

# Minimalizacja i utylizacja odpadów wiertniczych powstających podczas budowy rurociągów technologiami bezwykopowymi

## Minimization and disposal of drilling waste generated during the construction of pipelines with trenchless technologies

Aleksandra Jamrozik, Jan Ziaja<sup>\*</sup>

**Słowa kluczowe:** gazociągi, wodociągi, technologie bezwykopowe, zagospodarowanie odpadów wiertniczych

### Streszczenie

Budowa rurociągów z wykorzystaniem technologii bezwykopowych, generuje znaczne ilości odpadów wiertniczych. Odpady te zawierają płuczki wiertnicze, zwierciny, a także środki chemiczne, stosowane do modyfikacji właściwości technologicznych płuczki wiertniczej.

Obecnie obserwuje się dynamiczny wzrost kosztów utylizacji i zagospodarowania odpadów wiertniczych, co jest związane z wdrażaniem zasad zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Czynniki ekonomiczne ale także czynniki środowiskowe wymuszają na firmach wykonawczych stosowanie systemów kontroli fazy stałej oraz recyklingu płuczki wiertniczej, a także wdrażanie metod racjonalnego zarządzania odpadami wiertniczymi.

W artykule scharakteryzowano metody budowy rurociągów, zwracając szczególną uwagę na dwie najpopularniejsze technologie: HDD i Direct Pipe. Przedstawiono również koncepcję zamkniętego obiegu cyrkulacji odpadów wiertniczych. Prezentowany system postępowania z odpadami wiertniczymi sprzyja zrównoważonemu rozwojowi, minimalizuje wpływ prac wiertniczych na środowisko naturalne oraz przyczynia się do redukcji kosztów inwestycji, poprzez zmniejszenie wydatków na utylizację odpadów wiertniczych.

**Keywords:** Gas pipelines, Water Pipelines, Trenchless Technologies, Drilling Waste Management

### Abstract

Pipeline construction using trenchless technologies generates significant amounts of drilling waste. These waste materials include drilling fluids, rock cuttings and chemical additives used to modify the technological properties of the drilling fluid. Currently, there is a dynamic increase in the costs associated with the disposal and management of drilling waste, driven by the implementation of sustainability principles and the circular economy (CE) model. Both economic and environmental factors compel contractors to adopt solid phase control systems, drilling fluid recycling solutions, and rational waste management strategies.

This paper characterizes various pipeline construction methods, with particular emphasis on the two most widely used technologies: HDD and Direct Pipe®. Additionally, the concept of a closed-loop circulation system for drilling waste is presented. The proposed drilling waste management system promotes sustainable natural resource management, minimizes the environmental impact of drilling operations, and contributes to reducing investment costs by lowering expenses related to waste disposal and landfill utilization.

## 1. Wstęp

Budowa rurociągów czy też infrastruktury podziemnej jest kluczowym elementem współczesnego rozwoju zaplecza cywilizacyjnego. Ponieważ wraz z rozwojem gospodarczym zwiększa się zużycie energii i zasobów naturalnych, a zapotrzebowanie na budowę rurociągów stopniowo wzrasta [26, 27].

Tradycyjne metody budowy rurociągów obejmują wykopy otwarte, które mogą być kosztowne, czasochłonne i niosące ze sobą negatywne skutki dla środowiska [23, 26, 33]. W związku z tym, w ostatnich latach technologie bezwykopowe stały się alternatywą,

pozwalającą na instalację rurociągów bez konieczności rozległych wykopów. Umożliwiają one ich budowę pod drogami, rzekami, budynkami i innymi przeszkodami, minimalizując i redukując związane z tym skutki dla środowiska naturalnego [23, 33, 34].

W Europie i w Polsce w ostatnich latach trwają intensywne prace przy rozbudowie infrastruktury gazociągów wysokociśnieniowych. Od 2009 r. tylko w Polsce wybudowano ponad 2000 km gazociągów MPO 8,4 MPa w średnicach DN 1000, DN 800, DN 700. Rocznie w Polsce, tylko dla jednej firmy gazowniczej, wykonuje się od 100 do 150 tego typu prac w technologiach bezwykopowych [35]. W kolejnych latach tendencja ta zostanie utrzymana, ze względu na dalszą

<sup>\*</sup> Aleksandra Jamrozik, ORCID: 0000-0002-4988-7437, Jan Ziaja, ORCID: 0000-0002-4915-5121, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu

rozbudowę sieci gazowej do transportu gazu zmiennego, a w dalszej perspektywie także wodoru oraz ze względu na budowę morskich farm wiatrowych i konieczności instalowania kabli energetycznych z wykorzystaniem technologii bezwykopowych.

