

**Rafał Wiśniowski, Stanisław Stryczek\***

## **STAN AKTUALNY I ROZWÓJ TECHNOLOGII I TECHNIK WIERTNICZYCH\*\***

### **1. WSTĘP**

Spośród obecnie stosowanych technologii wierceń wyróżnić można metody okrętne, udarowe, obrotowe oraz różne ich kombinacje. Znane są próby wierceń wykorzystujących inne rozwiązania techniczno-technologiczne (metody termiczne, stosowanie ładunków wybuchowych, wiercenie za pomocą plazmy, urabianie chemiczne czy hydrauliczne), jednakże dotychczas nie zastosowano ich w pełni w przemyśle i pozostają nadal w sferze badań w skali laboratoryjnej lub półtechnicznej.

Przyczyną tego stanu jest niemożność racjonalnego sterowania procesem technologicznym, uszkodzenie strefy przyodwiertowej lub duża energochłonność stosowanej technologii, negatywnie wpływająca na rachunek ekonomiczny przedsięwzięcia wiertniczego. Obecnie jedynie wiercenie hydrauliczne w skałach słabozwięzłych podczas wykonywania horyzontalnych przewiertów sterowanych można uznać za nową technologię, która znalazła pełne praktyczne zastosowanie.

Odmiana wysokociśnieniowa tej technologii, czyli urabianie skał ukierunkowaną strugą cieczy pod wysokim ciśnieniem wykorzystywane jest między innymi w górnictwie węglowym, odkrywkowym i skalnym. W wiertnictwie jednak nie znalazło dotychczas ekonomicznego uzasadnienia. Rozwój technik i technologii wiertniczych koncentruje się więc obecnie na udoskonalaniu już istniejących metod w celu zwiększenia efektywności ich aplikacji.

### **2. OBSZARY APLIKACJI OTWORÓW WIERTNICZYCH**

Otwory wiertnicze wykonywane są w celu realizacji różnych potrzeb działalności inżynierskiej, począwszy od zastosowań geotechnicznych i geoinżynierskich, poprzez budowlane, na rozmaitych górniczych aplikacjach kończąc [12]. Ze względu na zróżnicowanie

---

\* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Zakład Wiertnictwa i Geoinżynierii.

\*\* Praca zrealizowana w ramach Badań Własnych WwNiG AGH.

i specyfikę zastosowań otworów wiertniczych nie dokonuje się szczegółowego ich podziału obejmującego pełen obszar aplikacji, a jedynie ogranicza się do kilku głównych kryteriów kwalifikacyjnych.

W zależności od celu i przeznaczenia otwory wiertnicze można podzielić na:

- geologiczne,
- badawcze,
- poszukiwawcze,
- eksploatacyjne,
- wiercone na cele specjalne (np. pobieranie próbek gruntów, skał, badań fundamentowych, inżynieryjnych, hydrogeologicznych, studziennych, górnictwa podziemnego i odkrywkowego).

Biorąc pod rozwagę końcową głębokość wiercenia, można wyróżnić otwory:

- płytkie (wykonywane zestawami wiertniczymi ręcznymi lub maszynowo),
- głębokie (wykonywane wiertnicami przewoźnymi lub stacjonarnymi),
- super głębokie (wykorzystujące wiertnice stacjonarne).

Rozważając średnicę otworu, otwory wiertnicze dzieli się na:

- małośrednicowe ( $\phi < 100$  mm),
- normalnośrednicowe ( $100 \text{ mm} < \phi < 500$  mm),
- wielkośrednicowe ( $\phi > 500$  mm).

Otwory do celów geologicznych, badawczych i poszukiwawczych surowców bądź kopalin stałych są wiercone z zasady wiertnicami małośrednicowymi typu wrzecionowego, techniką rdzeniową w celu uzyskania próbek skał i kopalin użytecznych.

Otwory geologiczne i poszukiwawcze służące do celów górnictwa naftowego są z reguły otworami normalnośrednicowymi i wiercone są metodą obrotową przy użyciu świrdrów i koronek gryzowych, diamentowych i skrzydłowych.

Płytkie otwory wielkośrednicowe – studzienne i odwodnieniowe wierci się najczęściej metodą obrotową z normalnym lub odwrotnym obiegiem płuczki wywołanym pompą ssącą, strumienicą lub podnośnikiem powietrznym.

Metodą obrotową normalnośrednicową wykonuje się otwory eksploatacyjne przeznaczone do wydobywania kopalin stałych metodą roztwarzania np. sól kamienna lub podziemnego wytapiania siarki.

Otwory normalnośrednicowe wykonywane są również w celu zamrożenia słabozwiązanych i zawodnionych skał (otwory mrożeniowe).

Niezależnie od przeznaczenia otworu wiertniczego, jego głębokości oraz średnicy wyróżnić można następujące obszary ich zastosowań:

- górnictwo podziemne, odkrywkowe i skalne;
- górnictwo naftowe i podziemne magazynowanie surowców płynnych;
- budownictwo, hydrotechnika oraz inżynieria i ochrona środowiska.

Na potrzeby górnictwa podziemnego, odkrywkowego i skalnego wykonuje się poziome, pionowe i kierunkowe otwory małoś-, normalno- i wielkośrednicowe. Wyróbiska małoś- i normalnośrednicowe to zazwyczaj otwory odgazowujące pokłady węglowe oraz wykonywane

w celu zgazowania węgla, odprężające górotwór, otwory mrożeniowe i otwory strzałowe, rdzeniowe (umożliwiające pobieranie próbek skalnych), uszczelniające lub wzmacniające masyw skalny. Otwory wielkośrednicowe wiercone są jako szyby wydobywcze i wentylacyjne, odwadniające, komunikacyjne (chodniki, tunele, sztolnie, pochyłnie).

Górnictwo złóż węglowodorów wykorzystuje normalnośrednicowe otwory pionowe i kierunkowe do poszukiwania, badania i rozpoznawania struktur geologicznych stanowiących naturalne pułapki dla surowców płynnych, a następnie racjonalnej eksploatacji gazu, ropy naftowej, kondensatu i wód geotermalnych.

Stare, wyeksploatowane złoża surowców płynnych służą obecnie do magazynowania węglowodorów. Jako podziemne magazyny ropy naftowej i gazu ziemnego mogą służyć również sztucznie utworzone kawerny w wysadach solnych występujących w skorupie ziemskiej. Kawerny te tworzy się w procesie ługowania poprzez odwiercenie otworów wiertniczych i zatłoczenie gorącej wody. Woda ta, rozpuszczając sól kamienną, z której zbudowany jest wysad solny, jest następnie usuwana na powierzchnię. Na skutek cyklicznego wtłaczania słodkiej wody i usuwania solanki w wysadzie powstaje kawerna, którą można wykorzystać jako zbiornik do magazynowania substancji płynnych (ciekłych i gazowych).

Odrębny obszar aplikacji otworów wiertniczych to różnego rodzaju zastosowania inżynierskie, w tym:

- budowlane,
- hydrotechniczne,
- otwory wiercone na potrzeby inżynierii i ochrony środowiska.

Płytkie otwory wiertnicze geotechniczne i geoinżynierskie wykorzystywane są w procesie budowy i eksploatacji budowli naziemnych i podpowierzchniowych. Wykonuje je się w celu: instalacji fundamentów, płyt mikropali i pali fundamentowych oraz posadawiania podziemnych konstrukcji (stalowych, betonowych i innych).

