdrażanie, monitorowanie i ocenę efektywności prowadzenia prac, ale również ogranicza nakłady finansowe, a w dłuższej perspektywie czasowej pozwala na zwiększenie zysków. W początkowym okresie zintegrowanego zarządzania złożem najistotniejsza jest poprawność podejmowania decyzji w zakresie technologii dowiercania, opróbowania, udostępniania złóż ropy naftowej lub gazu ziemnego, prowadzących do osiągnięcia zadawalającego wyniku w postaci udokumentowania zasobów, przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa pracy ludzi oraz zasad ochrony środowiska naturalnego.

Podstawowym celem zintegrowanego zarządzania złożem węglowodorów na etapach jego dowiercania, opróbowania i udostępniania jest akwizycja danych pod kątem optymalizacji ekonomicznej procesu przyszłego zagospodarowania i eksploatacji złoża. Optymalizację taką można zrealizować w wyniku następujących działań elementarnych:

- opracowanie profilu geologicznego otworu poszukiwawczego i wydzielenie poziomów skał zbiornikowych,
- rozpoznanie perspektywiczności i charakterystyka produktywności poziomów skał zbiornikowych w profilu geologicznym otworu oraz ocena właściwości filtracyjnych tych skał i parametrów złożowych;
- specyfikacja wykonanych i ustalenie zakresu planowanych prac wiertniczych w otworach poszukiwawczych lub rozpoznawczych;
- zmniejszenie liczby nieuzasadnionych wierceń oraz badań i pomiarów;
- typowanie poziomów produktywnych do zabiegów intensyfikacji przepływu płynu złożowego, na podstawie analizy danych z testów otworowych i złożowych;
- dokumentowanie zasobów złóż w odpowiedniej kategorii.

### 3. Procedury systemu decyzyjnego w dowiercaniu, opróbowaniu i udostępnianiu złóż węglowodorów

#### 3.1. Procedury systemu decyzyjnego w zakresie dowiercania i opróbowania poziomów perspektywicznych w procesie poszukiwań naftowych

W procesie wiercenia otworów geologiczno-poszukiwawczych realizuje się dwa podstawowe etapy technologiczne: dowiercanie poziomów perspektywicznych wydzielonych badaniami geologicznymi i geofizycznymi, oraz opróbowanie tych poziomów pod kątem oceny ich produktywności.

Dowiercanie poziomów perspektywicznych obejmuje szereg operacji technologicznych, takich jak: przygotowanie płuczek, rdzeniowanie i pobieranie próbek okruchowych, prognozowanie stref o anomalnie wysokim ciśnieniu złożowym, pomiary geofizyczne oraz opróbowanie wydzielonych warstw perspektywicznych kablowymi lub rurowymi próbnikami złoża [4]. Mają one pozwolić na efektywne przebadanie otworu i właściwe udostępnienie poziomu zbiornikowego, a w końcowym etapie przeprowadzenie prac zakończeniowych, umożliwiających maksymalne wydobycie ropy naftowej lub/i gazu ziemnego. Dowiercanie ma na celu udostępnienie poziomów zbiornikowych z zachowaniem możliwie nienaruszonych warunków złożowych i rozpoczyna się od momentu nawiercenia skał ekranujących skały zbiornikowe i przewierceniu poziomu perspektywicznego, a kończy po opróbowaniu tego poziomu w nieorurowanym interwale.

Rozróżnia się dwa podstawowe aspekty dowiercania (por. rys. 2):

- bezpieczeństwo prac wiertniczych i ochrona złoża;
- gromadzenie i przetwarzanie danych źródłowych.

Bezpieczeństwo prac wiertniczych realizowane jest przez przestrzeganie parametrów technologii wiercenia, zapobieganie awariom i komplikacjom wiertniczym (erupcje, ucieczki płuczki, przychwycenia i uszkodzenia rur wiertniczych), odpowiedni dobór rodzaju oraz parametrów technologicznych płuczki wiertniczej. Ważnym zagadnieniem jest również przestrzeganie zasad BHP, ciągłe szkolenie załogi z zakresu BHP oraz zagrożenia erupcyjnego i gazowego (zwłaszcza siarkowodorowego), wyposażenie osobiste załogi oraz sygnalizacja świetlna i dźwiękowa [3].

Dobór wartości ciśnienia dennego wywieranego przez płuczkę w warunkach statycznych (gdy płuczka nie krąży w otworze) oraz w warunkach dynamicznych (krążenie płuczki, dławienie wypływu płuczki, zapuszczanie lub wyciąganie przewodu) wpływa znacząco na bezpieczeństwo prac wiertniczych.