Poprzez minimalizację ingerencji w teren, braku konieczności wykonywania wykopów, niszczenia infrastruktury drogowej, możliwości prowadzenia prac w terenie zurbanizowanym technologie bezwykopowe mają takie zalety jak: zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko, skrócenie czasu budowy i poprawę jej bezpieczeństwa [46]. Z drugiej strony, wg [22] jednym z ważniejszych czynników ryzyka środowiskowego dla technologii bezwykopowych, oprócz hałasu w obszarach miejskich, należy również wymienić negatywny wpływ na środowisko gruntowo-wodne, poprzez wycieki płuczki wiertniczej i generowanie znacznej ilości odpadów wiertniczych w postaci zużytej płuczki wiertniczej i zwiercin [33, 18, 12].

Ilość i jakość powstających odpadów zależna jest od: średnicy instalowanego rurociągu, użytego rodzaju narzędzia wiertącego, przyjętej technologii prowadzenia instalacji, profilu geologicznego przewiercanych skał, rodzaju zastosowanej płuczki oraz od zainstalowanego na budowie systemu oczyszczania płuczki wiertniczej. Szacuje się, że ilość odpadów generowanych w technologii HDD czy DP, na 1m.b. instalowanej rury o średnicy 1000 mm waha się w ilości od 2,18 do 3,92 m<sup>3</sup>.

W przyjętej przez 193 państwa członkowskie ONZ, podczas Zgromadzenia Ogólnego ONZ w Nowym Jorku we wrześniu 2015 r., Agendy na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju 2030 (*Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*) zapisano 17 Celów Zrównoważonego Rozwoju i 169 powiązanych z nimi zadań [42, 51]. Jednym z tych celów zrównoważonego i odpowiedzialnego rozwoju gospodarczego i ważnym elementem bezpieczeństwa ekologicznego jest zapewnienie wzorców zrównoważonej konsumpcji i produkcji. W celu tym zapisano, że do 2020 r. należy zapewnić przyjazne środowisku zarządzanie chemikaliami i wszyst-

kimi rodzajami odpadów podczas ich całego cyklu życia, w zgodzie z ustalonymi ramami międzynarodowymi oraz znacząco zmniejszyć poziom uwalniania tych substancji do powietrza, wody i gleby, a tym samym minimalizując ich negatywny wpływ na zdrowie człowieka i środowisko. W kolejnym punkcie zapisano, że do 2030 r. należy istotnie obniżyć poziom wytwarzania odpadów, poprzez zapobieganie, redukcję, recykling i ponowne użycie [42, 51].

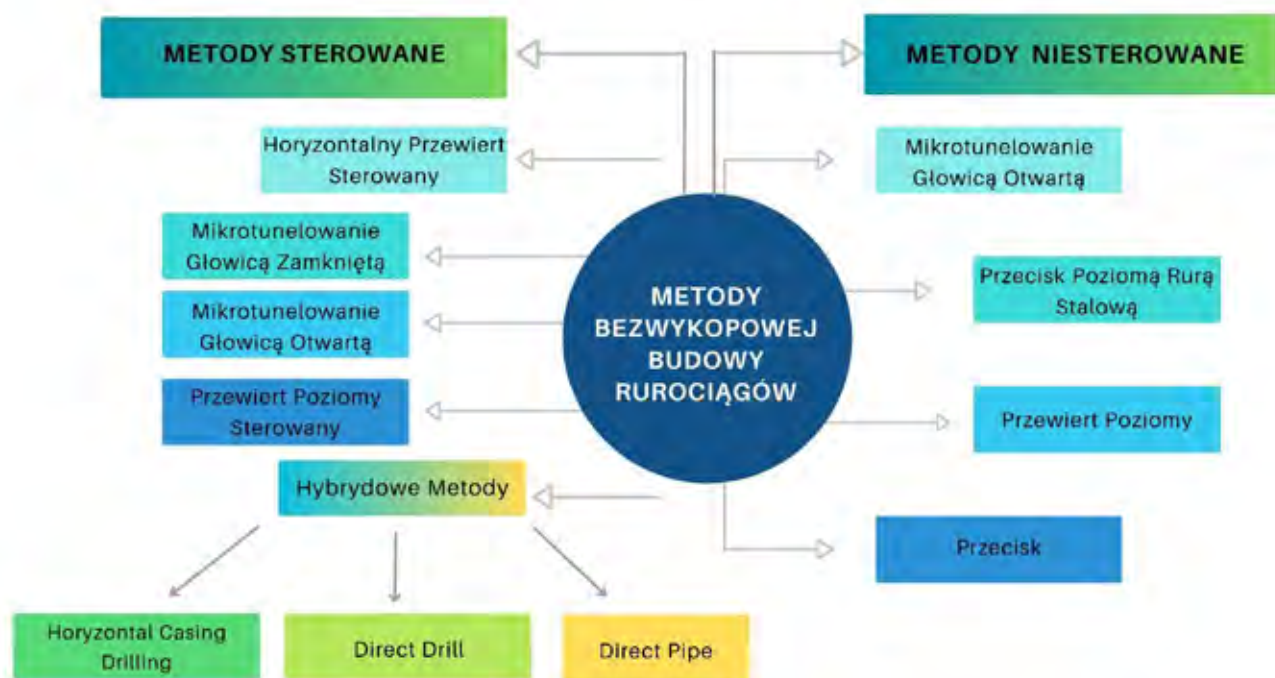
Zatem istotne jest, aby promować nowe techniki i technologie minimalizacji i utylizacji odpadów wiertniczych, powstających podczas wiercenia technologiami bezwykopowymi, tak aby technologie te stały się jeszcze bardziej przyjazne środowisku i wpisywały się w nurt gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) [26, 51, 15].