Wśród tych zagadnień wymienić należy również technologie obejmujące:

- tworzenie konstrukcji oporowych,
- posadowienia głębokie,
- zmiany i naprawy posadowień,
- podchwycenia fundamentów,
- budowę i eksploatację wyrobisk górniczych,
- technologie związane z wypełnianiem pustek gruntowych lub skalnych, znajdujących się wokół eksploatowanych konstrukcji podziemnych (rurociągi, obudowy górnicze).

W inżynierii i ochronie środowiska otwory wiertnicze wykorzystuje się do modyfikacji właściwości gruntów i skał, w tym: wzmacniania, wymiany, drenażu lub uszczelniania ośrodka gruntowego lub masywu skalnego. Wzmacnianie i wymiana gruntów ma na celu stworzenie optymalnych warunków do prowadzenia prac inżynierskich (budowa nowych obiektów, poprawa warunków eksploatacji już istniejących obiektów). Kontrolowany drenaż ma na celu usunięcie z gruntów i skał różnego rodzaju płynów (wody lub zanieczyszczeń). Uszczelnianie gruntów i skał polega na stworzeniu barier ochronnych, uniemożliwiających lub ograniczających migrację płynów znajdujących się w skorupie ziemskiej.

Do realizacji tego zagadnienia otwory wiertnicze wykorzystuje się w celu:

- tworzenia przegród uszczelniających,
- uszczelnień lukowych,
- szczelnych palisad,
- przekryć uszczelniających,
- poziomych ekranów uszczelniających,
- przepustów wody gruntowej.

W przedstawianych aplikacjach inżynierskich coraz częściej wykorzystuje się technologie bezwykopowe, w tym:

- różne odmiany metod przeciskowych,
- przewierci mechaniczne,
- horyzontalne przewierci sterowane,
- techniki i technologie mikrotunelowe.

### 3. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ TECHNICZNYCH

Wzrost zapotrzebowania na usługi wiertnicze w poszczególnych branżach działalności gospodarczej sprzyja modyfikacji już istniejących technik i technologii oraz rozwojowi nowych metod wykonywania otworów wiertniczych. Najnowsze rozwiązania techniczne dotyczą zarówno urządzeń wiertniczych, przewodu wiertniczego, konstrukcji narzędzi wierzących, i płynów wiertniczych, jak i rur okładzinowych [12].

W zakresie urządzeń wiertniczych do najnowszych konstrukcji zaliczyć można zarówno małe, w pełni zautomatyzowane wiertnice wykorzystywane w pracach geotechnicznych, geoinżynierskich czy inżynierii i ochronie środowiska, jak i potężne morskie urządzenia wiertnicze stosowane w górnictwie otworowym. Urządzenia nowej generacji przeznaczone do wiercen inżynierskich to w przeważającej części zwarte, kompaktowe konstrukcje łączące silnik napędowy z agregatem prądowtórzym, samobieźnym mechanizmem gasienicowym lub kołowym, zespołem hydraulicznym oraz systemem płuczkowym.

Na stalowej ramowej konstrukcji, najczęściej kotwionej w celu przejmowania powstających naprężeń i momentów obrotowych osadzone są ruchome sanie (sanice) z obrotową głowicą wrzecionową. W przedniej części urządzenia zamontowany jest system szczęk służący do skręcania i rozkręcania przewodu wiertniczego, a z boku urządzenia umieszczono automatyczny zasobnik-podajnik rur płuczkowych wraz z rurami płuczkowymi.

Urządzenie wyposażone jest w:

- system generujący moc mechaniczną (silnik spalinowy, zbiorniki paliwa, agregat prądowtórzy);
- zespół napędowy podzespołów wiertnicy (mechaniczny, hydrauliczny lub pneumatyczny);
- system transmisyjny, sterujący ruchem obrotowym głowicy wrzecionowej (hydrauliczny, pneumatyczny, mechaniczny);
- system transmisyjny sterujący posuwem głowicy wrzecionowej (łańcuchowy, zębatkowy, siłowniki hydrauliczne);
- system płuczkowy (pompy płuczkowe, zbiorniki płuczkowe).

Do najbardziej zaawansowanych rozwiązań technicznych wiertnic stosowanych w pracach geotechnicznych, geoinżynierskich oraz inżynierii i ochronie środowiska zaliczyć należy konstrukcje firm [4]:

- Boart Longyear,
- Wermeer,
- Ditch-Witch,
- Hutte,
- American Augers,
- Tracto-Technik.

Drugi biegun rozwiązań technicznych urządzeń wiertniczych to również zautomatyzowane wiertnice stosowane w górnictwie otworowym (stołowe lub wyposażone w górny napęd), montowane na morskich platformach stacjonarnych, samopodnośnych, półzanurzalnych lub jednostkach pływających (statkach barkach). Urządzenie tego typu ma:

- kilkudziesięciometrową wieżę wiertniczą;
- system napędowy z przekładniami mechanicznymi lub hydraulicznymi;
- w pełni zautomatyzowany system wyciągowy (wyciąg wiertniczy, wielokrążek górny, ruchomy i wielokrążek dolny połączone ze sobą systemem olinowania);
- górną głowicę wiertniczą typu *top drive*, obrotowy stół wiertniczy z automatycznymi klinami;
- system płuczkowy (pompy płuczkowe, wąż płuczkowy, głowica płuczkowa, zbiorniki płuczkowe);
- system oczyszczania płuczki ze zwircin (zbiorniki płuczkowe, sita wibracyjne, hydrocyklony, centryfugi).

Poszczególne urządzenia wiertnicze zmontowane są z podzespołów wytwarzanych przez wyspecjalizowanych producentów. W celu zabezpieczenia przed niekontrolowanym wypływem płynu złożowego z otworu bezpośrednio pod stołem wiertniczym lub nad dnem zbiornika wodnego montowany jest system zagłowiczenia przeciwerupcyjnego. Wiodący producenci zagłowiczenia przeciwerupcyjnego to firmy Cameron, Hydрил, Shaffer [5]. Najnowszej generacji rozwiązania konstrukcyjne montowane na statkach lub platformach półzanurzalnych umożliwiają pozycjonowanie jednostki pływającej oraz kompensowanie wysokości wieży wiertniczej w zależności od zmieniającego się poziomu lustra wody. Jako przykład można podać konstrukcję RamRig firmy Maritime Hydraulics [10].

Nowe rozwiązania konstrukcyjne w obszarze przewodu wiertniczego i rur okładzinowych dotyczą obecnie głównie technologii materiałowych. Oprócz różnych klasycznych odmian stali węglowej i stopowej przy produkcji rur wiertniczych i obciążników stosuje się nową generację stal odporną na korozję, wysokie ciśnienia i temperaturę. Przewód wiertniczy wykonany może być również z tytanu lub różnych stopów aluminium. Również rury okładzinowe, stosowane jako zabezpieczenie przed skałami obsypującymi się lub zaciskającymi wokół odwierconego otworu, wykonywane dotychczas jedynie ze stali, produkuje się obecnie również z innych materiałów.

Do nowych rozwiązań technicznych w produkcji rur okładzinowych zaliczyć można obecnie rury rozszerzalne. O ile w głębokich otworach naftowych i geotermalnych wykonuje

się je nadal ze stali wysokogatunkowej (w wypadku otworów geotermalnych kolumnę eksploatacyjną można wyprodukować z włókna szklanego), to w płytszych otworach wykonywanych na potrzeby budownictwa, hydrotechniki inżynierii i ochrony środowiska stosuje się rury: żeliwne, betonowe, polimerobetonowe, bazaltowe, kamionkowe, wykonane z tworzyw sztucznych (PCV, PE, PA).