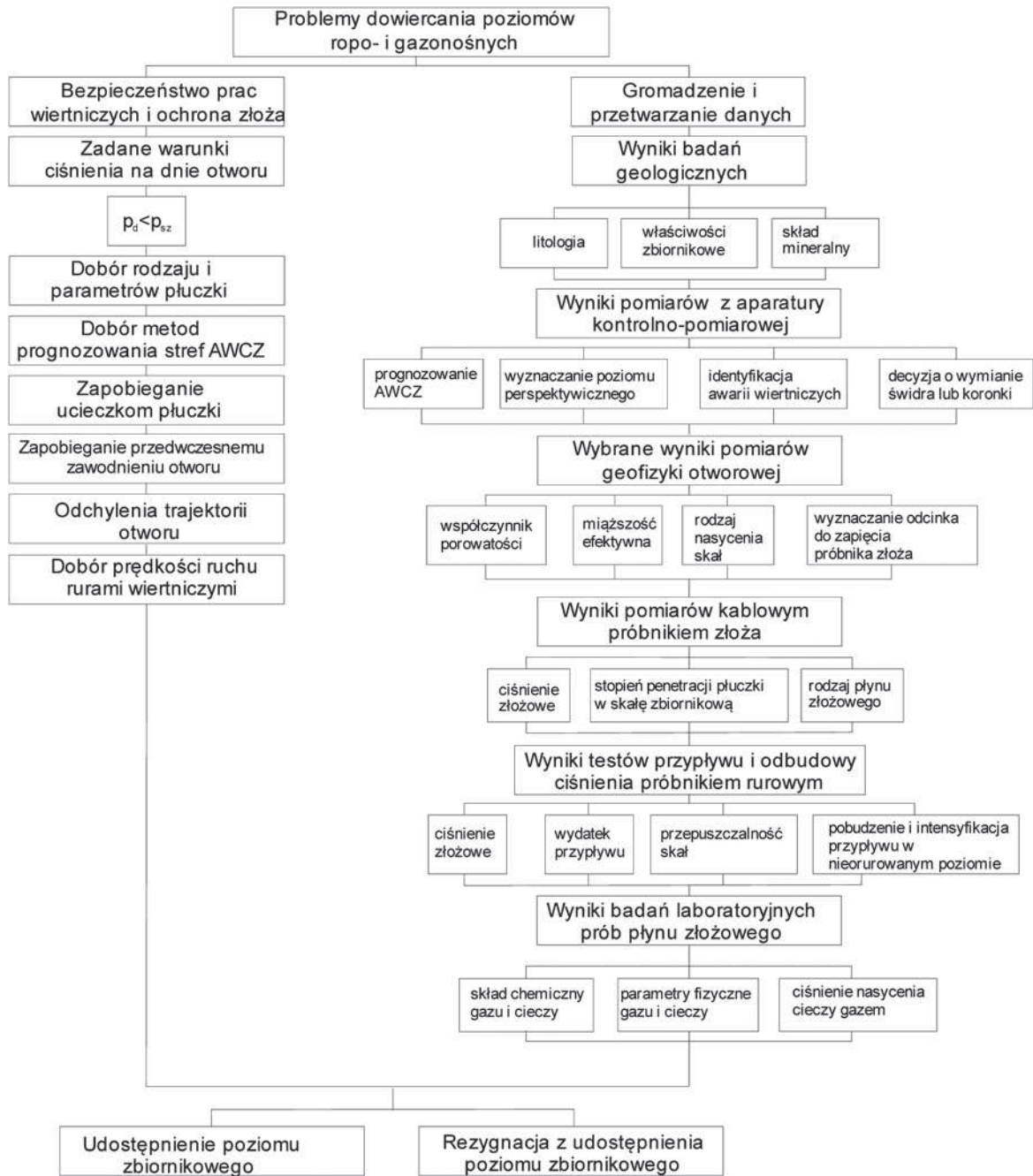
W kraju podczas dowiercania poziomów perspektywicznych stosowana jest technika obrotowa z zastosowaniem płuczki, w przypadku której szczególną uwagę zwraca się na dobór rodzaju i parametrów technologicznych płuczki wiertniczej oparty o analizę warunków geologicznych i złożowych oraz doświadczeń z dowiercania poziomów w poprzednich otworach.