Wychodząc naprzeciw, w artykule dokonano charakterystyki metod budowy rurociągów w technologiach bezwykopowych, ze szczególnym zwróceniem uwagi na dwie najbardziej popularne technologie: HDD i Direct Pipe. Następnie autorzy omówili metody minimalizacji ilości i szkodliwości powstających odpadów wiertniczych, poprzez dobór odpowiedniego sprzętu do recyklingu płuczki oraz zaproponowali metody zagospodarowania powstałych odpadów.

## 2. Wprowadzenie do technologii bezwykopowej budowy nowych rurociągów

Terminem *Technologie Bezwykopowe* określa się rodzinę metod podziemnej budowy i renowacji infrastruktury rurociągowej i kablowej, które charakteryzują się niskim udziałem robót ziemnych i wykopów liniowych. W analizowanych pracach [6, 7, 15, 23, 34,], Autorzy przedstawiają bardzo zróżnicowany podział tych technologii. W celu uproszczenia podziału tych metod, Autorzy analizując rynki zachodniej Europy (z uwzględnieniem rynku polskiego) i krajów Ameryki Północnej proponują podział technologii bezwykopowych przedstawiony na rys. 1.

### Podział metod bezwykopowej budowy nowych rurociągów



Rys. 1. Podział technologii bezwykopowej budowy rurociągów

Fig. 1. Division of trenchless pipeline construction technologies

Planując bezwykopowe instalacje rurociągów stalowych na odległościach przekraczających kilkaset metrów, projektanci mają do wyboru dwie techniki budowy: HDD lub Direct Pipe®. W celu podjęcia optymalnej decyzji o wyborze technologii bezwykopowych instalacji rurociągów na tak długich dystansach, należy wziąć pod uwagę szereg warunków brzegowych stosowania poszczególnych metod budowy. Należy ocenić najważniejsze czynniki wpływu oraz dokładnie przeanalizować kryteria oceny przydatności danej techniki w konkretnym przypadku. Zarówno Inwestor, jak i Projektant powinni dobrze znać ich zalety i ograniczenia w użytkowaniu [18, 12, 33, 53].

### Technologia Horizontal Directional Drilling (HDD)

Historia technologii HDD sięga lat sześćdziesiątych XX wieku. Dzięki rozwojowi technologii HDD zwiększa się jej użyteczność. Natomiast wraz ze wzrostem długości instalowanych rurociągów i średnic rur, rośnie lista jej zalet i nowych zastosowań tej technologii. Należy tutaj wymienić następujące korzyści ze stosowania tej metody [50, 17]:

- zminimalizowany wpływ na środowisko naturalne,
- rurociąg można układać na dużych głębokościach (kilkadziesiąt metrów pod korytami rzek lub jezior),
- akceptowalny koszt i krótki czas wykonania prac,
- prace mogą być prowadzone pod terenami zalewowymi i torfowiskami,
- prace mogą być prowadzone w niestabilnym podłożu,
- istnieje możliwość omijania przeszkód stanowiących infrastrukturę podziemną,
- prace mogą być prowadzone w rezerwach przyrody,
- prace mogą być prowadzone w celu połączenia infrastruktury lądowej z obiektami na morzu, jak np. morskie farmy wiatrowe.

### Technologia DIRECT PIPE®

Direct Pipe® to jedna z najnowszych technologii instalacji rurociągów. Technologia łączy istniejące techniki HDD i mikrotunelowania. W tej technologii otwór jest wiercony, a rurociąg układany w jednym etapie instalacji. Spośród głównych zalet techniki Direct Pipe®, należy wymienić [15, 26, 31, 53, 55]:

- możliwość zastosowania w trudnych do wiercenia gruntach, takich jak żwir, zwięzłe gliny, luźne piaski,
- niewielkie ryzyko destabilizacji otworu wiertniczego,
- możliwość przewiercania się przez różnego rodzaju gruntu, skał i utworów geologicznych, bez względu na ich właściwości
- plac roboczy i komora robocza są wymagane tylko z jednej strony,
- możliwość podzielenia instalowanego rurociągu w dwa, trzy krótsze odcinki,
- dużo mniejsze ryzyko perforacji nadkładu ciśnieniem płuczki niż w technologii HDD, co pozwala wytyczać znacznie płytsze trajektorie planowanych przejść i w efekcie skraca przewiert.