W technologiach bezwykopowych renowacji rurociągów wykorzystuje się ponadto rury okładzinowe wykonane z materiałów plastycznych wyposażonych w tzw. efekt pamięci kształtu. Przewód wiertniczy i rury okładzinowe łączone są ze sobą za pomocą połączeń gwintowych. W przewodzie wiertniczym połączenia te muszą umożliwić ich wielokrotne bezawaryjne skręcanie i rozkręcanie. Szczelność złączy przewodu wiertniczego i rur okładzinowych jest bardzo ważna w razie występowania wysokiego ciśnienia i temperatury. Złącza te powinny być również odporne na naprężenia rozciągające, ściskające zginające i skręcające.

Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne połączeń gwintowych przewodu wiertniczego i rur okładzinowych zmierzają do optymalizacji profili i wysokości gwintów, ich zbieżności, rodzaju uszczelnień, występowania lub braku spęczeń rur oraz konstrukcji powierzchni oporowych gwintów.

Do najbardziej zaawansowanych technologicznie rozwiązań połączeń gwintowych zaliczyć należy konstrukcje firm [6]:

- Mannesmann,
- Hydril,
- Vallourec,
- Atlas,
- Bradford.

Przy wierceniu otworów kierunkowych o małym promieniu krzywizny wykorzystuje się przewód nawijany (*coiled tubing*) wykonany z plastycznych odmian stali. Do głównych producentów przewodów nawijanych należą między innymi firmy Quality Tubing Inc., Varco Inc., Semco Inc. [6].

W ostatnich latach nastąpił również postęp w obszarze stosowanych narzędzi wierzących. Producenci narzędzi gryzowych stopniowo eliminują w nich łożyska toczne, zastępując je łożyskami ślizgowymi. Opatentowane rozwiązania stworzyły warunki, w których gryzowe narzędzia wierzące mogą przenosić duże obciążenia osiowe przy wysokich prędkościach obrotowych. Wiodącymi producentami narzędzi gryzowych są firmy Reed, Baker-Hughes, Smith. Rozwiązania te obejmują [2]:

- uszczelnianie i wewnętrzne smarowanie łożysk,
- pokrywanie bieżni plastycznymi materiałami,
- zbrojenie zębów na skrajnych wieńcach,
- napawanie powierzchni bocznych,
- optymalizację kształtów i rozmieszczenia zębów lub słupków na poszczególnych wieńcach,
- dostosowanie przemieszczenia poszczególnych gryzów względem siebie oraz kąta ich nachylenia w zależności od twardości skał,
- zastosowanie ukierunkowanych dysz hydraulicznych.

Duży postęp w ostatnich latach zaobserwować można w konstrukcjach diamentowych narzędzi wierzących.

Obecne rozwiązania konstrukcyjne to:

- świdry i koronki z ostrzami w postaci naturalnych diamentów;
- konstrukcje z ostrzami wykonanymi z polikrystalicznej substancji diamentowej (PDC) oraz jej odmiany odpornej termicznie (TSP);
- narzędzia wierzące z ostrzami impregnowanymi (sztuczne diamenty impregnowane w matrycy ścierniej);
- konstrukcje hybrydowe.

Rozwój inżynierii materiałowej w produkcji syntetycznych diamentów oraz polikrystalicznych substancji diamentowych umożliwił skonstruowanie bardzo odpornych na ścieranie diamentowych narzędzi wierzących. Ich aplikacja dotyczy zarówno skał miękkich (świdry typu King Cutter, krzyżowo-żebrowe konstrukcje PDC), skał średnio twardych (PDC, TSP, mozaikowe), jak i twardych (TSP, z ostrzami z naturalnych diamentów, z ostrzami impregnowanymi).

W razie występowania w przewiercanym profilu geologicznym skał o bardzo zróżnicowanej zwiercalności opracowano konstrukcje hybrydowe będące połączeniem ostrzy PDC, TSP z ostrzami z naturalnych diamentów.

Optymalizacja konstrukcji narzędzi diamentowych polega na wyborze najwłaściwszego profilu narzędzia wierzącego, odpowiednim doborze i rozmieszczeniu ostrzy oraz systemu oczyszczania i chłodzenia (alternatywnie: otwory, kanały lub dysze płuczkowe). Do najbardziej znanych producentów należą firmy Baker-Hughes, Smith, Hycalog, Diamond Products International [2].

W nowoczesnych technologiach wiertniczych wykorzystuje się różnego rodzaju płyny. Można wśród nich wyróżnić:

- płuczki wiertnicze,
- zaczyny uszczelniające,
- ciecze buforowe,
- ciecze przemywające,
- ciecze wyprzedzające,
- ciecze przybitkowe,
- ciecze kwasujące,
- ciecze szczelinujące,
- ciecze podpierające szczeliny,
- ciecze nadpakerowe.

Właściwości chemiczne, fizyczne oraz parametry reologiczne i technologiczne płynów wiertniczych zależą od celu ich stosowania oraz są pochodną czynników geologiczno-wiertniczych. Przeprowadzana w trakcie procesu wykonywania otworu optymalizacja, polega na doborze właściwych receptur płynów oraz ustaleniu racjonalnej technologii ich zatłaczania. Wiodącymi producentami komponentów i rozwiązań technologicznych w zakresie płynów wiertniczych są firmy Baroid, Schlumberger, Halliburton.

#### 4. NOWE TECHNOLOGIE WIERTNICZE

Pojawienie się nowych możliwości technicznych sprzyja rozwojowi technologii głębinienia otworów wiertniczych [12]. Celem wykonania otworu wiertniczego jest odwiercenie w skorupie ziemskiej cylindrycznego wyrobiska o określonej średnicy i głębokości oraz zaplanowanej trajektorii. Ze względów geologiczno-wiertniczych (sypanie słabozwiązłych skał, wyciskanie plastycznych formacji górotworu, przychwycenia przewodu wiertniczego lub rur okładzinowych, nieprzewidziane katastrofalne zaniki płuczki lub przyпіływy płynu złożowego) nie można wykonać otworu w jednym procesie technologicznym, ale trzeba go głębić odcinkami o stopniowo pomniejszanej średnicy.

W efekcie uzyskuje się teleskopową konstrukcję, w której parametry geometryczne ostatniej kolumny rur okładzinowych odpowiadają wymaganiom inwestorskim. W procesie wykonywania otworu wiertniczego niezbędne jest więc przeprowadzenie cyklicznie następujących po sobie operacji: głębinienia otworu, jego obudowy (rurowania i cementowania) i ewentualnych badań otworowych. Nowe rozwiązania technologiczne zmierzają do skrócenia czasu wykonywania otworu o ściśle zaplanowanej trajektorii.

Duży postęp w ostatnich latach nastąpił w technologiach wiercenia otworów kierunkowych, w tym multilateralnych. Do najnowszych rozwiązań zaliczyć należy technologie wykorzystujące przewód nawijany (*coiled tubing drilling*), pozwalające na osiąganie bardzo dużych intensywności przestrzennego skrzywienia otworów (małych promieni krzywizny).

Innym rodzajem rozwiązań technologicznych jest wiercenie otworów pionowych i kierunkowych z utrzymywaniem ciśnienia hydrostatycznego słupa płuczki poniżej wartości ciśnienia złożowego (*underbalance drilling*). Jako płyn wiertniczy wynoszący zwierciny można stosować:

- ciecz,
- pianę,
- mgłę,
- powietrze,
- azot,
- naturalny gaz ziemny,
- ropę naftową (*flow drilling*).