Istotnym warunkiem bezpieczeństwa prac wiertniczych oraz ochrony zasobów jest, aby wartość ciśnienia dennego  $p_d$  nie przekroczyła wartości ciśnienia hydraulicznego szkleniania skał  $p_{sz}$ . Nie spełnienie tego warunku grozi bowiem erupcją pozarurową lub ucieczką płuczki w szczeliny wytworzone w skale zbiornikowej i erupcją wstępną [6]. Niebezpieczeństwa te występują najczęściej podczas zbyt dużej prędkości zapuszczania rur wiertniczych, podczas zbyt dużego dławienia wypływu płynu z przestrzeni pierścieniowej (np. podczas likwidacji erupcji wstępnej metodą dwóch obiegów), a także w czasie intensywnego płukania otworu w przypadkach występowania w przestrzeni pierścieniowej otworu korków ze zwiercin skał ilastych.

Poziomy perspektywiczne należy dowiercać z zachowaniem dużej ostrożności w celu ochrony naturalnej przepuszczalności skał zbiornika złożowego. Niewłaściwa technologia przewiercania poziomów zbiornikowych może spowodować zmniejszenie przepuszczalności skał strefy przyodwrotności [2]. Podstawowe przyczyny uszkodzenia przepuszczalności skały zbiornikowej w strefie przyotworowej są następujące:

- blokowanie przestrzeni porowo-szczelinowej skały zbiornikowej przez cząstki stałe znajdujące się w płuczce,
- zwiększenie nasycenia przestrzeni porowej wodą (filtrem płuczki) powodujące zmniejszenie przepuszczalności względnej dla węglowodorów,





Rys. 2. Schemat problemowy dowiercania poziomów produktywnych:  $p_d$  – ciśnienie denne podczas wiercenia,  $p_{sz}$  – ciśnienie szczelinowania, AWCZ – anomalnie wysokie ciśnienie złożowe

Fig. 2. Schematic problem of well completion of productive horizons:  $p_d$  – bottom pressure  $p_{sz}$  – fracture pressure, AWCZ – abnormally high pressure

- powstawanie emulsji typu woda-ropa o wysokiej lepkości,
  - pęcznienie minerałów ilastych pod wpływem wodnego filtratu płuczkowego ograniczające przepuszczalność skał zbiornikowych,
  - wytrącanie się osadów soli w wyniku niezgodności chemicznej wodnego filtratu płuczkowego i wody złożowej.
- W niektórych przypadkach może spowodować to zahamowanie przyływu płynu złożowego do odwiertu, nawet przy zastosowaniu dużych depresji ciśnienia dennego (np. w skałach zbiornikowych porowo-szczelinowych).

Za podstawowe kryteria doboru płuczki do dowiercania poziomu zbiornikowego przyjęto: wytworzenie planowanej represji (lub depresji) ciśnienia na poziom zbiornikowy,

ochronę przepuszczalności skały zbiornikowej w strefie przyotworowej oraz zapobieganie powstawaniu erupcji wstępnej oraz ucieczek płuczki.

W przypadku dowiercania poziomów roponośnych o anomalnie niskim gradiencie ciśnienia złożowego (mniejszym od 0,0098 MPa/m) stosować można płuczki olejowe lub pianowe. Możliwe jest wówczas dowiercanie w warunkach podciśnienia na spodzie otworu (depresja ciśnienia).

Ochrona przepuszczalności skały zbiornikowej realizowana jest przez:

- stosowanie płuczek o małej: zawartości fazy stałej, filtracji i lepkości oraz minimalizację czasu oddziaływania płuczki pod ciśnieniem na skały zbiornikowe, stosowanie

blokatorów i polimerów regulujących przepuszczalność względną skał;

- unikanie nagłych zmian ciśnienia płuczki ze względu na możliwość zamykania i rozwierania się szczelin w skałach zbiornikowych;
- stosowanie depresji ciśnienia płuczki podczas dowiercania poziomów skał zbiornikowych o niskim gradiencie ciśnienia złożowego.

W wyniku stosowania blokatorów (np. węglanowych) dodawanych do płuczki wiertniczej zapobiegać można ucieczkom płuczki oraz erupcjom wstępnym, zwłaszcza podczas przewiercania szczelinowo-porowych skał zbiornikowych.

Prognozowanie stref o anomalnie wysokim ciśnieniu porowym (AWCP) lub złożowym (AWCZ) podczas przewiercania skał zbiornikowych (porowatych i przepuszczalnych) lub ekranujących umożliwia między innymi dobór gęstości płuczki, konstrukcji otworu wiertniczego i wyposażenia przeciwerupcyjnego oraz zapobieganie powstawaniu awarii wiertniczych (przechwyceń rur, erupcji otwartych i pozarurowych oraz ucieczek płuczki i in.). Prognozowanie to realizuje się na podstawie danych z profilowania: mechanicznej prędkości wiercenia, wykładnika potęgowego w równaniu na zwiercalność skał, wytrzymałości skał na rozzerwanie oraz z erupcji wstępnej.