Najdłuższy montaż metodą Direct Pipe® wykonano rurą o średnicy 48" na dystansie 2220 m [13, 55], a polska firma zrealizowała najdłuższy montaż rurą o długości 1400 m i średnicy 40" [35].

Porównując obie technologie należy stwierdzić, że technologia HDD jest na świecie znacznie bardziej popularna niż DP, dlatego ta druga metoda ma niewielką konkurencję wśród operatorów, przez co pozostaje relatywnie droga w porównaniu z technologią HDD [36]. Jednym z kryteriów, które należy wziąć pod uwagę, porównując te metody ze sobą, jest także ilość odpadów (w postaci płuczki i zwiercin) podczas wiercenia w tych technologiach. W tab. 1 przedstawiono porównanie technicznych parametrów obu tych technologii [13, 14, 25, 36, 55].

Porównując zestawione w tab. 1 parametry wiercenia metodą HDD i DP, należy stwierdzić, że z uwagi na charakterystykę technologii Direct Pipe®, tj. możliwości jednoetapowej realizacji prac, końcowa średnica przewiertu dla instalacji rur DN 1000 wynosi

Tabela 1. Porównanie parametrów dwóch technik budowy rurociągów podziemnych  
Tabela 1. Comparison of the parameters of two underground pipeline construction techniques

Parametr	HDD	Direct Pipe®
Średnice instalowanych rur (Dr)	4-60" (102-1524 mm)	28-60" (711-1524 mm)
Maksymalne długości instalacji	3000 m (pojedynczą wiertnicą) 5000 m (Intersect)	2000 m
Typowe dystanse instalacji	100-1000 [m]	250-750 m
Najdłuższe instalacje zrealizowane na świecie	5205 m Chiny, De = 0,508 m	2021 m Nowa Zelandia, De = 1,22 m
Minimalne przykrycie instalacji	10-15 Dr	3-5 Dr
Maksymalna głębokość instalacji	>100 m	40 m
możliwość kontrolowania trajektorii otworu	duża	mała
Wymagane komory wejściowa/wyjściowa	nie	tylko startowa
Możliwy materiał na wbudowywane rury	stal, HDPE, PCV, żeliwo	stal
Liczba etapów prac wiertniczych	2-4	1
Metoda transportu zwiercin	płuczka (przestrzenią pierścieniową)	płuczka (w rurociągu)
Średnia wartość obciążenia instalacji przypadająca na 1 m <sup>2</sup> poboczniczy rurociągu	150-600 N	500-1800 N

zwykle 1140 mm. Dla instalacji takiej samej rury dla technologii HDD średnica otworu oscyluje w granicach 1321 mm. To powoduje generowanie znacznie większej nominalnej pojemności urobku. Powszechnie uważa się, że metoda DP posiada mniejsze zapotrzebowanie na materiały płuczkowe [10, 13, 14]. Należy jednak podkreślić, że z uwagi na stosownie pomp do przetłaczania płuczki dla DP, niekiedy zachodzi konieczność wymiany całej objętości płuczki.

### 3. Płyn wiertnicze stosowane w technologiach bezwykopowych

Płuczka wiertnicza ma decydujący wpływ na ogólny sukces projektów wykonywanych w technologiach bezwykopowych, zwłaszcza w technologii HDD.

Kluczową funkcją płuczki wiertniczej w technologii HDD jest [23, 45]:

- usuwanie zwiercin z otworu,
- utrzymywanie ich w stanie zawieszenia i transport na powierzchnię dzięki czemu operacja wiercenia może być bez problemów kontynuowana,
- wypłukiwanie i hydro-urabianie gruntu,
- stabilizacja ściany wykonywanego przedwiertu,
- inhibitowanie warstw ilastych,
- chłodzenie, smarowanie i oczyszczanie głowicy wierzącej.

Natomiast w technologii DP płyn wiertniczy ma przede wszystkim do spełnienia następujące funkcję [32, 43]:

- zapewnienie prawidłowego smarowania zewnętrznych powierzchni rur przeciskowych, zmniejszając w ten sposób tracie powierzchniowe pomiędzy gruntem a przeciskany rurociągiem.
- stabilizować grunt w strefie urabiania, wspomagając jego urabianie,
- zapewniać prawidłowe oczyszczanie tarczy urabiającej grunt

- transportować urobek na powierzchnię,
- równoważyć ciśnienie wód gruntowych.