Zaletami tej technologii są:

- zwiększenie prędkości wiercenia,
- wzrost żywotności narzędzi wierzących,
- zmniejszenie zaników płuczki wiertniczej,
- minimalizacja uszkodzenia strefy przyodwiertowej i uzyskiwanie większych wydajności płynu złożowego,
- wydłużenie żywotności oddanego do eksploatacji otworu wiertniczego,
- obniżenie kosztów inwestycyjnych (otwór przynosi zyski od momentu nawiercenia skały zbiornikowej).

Wyżej wymienione nowe technologie są obecnie stosowane coraz częściej [1, 11]. Konieczność skrócenia czasu wykonywania otworu wiertniczego (na potrzeby górnictwa, górnictwa otworowego, prac geoinżynierskich, geotechnicznych, inżynierii i ochrony śro-



dowiska) oraz sterowania jego trajektorią spowodowały, że opracowano nowe technologie wiercenia. W niniejszym artykule chcielibyśmy przedstawić kilka z nich:

- wiercenie z równoczesnym rurowaniem [3],
- wiercenie z zastosowaniem kolumn rozszerzalnych [8],
- pionowanie trajektorii otworów wiertniczych [9].

#### **4.1. Wiercenie z równoczesnym rurowaniem**

W zależności rodzaju przewiercanych skał i przeznaczenia otworu powstało wiele systemów wiercenia z jednoczesnym rurowaniem. Opracowane i stosowane obecnie na świecie technologie wierceń inżynierskich z równoczesnym rurowaniem różnią się od siebie: sposobem wiercenia, rodzajem napędu przenoszonego na narzędzie wierzące i rury okładzinowe, typem wykorzystywanych świrdrów, ich budową i technologią stosowania oraz przebiegiem osi otworu wiertniczego.

Uwzględniając przedstawione kryteria podziału oraz dokonując analizy stosowanych obecnie na świecie rozwiązań technologicznych, wyróżnić można następujące systemy wiercenia otworu z równoczesnym rurowaniem:

- system wiercenia otworu z wykorzystaniem świdra traconego,
- system wiercenia rurami okładzinowymi ze świdrem wrzutowym,
- system wiercenia z dolnym młotkiem,
- system wiercenia obrotowego z równoczesnym obracaniem przewodu wiertniczego i rur okładzinowych.

##### **4.1.1. System wiercenia otworu z wykorzystaniem świdra traconego**

System wiercenia ze świdrem traconym jest najprostszą metodą polegającą na wprowadzaniu rur okładzinowych w grunt. W tym celu można zastosować metodę udarową, wykorzystującą górny młotek lub metodę obrotową w odmianie wrzecionowej lub stołowej. Narzędziem urabiającym skałę jest element ukształtowany w postaci stożka lub świder krzyżowy. Narzędzie wierzące łączy się rozłącznym połączeniem kształtowym z butem rur okładzinowych. Technologia wiercenia polega na rozpychaniu gruntu na boki wzdłuż wprowadzanej rury okładzinowej. Wykonując otwór wiertniczy w technologii wykorzystującej stożek tracony, można stosować płuczkę wiertniczą. Służy jednak ona wówczas jedynie jako czynnik smarujący, zmniejszający tarcie narzędzia i rur okładzinowych o otaczające grunty.

Po uzyskaniu końcowej głębokości wiercenia stożek lub świder krzyżowy jest odłączany od rur okładzinowych (odkręcany lub wypychany) i pozostaje na dnie otworu wiertniczego. Rury zaś mogą być wykorzystane jako osłona wprowadzanego i cementowanego w nich zbrojenia przed sykiem gruntem. Mogą być również wyciągane z otworu w procesie równoczesnego zatłaczania mieszanin modyfikujących właściwości grunty

Wiercenie z wykorzystaniem świdra traconego stosuje się do przewiercania:

- piasków,
- drobnych żwirów,
- torfów.

#### 4.1.2. System wiercenia rurami okładzinowymi ze świdrem wrzutowym

Stosując system wiercenia rurami okładzinowymi ze świdrem wrzutowym można skutecznie przewiercać i rurować skały luźne i sypkie, aż do momentu dotarcia do skał zwięzłych. Rury okładzinowe przekazują zarówno nacisk, jak i moment obrotowy na narzędzie wierzące. W trakcie prowadzenia prac wiertniczych w tej technologii możliwe jest:

- wiercenie z wykorzystaniem świdrów gryzowych, skrzydłowych lub diamentowych z jednoczesnym rurowaniem w nadkładzie i skałach trudnych do przewiercenia;
- pobieranie prób z nieskonsolidowanych gruntów i rdzeniowanie w połączeniu z rurowaniem otworu;
- wiercenie w strefach ucieczki płuczki;
- posadawianie rur okładzinowych w dnie rzeki lub jeziora w celu umożliwienia dalszego wiercenia otworu;
- zapuszczanie do otworu filtrów, drenów lub ładunków wybuchowych.

System wiercenia rurami okładzinowymi ze świdrem wrzutowym składa się z następujących elementów:

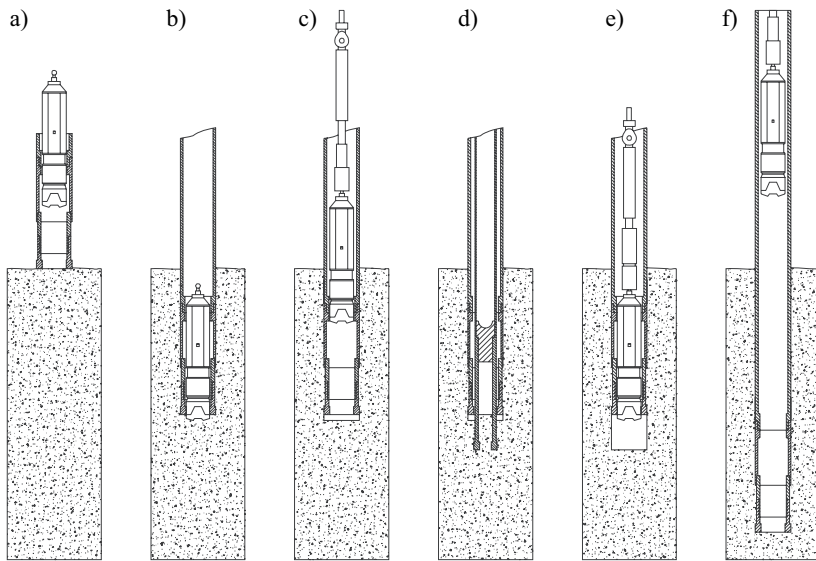
- rury okładzinowej prowadzącej wyposażonej w tuleję wykonaną z twardej, chromowanej stali;
- buta rur okładzinowych połączonego od dołu z rurą prowadzącą;
- rur okładzinowych stanowiących osłonę przed niestabilnymi gruntami;
- łącznika ustalającego wpuszczanego do rur okładzinowych;
- klasycznego chwytaka używanego do rdzeniowania wrzutowego;
- narzędzia wierzącego (gryzowego, skrzydłowego lub diamentowego), wrzucanego do rur okładzinowych i wyciąganego z nich za pomocą chwytaka i urządzenia wyciągowego.