Odchylenie trajektorii otworów pionowych na kierunkowe lub horyzontalne realizuje się w przypadkach: powstawania stożków wodnych lub gazowych, przechwycenia przewodu wiertniczego, występowania kilku systemów szczelin w poziomach szczelinowo-porowych skał zbiornikowych oraz nawiercania zawodnionej strefy poziomu perspektywicznego.

Dobór prędkości ruchu rurami wiertniczymi (rury płuczki, okładzinowe, wydobywcze) w otworze wypełnionym płuczką wiertniczą ma na celu zapobieganie wystąpieniu erupcji wstępnej płynu złożowego, albo zawodnienia otworu podczas zbyt szybkiego wyciągania rur oraz ucieczce płuczki i erupcji pozarurowej podczas zbyt szybkiego zapuszczania rur.

Opróbowanie poziomu perspektywicznego rurowym próbnikiem złoża w procesie dowiercania polega na wykonaniu krótkotrwałych (60÷90 min) testów przyływu płynu i odbudowy ciśnienia dennego (60÷120 min). Na podstawie testów przyływu określa się wydatek przyływu oraz wskaźnik wydajności, dzięki temu ocenić można produktywność poziomu perspektywicznego. Na podstawie wyników testu odbudowy ciśnienia dennego określa się parametry złożowe (a zwłaszcza ciśnienie złożowe i przepuszczalność skał), a także parametry zmian przepuszczalności (uszkodzenie, polepszenie), takie jak skin-efekt, promień strefy złoża o uszkodzonej przepuszczalności, granice złoża i inne [5]. Pobrane z próbnika próby płynu złożowego (gaz, ropa, woda) przekazywane są do badań laboratoryjnych. Analizując wartości skin-efektu oraz promienia strefy kolmatacji określone na podstawie dwucyklowych opróbowań można typować badany poziom perspektywiczny do zabiegów pobudzania lub intensyfikacji przyływu płynu złożowego [7]. Opróbowanie poziomów perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża (RPZ) wykonuje się w trakcie wiercenia otworu geologiczno-poszukiwawczego, lub po jego zakończeniu. Na etapie dowiercania jest ono prowadzone w nieorurowanych odcinkach otworu wiertniczego [1].

Stosowane w poszukiwaniach naftowych kablówce próbniki złoża (zapuszczane na kablówce geofizycznym do otworu wiertniczego) umożliwiają pobranie próbki płynu o objętości od kilkunastu do kilkudziesięciu litrów ze strefy przyodwiertowej, w celu zbadania obecności węglowodorów w tej próbce i ustalenia kolejności stratygraficznej (poziom zbiornikowy – ekran) oraz zarejestrowanie krzywej wzrostu ciśnienia dennego dla oszacowania wielkości ciśnienia złożowego. W wyniku opróbowania poziomu perspektywicznego ka-

blowym próbnikiem złoża uzyskuje się próbkę płynu składającą się głównie z płuczki wiertniczej i filtratu ze strefy przyodwiertowej. Bituminy w ilościach minimalnych można wykryć w próbce, wykonując jej szczegółową analizę laboratoryjną.

Na podstawie analizy i interpretacji danych uzyskanych na etapie poszukiwań naftowych podejmuje się decyzję o udostępnieniu poziomu zbiornikowego (rurowanie, cementowanie, perforacja lub zaniechania tego udostępnienia (uzyskując oszczędności ekonomicznej)).

Podczas dowiercania i opróbowania poziomów perspektywicznych gromadzi się i przetwarza dane, które są uzyskiwane z następujących źródeł:

- laboratorium kontrolno-pomiarowego (systemu rejestrującego, umożliwiającego automatyczny monitoring oraz gromadzenie i przetwarzanie danych geologiczno-złożowych i wiertniczych)
- badań geologicznych (analiz rdzeni i prób okruszowych, objawów węglowodorów, i obserwacji płuczki);
- badań geofizyki otworowej, która dostarcza szereg informacji o właściwościach zbiornikowych skał;
- erupcji wstępnych możemy uzyskać informacje o złożu (wartości ciśnienia złożowego i rodzaju płynu złożowego);
- badań kablówkami i rurowymi próbnikami złoża, testów hydrodynamicznych wykonywanych u wylotu odwiertu (próbna eksploatacja).