Niewłaściwie dobrany system płuczki może prowadzić do wielu problemów podczas prac wiertniczych, m. in. do utraty stabilności cyrkulacji płuczki w otworze, co może skutkować niestabilnością otworu (zapadaniem się terenu wokół przewiertu), wydłużonym czasem jego wiercenia, rosnącymi kosztami, zanieczyszczeniem gruntów, wód gruntowych a nawet powierzchniowych.

Stabilność cyrkulacji w otworze jest wyznacznikiem jakości płynu wiertniczego, zastosowania prawidłowego programu płuczki i powiązanych z nim procedur wiertniczych. System płuczki dobiera się w zależności od [5, 23, 37, 38]:

- warunków terenowych,
- warunków geologicznych,
- technologii prowadzenia prac,
- geometrii otworu,
- docelowej średnicy otworu,
- zaplanowanego profilu wiercenia,
- możliwości urządzenia wiertniczego,
- jakości wody wykorzystywanej do przygotowania płuczki,
- czynników ekonomicznych.

Z racji funkcji, które płuczki muszą spełniać przy wierceniu w technologii HDD i DP oraz ze względu na kryteria doboru systemu płuczki, płyny wiertnicze są złożonymi dyspersjami polimerowo-mineralnymi o różnicowanym składzie chemicznym i mineralogiczno-fazowym, a także zmiennym udziale koloidalnej fazy stałej zdyspergowanej w środowisku wodnym [4, 21]. Rolę czynnika strukturotwórczego, środka podwyższającego parametry reologiczne oraz obniżającego filtrację i tworzącego na ścianie otworu osad filtracyjny pełni bentonit, który jest modyfikowany organicznymi polimerami naturalnymi i semi-naturalnymi. Do sporządzania płuczek wiertniczych stosowane są głównie wysokokoloidalne bentonity, które po zmieszaniu z wodą, tworzą stabilne dyspersje wodne o odpowiednich parametrach reologicznych, przy niewielkiej zawartości bentonitu, co ma istotny wpływ na proces wiercenia. Właściwości montmorylonitu tłumaczy się istnieniem niewysyczonego ładunku elektrycznego pakietu. Jego wielkość określa liczbę kationów międzypakietowych, a zarazem pojemność sorpcyjną montmorylonitu [9].

Mechanizm wzajemnych oddziaływań pomiędzy koloidalnymi cząstkami minerałów ilastych, a organicznymi substancjami polimerowymi, decyduje o specyficznych właściwościach fizykochemicznych płuczek wiertniczych, a w dalszej kolejności koloidalnych odpadów wiertniczych. Obecność polimerów w składzie płuczki wiertniczej powoduje chemiczną modyfikację właściwości minerałów ilastych, przyczyniając się do zwiększenia w funkcji czasu stabilności zdyspergowanych układów jakimi są płuczki i odpady wiertnicze.

Badania prowadzone przez *Jamrozik et al.* [19], polegające na pomiarze stabilności płuczek bentonitowych w funkcji czasu, określane metodą pomiaru intensywności światła transmisyjnego i wielokrotnie rozproszonego przy użyciu optycznego analizatora Turbiscan Lab., Formulation wskazały, że płuczki te są wysoce stabilnymi dyspersjami. Dodatkowo w czasie zachodzi w nich zjawisko zagęszczania dyspersji. W związku z tym płuczki wiertnicze przybierają postać wysoce stabilnych, szlamistych hydrozólów koloidalnych, stanowią one trudny materiał do dalszego zagospodarowania i utylizacji.

Jednakże mając na uwadze, że koszt produkcji płuczki wiertniczej stanowi znaczną część kosztów ogólnych instalacji rurociągów, z zastosowaniem technologii bezwykopowych oraz biorąc pod uwagę, że koszty utylizacji zużytej płuczki i powstałego urobku są coraz wyższe, to wydaje się istotne dobranie racjonalnego systemu oczyszczania płuczki, minimalizacji ilości powstałych odpadów, sposobów ich wykorzystania lub unieszkodliwiania – co zostanie przedstawione i omówione w dalszej części artykułu.

#### 4. Metody postępowania z odpadami wiertniczymi

Odpady wiertnicze składają się głównie z płuczki wiertniczej oraz zwiercin pochodzących z przewiercanego interwału skalnego. Ilość płuczki wiertniczej oraz ilość i jakość generowanych odpadów wiertniczych zależna jest od:

- przyjętej technologii prowadzenia instalacji,
- użytej średnicy narzędzia wierzącego,
- profilu geologicznego przewiercanych skał,
- rodzaju zastosowanej płuczki,
- warunków geologicznych,
- końcowej średnicy otworu pod instalowany rurociąg,
- długości przewiertu,
- współczynnika strat płuczki w otworze wiertniczym.
- współczynnika płukania (MF),
- systemu oczyszczania płuczki stosowanego na budowie.