W łączniku ustalającym znajduje się mechanizm zatraskowy współpracujący z tuleją umieszczoną w prowadzącej rurze okładzinowej. Jego zadaniem jest utrzymanie świdra w trakcie wiercenia w stałej pozycji pionowej względem rur okładzinowych oraz przeniesienie momentu obrotowego i nacisku z rur okładzinowych na narzędzie wierzące. Mechanizm zatraskowy składa się z dwóch zatrasków.

Pierwszy zatrask umożliwia przeniesienie siły nacisku z rur okładzinowych na narzędzie wierzące oraz służy ustaleniu pozycji świdra w stosunku do buta rur okładzinowych (odległość tę można regulować, umożliwiając wysunięcie lub schowanie świdra w rurach). Drugi zatrask pozwala na przeniesienie momentu obrotowego z rur okładzinowych na narzędzie wierzące. Ze względu na przenoszenie znacznych sił przez łącznik – jest on wykonany z materiału ulepszanego cieplnie.

Na rysunku 1 przedstawiono etapy technologiczne systemu wiercenia rurami okładzinowymi ze świdrem wrzutowym.

Wiercenie rurami okładzinowymi ze świdrem wrzutowym przeprowadza się za pomocą wiertnic wrzeczionowych. Jest to metoda wiercenia obrotowego i nie wymaga dodatkowego wyposażenia wiertnicy. Gdy w wyposażeniu wiertnicy brakuje wciągarki, należy urządzenie wierzące uzupełnić jedynie o ten podzespół techniczny.



**Rys. 1.** Etapy technologiczne systemu wiercenia świdrem wrzutowym z równoczesnym rurowaniem otworu: a) Łącznik ustalający z dokręconym świdrem gryzowym jest opuszczany do wnętrza rur okładzinowych w celu połączenia z rurą prowadzącą; b) Wiercenie przez nadkład świdrem wrzutowym z równoczesnym rurowaniem otworu. Wiercenie, poszerzanie i rurowanie otworu następuje w jednym cyklu technologicznym; c) Zapuszczenie chwytaka wrzutowego do otworu w celu wyciągnięcia łącznika ustalającego wraz ze świdrem. Obciążenie sprężyn powoduje chowanie się ramion zatrzasku i umożliwia swobodne wyciągnięcie łącznika ustalającego; d) Pobór prób lub rdzeniowanie w rurach okładzinowych; e) Zapuszczanie łącznika ustalającego w rurach okładzinowych. Zatrzaski są chowane pod wpływem działania siły ciężkości łącznika. Zatrzask ustalający pozwala na prawidłowe ustalenie łącznika wraz ze świdrem względem rur okładzinowych; f) Wiercenie rurami okładzinowymi wraz z rurą prowadzącą w skałach rodzimych. Po wyciągnięciu łącznika ustalającego możliwe jest wiercenie rurami okładzinowymi w celu ich ustabilizowania w skałach rodzimych. Możliwe jest również dalsze rdzeniowanie lub wiercenie świdrem

Metoda ta jest prosta w obsłudze i przygotowaniu. Po odwierceniu i postawieniu rur okładzinowych w stabilnych warstwach możliwa jest kontynuacja procesu wiercenia z wykorzystaniem przewodu wiertniczego.

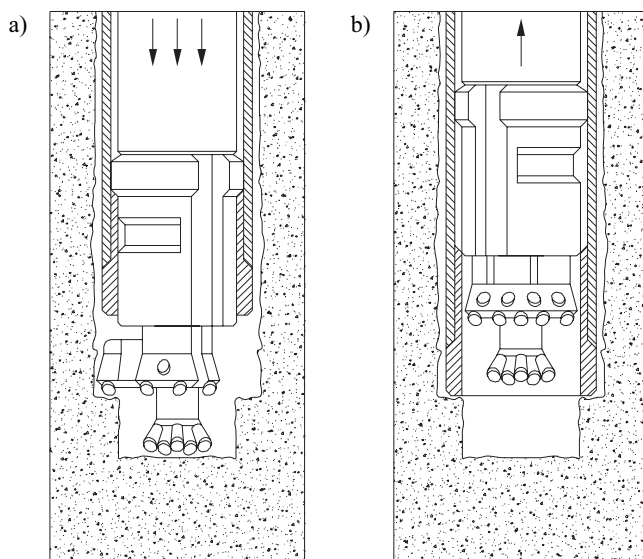
Metodę wiercenia rurami okładzinowymi ze świdrem wrzutowym stosować należy przy przewiercaniu piasków drobno-, średnio- i gruboziarnistych oraz drobnych żwirów. Metoda jest mało efektywna w rumoszu skalnym i grubych żwirach z otczakami.

#### 4.1.3. Systemy wiercenia z dolnym młotkiem

Do najnowszych rozwiązań technologicznych umożliwiających wiercenie otworów z równoczesnym ich rurowaniem zaliczyć należy zastosowanie urządzenia udarowego

w dolnej części przewodu wiertniczego. Połączenie ударов generowanych przez dolny młotek z obrotami przewodu wiertniczego stanowi system ударово-обрововый umożliwiaujący efektywne wiercenie zarówno w skałach luźnych, jak i zwięzłych. Wykorzystywane obecnie na świecie konstrukcje różnią się budową narzędzi wiercących oraz technologią wprowadzania do otworu rur okładzinowych. Do zwiercania skał zwięzłych stosowane są świdry ekscentryczne symetryczne z rozkładanymi ostrzami oraz symetryczne współpracujące z koronką buta rury okładzinowej.

Wiercenie świdrem ekscentrycznym możliwe jest poprzez wprowadzenie go na przewodzie wiertniczym do rur okładzinowych i wpuszczenie na dno otworu wiertniczego. Wychodzące z dolnej części rur okładzinowych narzędzie wiercące wprowadzane jest w ruch obrotowy wspomagany udarami młotka zamontowanego w dolnej części przewodu wiertniczego. W wyniku ruchu mimośrodowego świder ekscentryczny odwierca otwór o średnicy większej niż średnica rur okładzinowych (rys. 2).

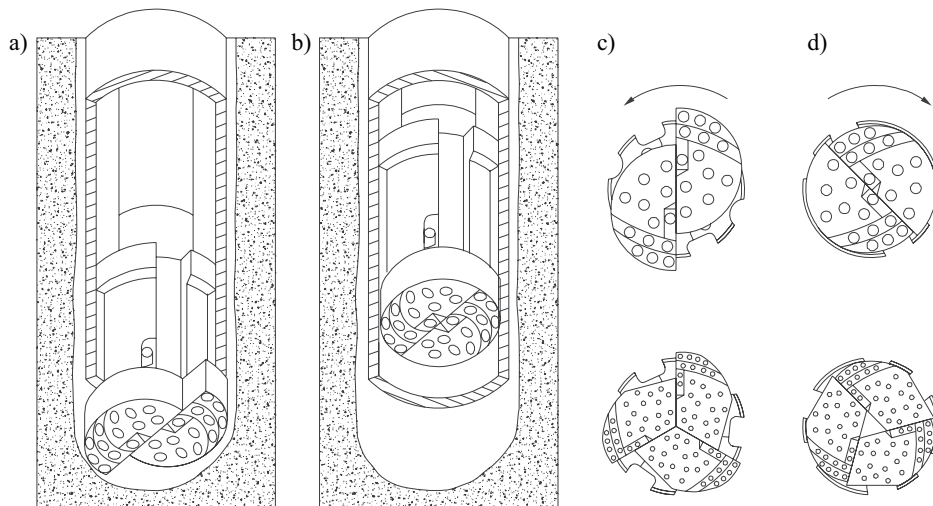


**Rys. 2.** Mechanizm wiercenia świdrem ekscentrycznym z równoczesnym rurowaniem otworu:  
a) ekscentryczny świder zapuszczony na dno otworu wiertniczego, w wyniku ruchu obrotowego wykonuje otwór o średnicy większej od średnicy zewnętrznej rur okładzinowych;  
b) świder wciągnięty do wnętrza rur