### 3.2. Zakres problemowy i wynikowy opróbowania i udostępniania w wybranych pracach rozpoznawania złóż węglowodorów

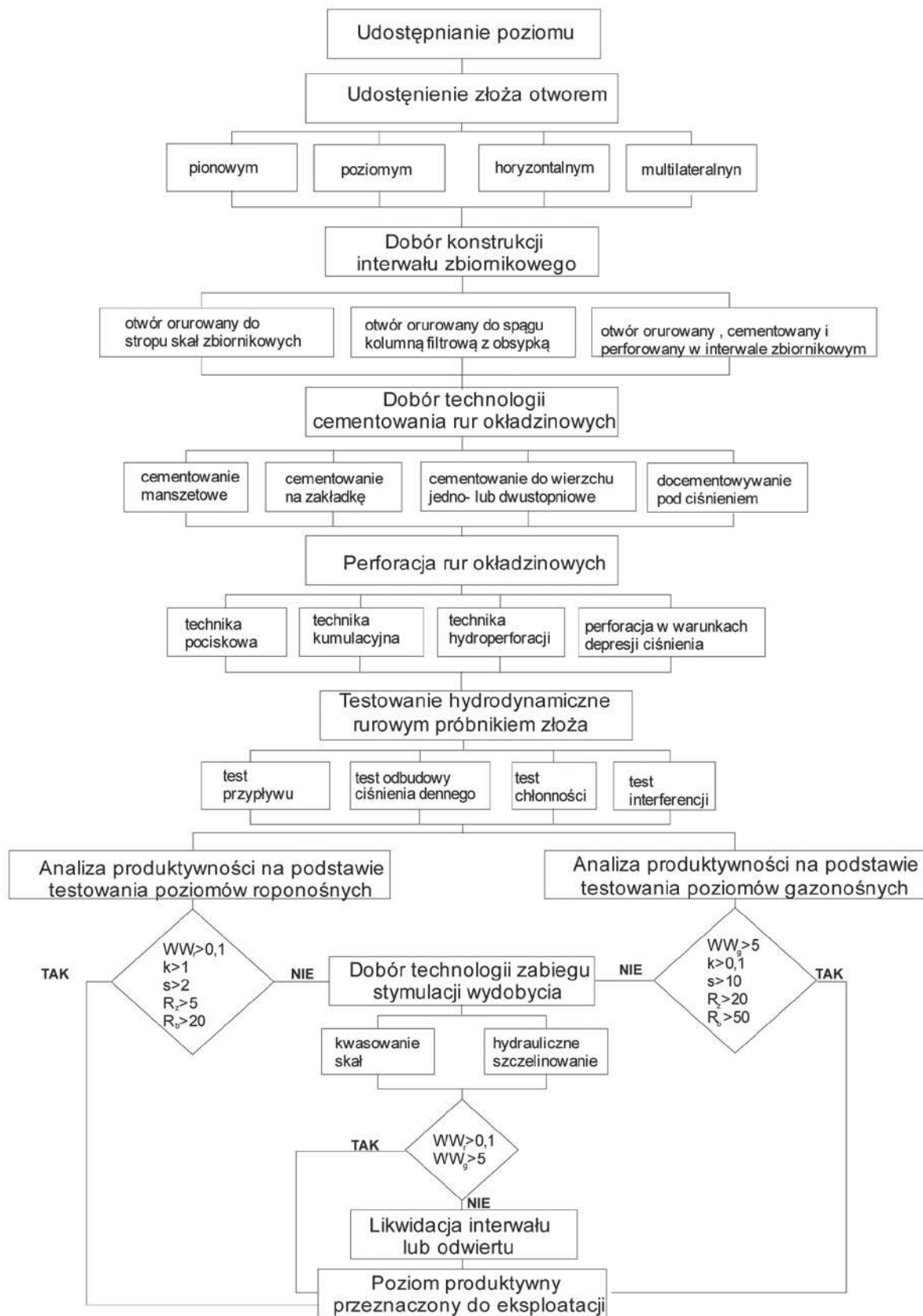
Udostępnianie złoża do eksploatacji może być realizowane odwiertem pionowym lub kierunkowym, nieorurowanym lub orurowanym w strefie złożowej (z perforacją rur okładzinowych) oraz z zastosowaniem pakerów lub korków cementowych umożliwiających selektywne wykonywanie poszczególnych zabiegów technologicznych (testowanie, stymulacja, produkcja). Proces udostępniania złoża obejmuje także zabiegi pobudzania i intensyfikacji przyływu płynu złożowego do odwiertu (rys. 3).

#### 3.2.1. Rozpoznanie poziomu zbiornikowego

Na etapie dowiercania rozpoznanie realizuje się zwykle otworami pionowymi, gdyż ułatwione jest rdzeniowanie i opróbowanie. Odchylenie osi otworu od pionu (otwory kierunkowe i horyzontalne) jest zwykle dokonywane w procesie udostępniania złoża, w zależności od warunków geologiczno-złożowych (uskoki, wyklinowania, szczelinowatość skał zbiornikowych, woda podścielająca i in.). Otwory horyzontalne oraz multilateralne wykonywane są głównie w przypadku udostępniania złóż wielowarstwowych.