Odpady wiertnicze są układami koloidalnymi o zdecydowanie złych właściwościach filtracyjnych i niskiej przepuszczalności. Wynika to bezpośrednio z właściwości fizykochemicznych zastosowanej płuczki wiertniczej oraz właściwości sorpcyjnych materiałów ilastych pochodzących z przewiercanych interwałów skalnych. W zależności od składu i właściwości fizykochemicznych odpadów wiertniczych, ich ilości oraz obowiązujących regulacji prawnych koszty ich unieszkodliwienia po zakończeniu prac mogą stanowić znaczącą część do wielkości pozycję na liście kosztów danego projektu. Koszt utylizacji 1m<sup>3</sup> odpadu płuczki dochodzi do kosztu wytworzenia 1m<sup>3</sup> płuczki a niekiedy go znacznie przekracza. Obowiązkiem ekip stosujących technologie HDD i DP jest rozważenie wszystkich dostępnych metod ograniczenia nadmiaru płuczki, oraz wybór najbardziej uzasadnionej ekonomicznie i ekologicznie procedury utylizacji powstałych odpadów wiertniczych.

Sposób zagospodarowania odpadów wiertniczych wytworzonych podczas wiercenia otworów metodami bezwykopowymi m.in. takimi jak HDD czy DP powinien odbywać się zgodnie z decyzją zatwierdzającą program gospodarowania odpadami wydobywczymi, wydaną zgodnie z Ustawą o odpadach wydobywczych [47]. W świetle wytycznych dotyczących zarządzania odpadami, które są zawarte w art. 7 ust. 2 i 3 obowiązującej ustawy o odpadach [48], właściciel odpadów ma obowiązek w pierwszej kolejności podjąć odpady procesowi odzysku. Jeśli z przyczyn technologicznych nie jest to możliwe lub odzysk nie jest uzasadniony ze względów ekologicznych lub ekonomicznych, należy unieszkodliwić odpady zgodnie z wymogami ochrony środowiska.

Ustawodawstwo polskie jako metody gospodarowania odpadami dopuszcza, m. in. następujące technologie odzysku odpadów wiertniczych: 1) zastalanie i stabilizację odpadów, 2) składowanie odpadów, 3) formowanie tzw. kompozytów glebowych, 4) magazynowanie odpadów wiertniczych w odpowiednich zbiornikach ziemnych (np. starych wyeksploatowanych kamieniołomach) [47, 48, 49].

Unieszkodliwianie ma na celu trwałą izolację odpadu od środowiska lub jego unicestwienie, natomiast odzysk polega na przekształceniu odpadu w taki sposób, aby przestał spełniać warunki określone w obowiązującej definicji – czyli pozbawienie go cech, które powodowały, że posiadacz substancji lub przedmiotu pozbył się go lub też miał taki zamiar albo obowiązek. Tym samym wszystkie inne legalne czynności podejmowane wobec odpadów muszą być uznane za działania przygotowawcze, etapowe lub w inny sposób związane z odzyskiem albo unieszkodliwianiem odpadów.

Składowanie jest dozwolone tylko dla tych odpadów, których nie można odzyskać lub unieszkodliwić w inny sposób. Składowanie zatem stanowi ostatni etap zarządzania odpadami.

Artykuł 51 ustawy o odpadach [48] stanowi, że organ odpowiedzialny za wydawanie decyzji dotyczących warunków zago-

spodarowania terenu dla składowiska odpadów może uzależnić wydanie decyzji od przedstawienia przez inwestora ekspertyzy potwierdzającej niemożność odzysku lub unieszkodliwiania odpadów w sposób inny niż składowanie. Podejmowanie działań mających na celu odzysk wytworzonych odpadów jest istotne i obligatoryjne zgodnie z przepisami prawnymi [48].

Niestety, dla odpadów wiertniczych powstających w technologiach bezwykopowych praktycznie nie istnieją ekologiczne metody ich wykorzystania, są one przeważnie składowane [27]. Składowanie odpadów jest najmniej bezpieczne dla środowiska, a jednocześnie stanowi coraz droższy sposób postępowania z odpadem ze względu na rosnące koszty opłaty środowiskowej. Zatem obowiązkiem ekip stosujących technologię HDD i DP jest rozważenie wszystkich dostępnych metod ograniczania ilości powstających odpadów wiertniczych, np. poprzez stosowanie zamkniętych obiegów płuczkowych – systemów recyklingu.