Wiercenie otworów z równoczesnym ich rurowaniem możliwe jest również za pomocą świdrow symetrycznych z rozsuwalnymi ostrzami. Otwór wykonuje się w wyniku przeprowadzenia następujących operacji technologicznych. W pierwszym etapie wprowadza się na przewodzie wiertniczym do rur okładzinowych świder ze zsuniętymi ostrzami. Proces wprowadzania świdra jest możliwy, gdyż w wyniku zsunięcia ostrzy średnica narzędzia wiercącego

jest mniejsza od średnicy wewnętrznej rur okładzinowych. Wychodzący z dolnej części rur okładzinowych przewód wiertniczy wprowadzany jest w prawoskrętny ruch obrotowy. Ostrza, rozsuwając się, powiększają średnicę narzędzia wiertącego, które – wspomagane udarami młotka zamontowanego w dolnej części przewodu wiertniczego – wykonuje otwór o średnicy większej niż średnica zewnętrzna rur okładzinowych.

W razie konieczności wymiany narzędzia wiertącego wprowadza się przewód wiertniczy w ruch lewoskrętny, powodujący zsuniecie ostrzy świdra. Zmniejszenie średnicy narzędzia wiertącego umożliwia wciągnięcie go do wnętrza rur okładzinowych (rys. 3).



**Rys. 3.** Mechanizm wiercenia z równoczesnym rurowaniem otworu wykorzystujący świder symetryczny z rozsuwanymi ostrzami:

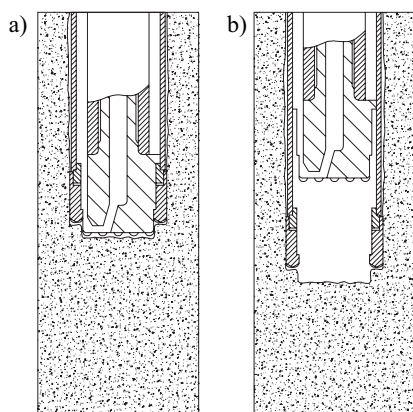
- a) świder symetryczny zapuszczony na dno otworu wiertniczego w wyniku prawoskrętnego ruchu obrotowego, powodującego rozsuniecie ostrzy, wykonuje otwór o średnicy większej od średnicy zewnętrznej rur okładzinowych; b) lewoskrętny ruch obrotowy narzędzia wiertącego, który powoduje złożenie jego ostrzy i umożliwia wciągnięcie świdra do wnętrza rur okładzinowych; c) rozsuwanie ostrzy; d) zsuwanie ostrzy

Istotą aplikacji świdra symetrycznego współdziałającego z koronką buta rur okładzinowych jest współdziałanie następujących elementów konstrukcyjnych:

- świdra z wewnętrznymi i zewnętrznymi kanałami płuczkowymi, umożliwiającymi wynoszenie zwiercin;
- młotka udarowego;
- przewodnika rur okładzinowych;
- koronki, w którą uzbrojony jest but rur okładzinowych.

System świder – koronka zaprojektowano do pracy z dolnym młotkiem udarowym, jednakże możliwe jest również wiercenie z wykorzystaniem górnego młotka.

Technologia wiercenia z równoczesnym rurowaniem otworu (rys. 4) z zastosowaniem świdra i koronki polega na połączeniu ударów generowanych przez młotek, z obrotami przewodu wiertniczego.



**Rys. 4.** Mechanizm wiercenia z równoczesnym rurowaniem otworu wykorzystujący świder symetryczny współpracujący z koronką buta rur okładzinowych:  
a) świder w procesie wiercenia; b) świder wyciągany z otworu do wymiany

Świder osadzony w przewodniku rur okładzinowych i wysunięty nieznacznie poniżej buta zwierca skałę, przenosząc ruch obrotowy i udary na wspomagającą go koronkę i kolumnę rur okładzinowych. W razie konieczności wymiany narzędzia wierzącego świder uwalniany jest z przewodnika rur poprzez wyciągnięcie przewodu wiertniczego. Stosując omawiany system, można wykonywać otwory zarówno w skałach luźnych, jak i zwięzłych.

Systemy wiercenia z dolnym młotkiem, umożliwiające równoczesne rurowanie otworu, można również podzielić na:

- system wiercenia z wciskanymi do otworu rurami okładzinowymi,
- system wiercenia z wciąganiem do otworu rurami okładzinowymi

W obu tych systemach stosowane mogą być zarówno świdry ekscentryczne, symetryczne z rozsuwanymi ostrzami, jak i symetryczne współpracujące z koronką buta rur okładzinowych. Różnice technologiczne pomiędzy oboma systemami polegają na sposobie przekazywania siły osiowej umożliwiającej przemieszczanie się rur okładzinowych w odwierconym otworze.

W systemie z wciąganiem rurami okładzinowymi rury wprowadzane są do otworu za pośrednictwem buta rur okładzinowych, połączonego z dolnym młotkiem przy użyciu przewodnika świdra. But rur jest przyspawany do pierwszej rury okładzinowej, a kolejne rury łączone są ze sobą przez skręcanie. W zależności od rodzaju skał stosowane są buty różnej konstrukcji. W wyniku takiej konstrukcji generowany przez młotek udar umożliwiający zwiercanie skał przenoszony jest również na dolną część rur okładzinowych, powodując wciąganie ich do otworu. System ten przeznaczono do wiercenia w zwietrzałych skałach bardzo twardych, rumoszu skalnym oraz w skałach typu flisz karpacki.

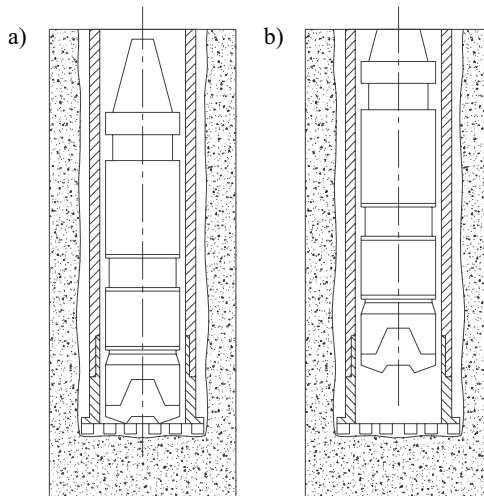
System z wciskanymi rurami okładzinowymi polega na wprowadzeniu do otworu rur okładzinowych w wyniku ich obrotu i siły posuwu, pochodzących z wiertnicy wyposażonej w górną głowicą obrotową. W tym rozwiązaniu technologicznym uderzenie generowane przez dolny młotek nie jest przenoszony na rury okładzinowe. Konstrukcja przewodu zapewnia znacznie większą powierzchnię pierścieniową pomiędzy rurami, co poprawia skuteczność wynoszenia zwiercin. Duża przestrzeń pierścieniowa, zapewniająca dobre oczyszczanie dna otworu, pozwala na wykonywanie otworów z równoczesnym ich orurowaniem w zróżnicowanych warunkach geologicznych: od ilów przez piaski, torfy, namuły rzeczne i nasypy po żwirzy z otoczkami.