#### 3.2.2. Wybór konstrukcji strefy eksploatacyjnej

Wyposażenie odwiertu w strefie eksploatacyjnej obejmuje następujące prace: rurowanie, cementowanie rur okładzinowych i wtórnie udostępnienie poziomu perspektywicznego przez perforację rur okładzinowych. Wykończenie odwiertu powinno być wynikiem decyzji podjętych w fazie interpretacji wyników opróbowania poziomu DST (zabieg intensyfikacji przyływu, wydobywanie ropy i gazu po testowaniu hydrodynamicznym). Wybór konstrukcji spodu odwiertu można podzielić na dwie grupy uwzględniając usytuowanie buta rur okładzinowych w stropie lub spągu skał zbiornikowych. W przypadku odwiertu orurowanego do spągu skał zbiornikowych można zastosować: rury okładzinowe cementowane do stropu skał zbiornikowych oraz filtr rurowy do spągu; rury okładzinowe cementowane i perforowane; rury okładzinowe



Rys. 3. Schemat zakresu prac udostępniania i testowania poziomu skał zbiornikowych po ukończeniu wiercenia otworu:  $WW_r$ ,  $WW_g$  – wskaźnik wydajności ropy i gazu (odpowiednio  $m^3/h/MPa$  i  $m^3/min/MPa$  w warunkach powierzchniowych);  $k$  – przepuszczalność skał (mD),  $S$  – skin-efekt;  $R_z$  – promień złoża strefy o zmienionej przepuszczalności (m);  $R_b$  – promień strefy złoża badanej próbnikiem (m).

Fig. 3. Range of first working and testing of the level of reservoir rocks after well completion works:  $WWR$ ,  $WWG$  – oil and gas productivity coefficient (respectively  $m^3/h/MPa$  and  $m^3/min/MPa$  in surface conditions),  $k$  – rock permeability (mD),  $s$  – skin-effect;  $R_z$  – radius of the zone of altered permeability (m);  $R_b$  – radius of the test zone (m)



cementowane i perforowane oraz filtr rurowy albo rury okładzinowe cementowane i perforowane oraz filtr żwirowy wykonany pod ciśnieniem i filtr rurowy. W przypadku odwiertu orurowanego do stropu skał zbiornikowych spód odwiertu mogą stanowić: nieorurowane skały zbiornikowe; kolumny rur traconych z filtrem rurowym bez pakera, kolumny rur traconych z filtrem rurowym, paker lub poszerzony spód odwiertu z filtrem żwirowym oraz filtrem rurowym. Konstrukcję orurowaną, cementowaną do wierzchu perforowaną w interwale zbiornikowym stosuje się powszechnie w utrudnionych warunkach geologiczno-złożowych, takich jak: anomalnie wysoki gradient ciśnienia złożowego (większy od 0,0127 MPa/m), występowanie siarkowodoru w płynie złożowym, intensywne szczelinowatość skał, a także w przypadkach planowanej, selektywnej stymulacji wydobywania węglowodorów. W takich przypadkach zaleca się stosowanie hydroperforacji obudowy otworu wiertniczego. Jednak powszechnie stosuje się technikę perforacji kumulacyjnej. W przypadku stwierdzenia pomiarów geofizyki otworowej nieszczelności zacementowania rur okładzinowych, stosuje się docementowywanie poprzez perforację obudowy w interwale nieszczelności. Zaczyn cementowy zatłacza się pod ciśnieniem mniejszym od ciśnienia hydraulicznego skał lub większym, co daje lepszy efekt w zbitych i zwięzłych skałach.

### 3.2.3. Cementowanie rur okładzinowych

Dobór odpowiedniej techniki i technologii cementowania ostatniej (eksploatacyjnej) kolumny rur okładzinowych należy poprzedzić analizą warunków geologicznych, petrofizycznych i technicznych w otworze wiertniczym uwzględniając poniższe kryteria jakościowe: efektywne izolowanie poziomów ropy, gazu, wody; przeciwdziałanie uszkodzeniu przepuszczalności skał zbiornikowych podczas zabiegu cementowania; przeciwdziałanie szczelinowaniu skał i ubytkom cyrkulacji zaczynu cementowego; minimalizowanie ryzyka technicznego (głównie erupcji pozarurowych) i kosztów.

Do cementowania rur okładzinowych stosowane są różne narzędzia pod względem konstrukcji i przeznaczenia. Powinno się stosować narzędzia do oczyszczania ściany odwiertu z osadu ilowego, centralizatory, klocki cementacyjne, głowice cementacyjne, zróżnicowane rodzaje zaworów cementacyjnych oraz narzędzia do cementowania wielostopniowego (mufy cementacyjne).