Podstawowym krokiem w kierunku efektywnego gospodarowania płuczką wiertniczą powinna być minimalizacja jej objętości. Można to osiągnąć przez zapewnienie właściwych warunków do recyklingu płuczki, poprzez stosowania profesjonalnych urządzeń do jej oczyszczania. Jej nadmiar gromadzący się na powierzchni powinien być poddany odpowiedniej obróbce fizycznej, mającej na celu odseparowanie zwiercin. Po takiej obróbce płuczka staje się znowu w pełni użyteczna i może być ponownie skierowana do procesu wiercenia.

Właściwie zaprojektowany system oczyszczania płuczki pomaga efektywnie kontrolować następujące zagadnienia [21]:

- koszty przygotowania i obróbki płuczki wiertniczej,
- koszty utylizacji odpadów wiertniczych,
- ograniczać kosztowne rozcieńczenie,
- zawartość fazy stałej,
- postęp wiercenia,
- parametry hydrauliczne,
- stan techniczny otworu.

Efektywność systemu oczyszczania określa się jako procent fazy stałej, która została usunięta z płuczki. Typowa efektywność systemów oczyszczania płuczki wiertniczej waha się między 60 % a 80%, ale spada ona w przypadku płuczek o większej lepkości, lub z dużą zawartością drobnodispersyjnej fazy stałej pochodzącej z przewiercania glin, ilów, utworów piaszczysto-gliniastych lub w przypadku małego natężenia przepływu (cyrkulacji).

W technologiach bezwykopowych w celu efektywnego oczyszczenia płuczki wiertniczej ze zwiercin, a także celem odzyskania jak największej ilości płuczki wiertniczej, w zależności od warunków geotechnicznych, właściwości płuczki, stosowanej metody wiercenia stosuje się metody, które ogólnie można podzielić na mechaniczne i chemiczne. Zasadniczą część systemu oczyszczania płuczki wiertniczej stanowią mechaniczne urządzenia do separacji fazy stałej, tj. sita wibracyjne, hydrocyklony (odpiaszczacze, odmulacze), wirówki dekantacyjne.

Sita wibracyjne są stosowane jako urządzenie pierwszego i zasadniczego stopnia oczyszczenia płuczki wiertniczej ze zwiercin. Umożliwiają oddzielenie cząstek fazy stałej o rozmiarach  $>74 \mu\text{m}$ . Czynniki, które determinują efektywność oczyszczania płuczki na sitach to [3, 4, 28, 29, 39]:

- przepustowość sit,
- wymiary oczek siatki,
- gęstość siatki,
- kształt sit,
- charakter ruchu,
- kąt ustawienia siatek,
- wartości przyspieszenia (wynoszącego na ogół od 4 do 8 G).

W celu zwiększenia skuteczności oczyszczania, sita montuje się w tzw. zespoły kaskadowe. Jedno z sit pełni funkcję wstępnego separatora, oddzielającego grubszą frakcję (okruchy skalne, żwir).

Kolejne sita mają zastosowane siatki o drobniejszych oczkach, by oddzielić coraz drobniejsze frakcje (piaski i pyły). Sita wibracyjne często są zintegrowane z bateriami hydrocyklonów, które zrzucają na nie zwilżone płuczką zwierciny [2, 28].

Strumień płuczki po bezpośrednim oczyszczeniu na sitach wibracyjnych kierowany jest na hydrocyklony. Hydrocyklony to cylindryczno-stożkowe urządzenia zasilane zewnętrzną pompą wirnikową. W zależności od rozmiaru, dzieli się je na: odpiaszczacze ( $\varnothing > 6''$ ), odmulacze ( $\varnothing = 4 - 6''$ ), i mikrohydrocyklony ( $\varnothing < 4''$ ). Hydrocyklony łączy się w baterie od 2 do nawet 16 szt. Ilość baterii hydrocyklonów a także ilość lejków w ramach baterii zależna jest od [4, 9, 28]:

- klasy urządzenia – siły ciągnięcia urządzenia wierzącego,
- średnicy instalowanego przewodu,
- natężenia przepływu płuczki,
- wydajności pomp płuczkowych,
- wielkości i złożoności systemu oczyszczania.

Hydrocyklony pozwalają na usunięcie cząstek o rozmiarach  $> 15 \mu\text{m}$ . Jednakże ich wadą jest tendencja do dalszego rozdrabniania cząstek urobku, czyniąc paradoksalnie oczyszczanie płuczki jeszcze trudniejsze [40].