#### 4.1.4. System wiercenia obrotowego z równoczesnym obracaniem przewodu wiertniczego i rur okładzinowych

W systemie tym rury okładzinowe są połączone z rurami płuczkowymi za pomocą łącznika i huczka. Rury okładzinowe są zakończone butem zbrojonym węglkami spiekany. Świder przykręcony jest do rur płuczkowych i usytuowany wewnątrz rur okładzinowych. Technologia wiercenia polega na przekazywaniu momentu obrotowego i siły nacisku z przewodu wiertniczego na narzędzie wierzące i kolumnę rur okładzinowych. Proces wiercenia przebiega w wyniku równoczesnego urabiania skały świdrem i butem rur okładzinowych. Jako narzędzia wierzące można stosować świdry:

- skrzydłowe,
- diamentowe,
- gryzowe.

Jedną z odmian tego systemu jest wiercenie z wykorzystaniem dwóch napędów wiertniczych. Napędy te są wówczas połączone ze sobą siłownikiem hydraulicznym i mają możliwość zmiany wzajemnego położenia przewodu wiertniczego i rur okładzinowych (rys. 5). Takie rozwiązanie konstrukcyjne umożliwia regulację wysunięcia świdra z rur okładzinowych.

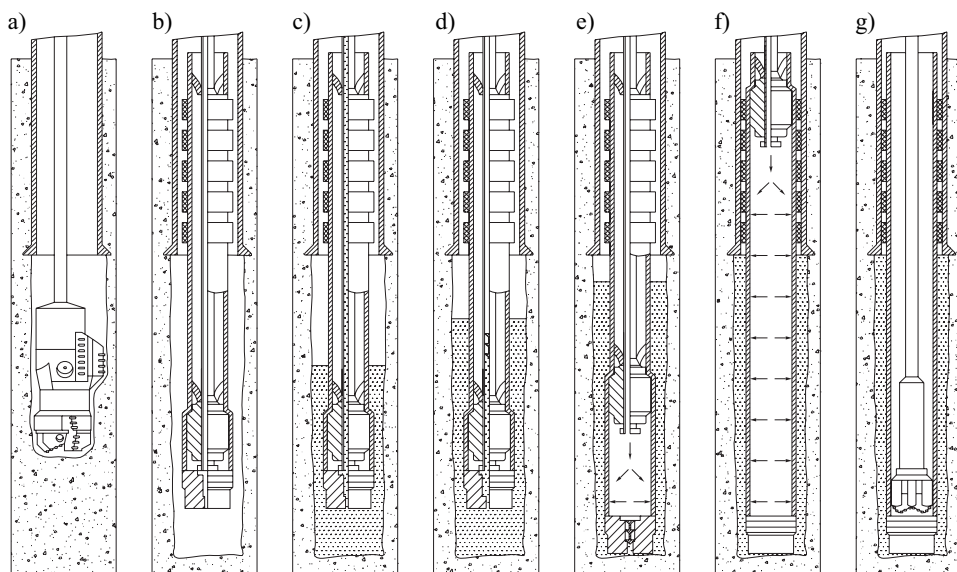


Rys. 5. System wiercenia obrotowego z równoczesnym obracaniem przewodu wiertniczego i rur okładzinowych: a) wiercenie, b) wyciąganie narzędzia wierzącego

## 4.2. Wiercenie otworów z zastosowaniem kolumn rur rozszerzalnych

Wiercenie głębokich otworów naftowych w skomplikowanych warunkach geologicznych zmusza do zastosowania wielu kolumn rur okładzinowych. W celu zminimalizowania ich ilości opracowano nową technologię polegającą na aplikacji rozszerzalnych kolumn rur traconych. Ten nowy rodzaj kolumn rur okładzinowych pozwala na wykonanie i orurowanie długich odcinków otworu o stałej lub nieznacznie zmniejszonej średnicy. Technologia ta pozwala również ograniczyć koszty wykonania otworu, gdyż możemy rozpocząć wiercenie otworu pod kolumnę wstępną świdrem o mniejszej średnicy.

Rozszerzalne kolumny rur traconych spełniają te same funkcje, co klasyczne kolumny rur traconych. Podstawowe etapy technologiczne aplikacji rozszerzalnych kolumn rur traconych można scharakteryzować następująco. Po odwierceniu otworu z wykorzystaniem świdra ekscentrycznego lub poszerzacza zapuszcza się kolumnę rozszerzalnych rur traconych i zatłacza odpowiednią objętość zaczynu cementowego. Podczas jego wtlaczania manewruje się pionowo kolumną rozszerzalnych rur traconych w celu dokładnego wypełnienia przestrzeni pierścieniowej przez mieszankę uszczelniającą. Po zatłoczeniu zaczynu cementowego rozpoczyna się wyciąganie rdzenia powodujące plastyczne odkształcenie kolumny rur okładzinowych i poszerzenie jej do odpowiedniej średnicy. Po całkowitym wyciągnięciu rdzenia płucze się otwór w celu usunięcia nadmiaru zaczynu cementowego. Schemat instalacji przedstawiono na rysunku 6.



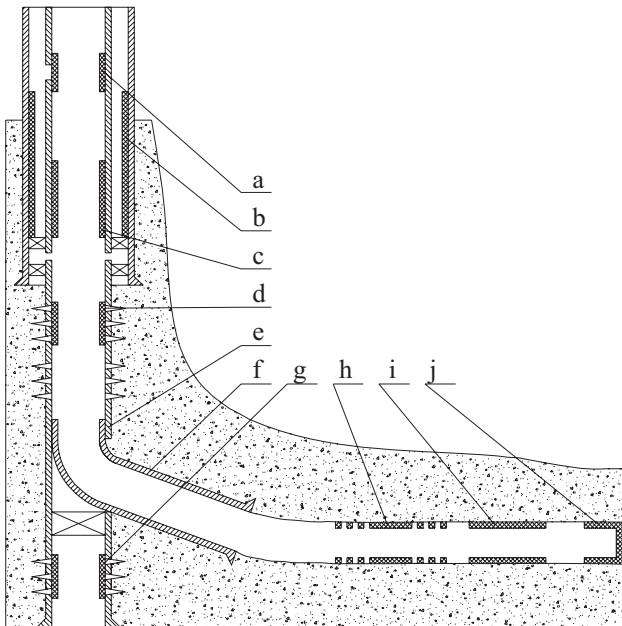
**Rys. 6.** Schemat instalacji rozszerzalnych kolumn rur traconych:

- a) wiercenie otworu; b) zapuszczanie kolumny rur okładzinowych; c) wtlaczanie zaczynu uszczelniającego; d) wytłoczenie zaczynu klockiem zamykającym; e) rozszerzenie kolumny;
- f) pozostawienie kolumny do związania zaczynu uszczelniającego; g) dalsze wiercenie



Rozszerzalne kolumny rur traconych montuje się również jako kolumny niecementowane w strefie złożowej bądź w warstwach intensywnych dopływów wód złożowych, bądź ucieczek płuczki. Na wypadek intensywnych dopływów wód lub ucieczek płuczki kolumnę rozszerzalnych rur traconych wyposaża się w dwa pakery w dolnej i górnej części kolumny, a także uszczelnia się w ten sposób dany interwał. Kolumny w strefie złożowej to przeważnie kolumny perforowane montowane w celu zabezpieczenia otworu przed piaszczeniem.