### 3.2.4. Perforowanie rur okładzinowych

Perforowanie rur okładzinowych ma na celu wtórne udostępnienie poziomu skał zbiornikowych poprzez wykonanie prawidłowo ułożonych otworów o gładkich ściankach, przebijających kolumnę (kolumny) rur okładzinowych wraz z kamieniem cementowym oraz kilkadziesiąt centymetrów skały zbiornikowej. Wykorzystywane są następujące techniki perforowania: kumulacyjne, pociskowe i hydroperforacja.

Przy projektowaniu interwału perforacji uwzględnia się:

- położenie powierzchni kontaktu ropa-woda i spągu czapy gazowej (kontakt gaz-ropa)
- wielkość depresji podczas wydobywania ropy i gazu,
- współczynnik przepuszczalności pionowej skały zbiornikowej,
- minimalny interwał do otrzymania maksymalnego dopuszczalnego wydobywania początkowego oraz maksymalnego szczytowego wydobywania ropy ze złoża.

Na etapie poszukiwań, w trakcie dowiercania poziomów perspektywicznych, wyniki opróbowań stanowią podstawę do wstępnej oceny produktywności badanego poziomu w nieorurowanym interwale otworu. Na etapie rozpoznania poziomu uznane za produktywne opróbowywane są próbnikiem złoża, po ukończeniu wiercenia otworu do plano-

wanej głębokości i wykonaniu okładziny otworu. W takim przypadku poziomy te udostępnia się do opróbowania przez perforację, najczęściej kumulacyjną, rzadziej pociskową lub hydroperforacją. Hydroperforacja zalecana jest szczególnie w przypadkach planowania hydraulicznego szczelinowania po opróbowaniu. Nowoczesnym rozwiązaniem jest perforacja rur okładzinowych w warunkach depresji ciśnienia (podciśnienia). Perforacja wykładziny otworu wykonywana zwykle w warunkach represji ciśnienia słupa płuczki, prowadzi bowiem do blokowania otworów perforacyjnych cząstkami stałymi z płuczki (cząstki ilaste, baryt, sól, rdza, polimery) i stwarza utrudnione warunki przepływu płynu złożowego do otworu. W celu poprawy tych warunków, coraz częściej perforację okładziny otworu wykonuje się perforatorami kumulacyjnymi podwieszonymi pod zestawem rurowego próbnika złoża typu Full-Flo 5" z pełnym przelotem wewnętrznym. Przelot ten umożliwia m.in. swobodne opadanie w przewodzie próbnikowym zbijaka inicjującego detonację ładunków wybuchowych perforatora modułowego. Rejestrujące ciśnieniomierze wgłębne umieszcza się wówczas w specjalnej osłonie nad uszczelniaczem, aby nie uległy uszkodzeniu zalecane jest także stosowanie specjalnych amortyzatorów drgań. Odpalenie ładunków perforacyjnych realizuje się po zapieciu uszczelniacza próbnika, dzięki czemu kanały perforacyjne wytworzone zostają w warunkach depresji ciśnienia na dnio otworu i nie podlegają wówczas intensywnej kolmatacji.

### 3.2.5. Technika testowania hydrodynamicznego

Testowania hydrodynamiczne rurowym próbnikiem złoża po ukończeniu wiercenia polegają na pomiarze ciśnienia dennego podczas przyprywu płynu złożowego oraz podczas wzrostu i ustalania się ciśnienia dennego w odwiercie. Stosowane są również testowania hydrodynamiczne, które ujednolicają pomiary ciśnienia w czasie przyprywu płynu złożowego i w czasie wzrostu i stabilizowania się ciśnienia dennego, przeprowadzone w odwiertach orurowanych lub nierurowanych, wykończonych chwilowo przy użyciu rurowego próbnika złoża (test DST). Interpretacja wyników testowania hydrodynamicznego pozwala na dokładną identyfikację systemu złożowego i wymaga od specjalistów znajomości podstaw teoretycznych oraz umiejętności interpretacji.

Opróbowane poziomy do prac przygotowania wydobywania ropy lub gazu, zabiegu pobudzania przyprywu lub intensyfikacji przyprywu oraz zamknięcia poziomu lub likwidacji odwiertu można kwalifikować w oparciu o następujące kryteria: wartości minimalnego natężenia przyprywu ropy lub gazu, wartości wskaźnika uszkodzenia przepuszczalności skały zbiornikowej w strefie przyodwiertowej, wartości ilorazu wskaźnika wydobywania po zabiegu intensyfikacji przyprywu do wskaźnika wydobywania w warunkach idealnych.