Kolumny rozszerzalne znajdują zastosowanie również przy renowacji starych odwiertów pionowych, w których – na skutek długiej eksploatacji – znacznie spadło ciśnienie złożowe. W takim wypadku można odwiercić otwór kierunkowy i zamontować rozszerzalną kolumnę rur traconych bez zmiany średnicy otworu. Możliwości zastosowania rozszerzalnych kolumn rur okładzinowych przedstawiono na rysunku 7.



**Rys. 7.** Zastosowanie rozszerzalnych kolumn traconych:

- a) łatanie, okładanie i wzmacnianie rur okładzinowych; c) okładanie rur wydobywczych;
- d) odcinanie dopływu wody lub ropy naftowej; e) wieszak rurowy; f) kolumna rozszerzalna tracona;
- g) zamykanie starych stref eksploatacji; h) kontrola piaszczenia; i) okładanie nieorurowanej ściany otworu w celu jej stabilizacji; j) uszczelnianie dopływu płynu złożowego

### 4.3. Pionowanie trajektorii otworów wiertniczych

Podczas wiercenia pionowych otworów wiertniczych niejednokrotnie rejestruje się niezamierzone odchylenie wykonywanej trajektorii od pionu.

Do głównych przyczyn nieprzewidzianego odchylenia osi otworu od pionu zaliczyć należy między innymi następujące czynniki:

- zmienność twardości skał,
- występowanie szczelin i spękań górotworu,
- duże kąty upadu warstw skalnych,
- skrzywienie elementów przewodu wiertniczego,
- niewspółosiowe ustawienie graniatki stołu wiertniczego oraz wielokrążków dolnego i górnego,
- niewłaściwe hydrauliczne i mechaniczne parametry technologii wiercenia.

W razie stwierdzenia znacznego odchylenia osi otworu od kierunku pionowego dokonuje się pionowania skrzywionej trajektorii. Dotychczas zabieg ten przeprowadzano, zmieniając układ stabilizacji dolnej części przewodu wiertniczego i wykorzystując efekt wahadła. W tym celu bezpośrednio nad świdrem umieszczano przewymiarowany obciążnik, a następnie z małym naciskiem i niską prędkością obrotową kontynuowano wiercenie otworu. Przewód wiertniczy, kładąc się na ścianie otworu w wyniku siły grawitacji, sprowadzał oś odwiercanego otworu do kierunku pionowego. Wadą stosowanej technologii był brak kontroli nad procesem pionowania oraz zmniejszenie prędkości wiercenia i wzrost kosztu wykonania otworu. W celu wyeliminowania tych niekorzystnych czynników opracowano nową technologię umożliwiającą wiercenie otworów pionowych i pionowanie odchylonych części otworów wiertniczych.

System obrotowego wiercenia pionowego, opracowany początkowo do głębokich otworów naftowych, znajduje obecnie zastosowanie również przy wierceniu pionowych otworów:

- mroźniowych (w trakcie wykonywania płyt mroźniowych);
- inżynierskich;
- przyszybowych (w celu ominięcia górniczej podziemnej infrastruktury podziemnej);
- geotermalnych.

Podstawowym elementem systemu pionowania otworu jest stabilizator pionujący wyposażony w hydraulicznie wysuwane, niezależnie sterowane żebra-prowadniki. Wykorzystując czujniki pochyleń, stwierdza się aktualne odchylenie osi otworu od pionu. Odchylenie koryguje się poprzez wysunięcie żeber-prowadników i wywarcie siły bocznej na odpowiednią część ściany otworu wiertniczego, powodując odepchnięcie stabilizatora do pozycji pionowej. Ciągły automatyczny pomiar odchylenia osi otworu od pionu, stymulujący wysuwanie się i wsuwanie poszczególnych żeber-prowadników, powoduje samonaprowadzanie trajektorii wierzonego otworu do kierunku pionowego.

Głównym nośnikiem energii i informacji jest płuczka wiertnicza. Strumień przepływającej płuczki wiertniczej wykorzystuje się do generowania:

- prądu elektrycznego (zasilania układu pomiarowego),
- energii hydraulicznej,
- przekazywania danych z narzędzia wierzącego powierzchnię.

Zgromadzone dane ulegają przetworzeniu na impulsowy sygnał ciśnieniowy, który przekazany zostaje z systemu na powierzchnię. Na powierzchni dekodery zamieniają sygnał z impulsów ciśnieniowych na sygnał cyfrowy, który może być użyty do dalszej obróbki (komputerowa wizualizacja przebiegu trajektorii, podejmowanie decyzji technologicznych).

## 5. PODSUMOWANIE

Do głównych obszarów zastosowań otworów wiertniczych zaliczyć należy:

- górnictwo podziemne, odkrywkowe i skalne,
- górnictwo naftowe,
- podziemne magazynowanie surowców płynnych,
- budownictwo,
- hydrotechnika,
- inżynierię i ochronę środowiska.

Obecnie obserwuje się rozwój nowych rozwiązań technicznych:

- urządzeń wiertniczych,
- przewodu wiertniczego,
- konstrukcji narzędzi wierzących,
- płynów wiertniczych,
- rur okładzinowych.

Pojawienie się nowych możliwości technicznych sprzyja rozwojowi technologii głębień otworów wiertniczych. Duży postęp w ostatnich latach nastąpił w technologiach wykonywania otworów kierunkowych, w tym multilateralnych. Do najnowszych rozwiązań w tym zakresie zaliczyć należy technologie wykorzystujące przewód nawijany (*coiled tubing drilling*) czy wiercenie otworów z ciśnieniem hydrostatycznym słupa płuczki poniżej ciśnienia złożowego (*underbalance drilling*).

Potrzeba skrócenia czasu wykonywania otworu wiertniczego (na potrzeby górnictwa, górnictwa otworowego, prac geoinżynierskich, geotechnicznych, inżynierii i ochrony środowiska) oraz konieczność sterowania jego trajektorią – powodowały opracowanie nowych rozwiązań umożliwiających:

- wiercenie z równoczesnym rurowaniem,
- wiercenie z zastosowaniem kolumn rozszerzalnych,
- pionowanie trajektorii otworów wiertniczych.

## LITERATURA

- [1] Bourgoyne A.T., Milheim K.K., Chenevert M.E., Young F.S.: *Applied Drilling Engineering*. SPE Textbook, Richardson 1992.
- [2] Materiały firmowe firm Baker-Hughes (2005), Hycalog (2006), Reed (2003), Diamond Products International (2006).
- [3] Materiały firmowe firm Boart-Longyer (2004), DATC Group (2005), Tesco (2006).
- [4] Materiały firmowe firm Wermeer, Ditch-Witch, Hutte, American Augers, Tracto-Technik (2005).
- [5] Materiały firmowe firm Cameron (2004), Hydril (2003), Schaffer (2004).
- [6] Materiały firmowe firm Mannesman (2005), Hydril(2006), Vallourec (2006).
- [7] Materiały firmowe firm Quality Tubing (2006), Vareco(2006), Semco (2006).

- [8] Materiały firmowe firmy Enventure Global Technology (2006).
- [9] Materiały firmowe firmy Micon (2006).
- [10] Materiały firmowe firmy, Maritime Hydraulics (2005).
- [11] Michell B.: *Horizontal Drilling*. Michell Box 1492 Golden CO 80402.
- [12] Wiśniowski R.: *Wiertnictwo naftowe*. [W:] *Materiały Studiów Podyplomowych „Górnictwo otworowe złóż węglowodorów”*, WwNiG AGH Kraków 2006.