### 3.2.6. Przygotowanie do eksploatacji ropy i gazu

Eksploatacja ropy i gazu prowadzona jest po wyposażeniu odwiertu w stałą instalację wgłębna i napowierzchniową w przeciwieństwie od testowania, które realizuje się po chwilowym wyposażeniu odwiertu. W oparciu o wyniki testowania określa się warunki oraz wyposażenie wgłębne i powierzchniowe do eksploatacji samoczynnej lub mechanicznej.

### 3.2.7. Likwidacja poziomu zbiornikowego lub odwiertu

Zamknięcie poziomu w odwiercie lub likwidacja odwiertu po określeniu jego nieprzydatności przemysłowej lub po zakończeniu wydobywania regulowane jest przepisami prawa górnictwa. Wykonywana w celu zamknięcia przyprywu płynów złożowych do odwiertu i zapobiegnięcia cyrkulacji płynów pomiędzy poziomami skał zbiornikowych. Likwidację odwiertu realizuje się poprzez zastosowanie rur płuczkowych

lub rur wydobywczych, a także przy użyciu łyżki lub innych narzędzi zapuszczonych na linie. Stosuje się również materiały uszczelniające, takie jak tworzywa sztuczne, cement, gipso-cement i gips wiertniczy, aby przeprowadzona likwidacja odwiertu była prawidłowa.

#### 4. Wnioski

1. Zintegrowane zarządzanie złożem węglowodorów obejmuje wybór racjonalnych rozwiązań technicznych i technologicznych, ze szczególnym uwzględnieniem: bezpieczeństwa prac dla środowiska naturalnego; ochrony złoża pod kątem maksymalnego wykorzystania jego zasobów; realizowany podczas całego procesu życia (istnienia) złoża.
2. Szczególnie ważna jest z tego względu bieżąca akwizycja danych pozyskiwanych przy wykorzystaniu wszystkich możliwych narzędzi (źródeł), pod kątem podejmowania decyzji technologicznych zapewniających wymienione w publikacji aspekty bezpieczeństwa oraz efektywność prac.
3. Omówione w publikacji początkowe etapy tj. poszukiwanie i rozpoznawanie złoża charakteryzują się szerokimi zakresami problemowymi ( technicznymi i technologicznymi), z zakresu dowiercania, opróbowania i udostępniania poziomów perspektywicznych. Ważniejsze z tych problemów opracowano w postaci schematów blokowych umożliwiających (ułatwiających ) wybór racjonalnych rozwiązań.

Pracę wykonano w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.190.555

#### Literatura

1. *Dubiel S.*: Zagadnienia opróbowania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego : cz. I. Opróbowanie poziomów skał zbiornikowych w procesie wiercenia otworu. Wydawnictwa AGH, Kraków 1992, s. 265.
2. *Dubiel S.*: Analiza zmian naturalnej przepuszczalności skał zbiornikowych miocenu w strefie przyodwiertowej na podstawie wyników badań próbnikami rurowymi. *Drilling, Oil, Gas, R.* 19/1 2002, s. 53÷58.
3. *Dubiel S., Bukalski P.*: Bezpieczeństwo dowiercania złóż węglowodorów w regulacjach prawnych. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, nr 10 2007.
4. *Dubiel S., Chrzaszcz W., Ryzczyński W.*: Problemy dowiercania warstw perspektywicznych w otworach naftowych. *Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2001, s. 168.*
5. *Dubiel S., Chrzaszcz W., Ryzczyński W.*: Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża. *Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003, s. 223.*
6. *Dubiel S., Macuda J., Ziąja J.*: Procedury decyzyjne przy dowiercaniu złóż węglowodorów w warunkach zagrożenia erupcyjnego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi Tom 24, Zeszyt 2/1 2008.*
7. *Dubiel S., Uliasz-Misiak B.*: Wykorzystanie testów DST w rozpoznaniu i udostępnianiu złóż węglowodorów na przykładzie utworów jury górnej-kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi 2014 (w druku).*
8. *Prawo Geologiczne i Górnicze – Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. (Dz.U. 2011 nr 163 poz. 981).*
9. *Satter A., Thakur G.C.*: *Integrated reservoir petroleum management: team approach.* PennBook, Tulsa 1994, s. 172.
10. *Thakur G.C.*: *What Is Reservoir Management?* *Journal PT June 1996-s. 521÷525.*
11. *Uliasz-Misiak B., Winid B.*: Eksploatacja złóż węglowodorów zlokalizowanych w obszarach chronionych. *Rocznik Ochrona Środowiska t. 14, 2012, s. 919÷929.*