Kolejnym krokiem w kierunku zwiększenia efektywności oczyszczania płuczek wiertniczych na drodze separacji mechanicznej są wirówki dekantacyjne. W typowym układzie systemu oczyszczania płuczki wirówka jest ostatnim elementem tego systemu. Mechaniczne oddzielenie fazy stałej od płuczki przy użyciu wirówki dekantacyjnej jest bardzo efektywnym środkiem prowadzącym do utrzymania odpowiedniej lepkości płuczki wiertniczej. Z reguły zaleca się zastosowanie tandemu wirówek: wirówki objętościowej i wirówki wysokoobrotowej. Wirówki objętościowa używana jest głównie do usuwania z płuczki fazy stałej o rozmiarach większych niż 5-7  $\mu\text{m}$ . Charakteryzują się ona wysokim natężeniem przepływu w zakresie od 350 do 750 l/min. i obrotami w zakresie od 1900 do 2200 obr/min [4, 8, 11, 16].

Wirówka wysokoobrotowa używana jest jako druga wirówka w systemie. Wirówka ta generuje większą siłę odśrodkową i oddziela cząstki urobku w zakresie od 2-5  $\mu\text{m}$ . Obraca się ona z prędkością od 2500 do 330 obr/min i zasilana jest strumieniem o wydajności od 150 do 450 l/min. Wirówki dekantacyjne stosowane w technologii HDD czy też DP powinny się charakteryzować się jak największą pojemnością i średnicą bębna od 400 do 600 mm [41].

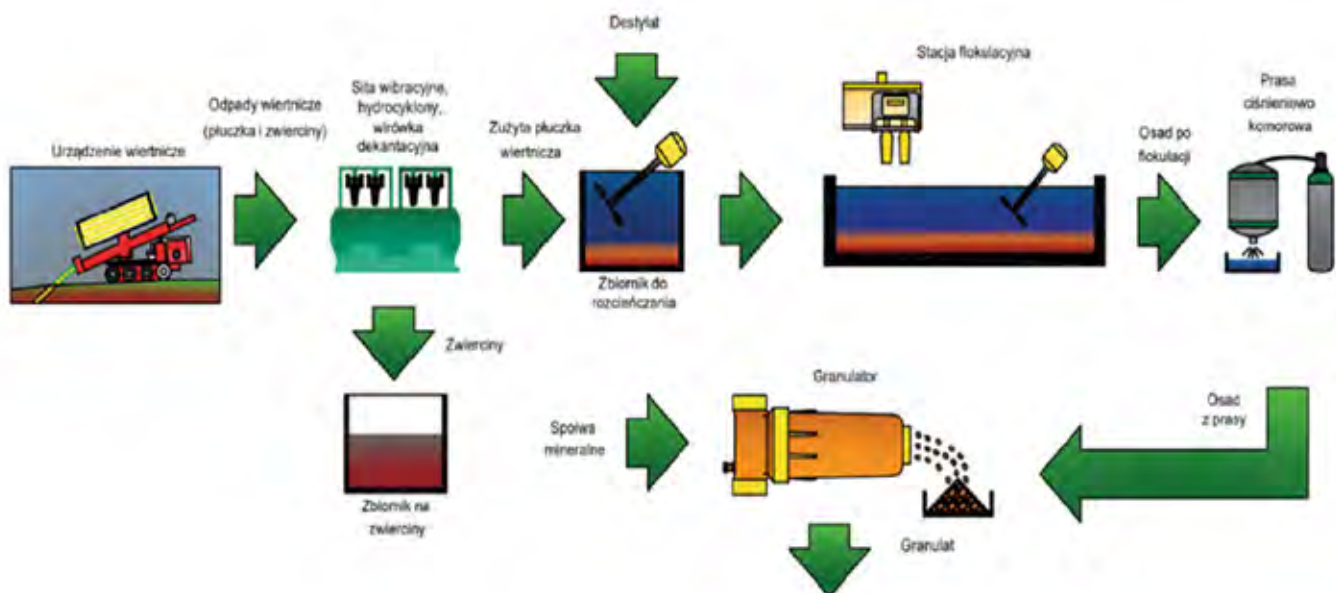
Faza stała pozostająca w płuczce wiertniczej po oczyszczeniu na drodze mechanicznej, ma rozmiary koloidalne. Nie podlegają one działaniu siły grawitacji, ponieważ przewyższają ją siły translacyjne (ruchy Browna). Dlatego też system mechaniczny oczyszczania płuczki powinien być wspomagany przez metody chemiczne – na drodze koagulacji i/lub flokulacji.

Stacja flokulacyjna wyposażana jest w moduł dozowania koagulantu i/lub flokulantu. Dozowanie koagulantu powoduje zmniejszenie tzw. warstwy podwójnej wokół cząstek koloidalnych a po podaniu polimeru flokulującego następuje przyleganie polimeru do cząstek drobnodispersyjnych ciał stałych i następnie tworzenie się dużych skupisk (agregatów) cząstek rozproszonych, co znacznie ułatwia oddzielenie ciał stałych od płynu w wirówce dekantującej lub na komorowej prasie filtracyjnej.

Najczęściej jako koagulanty stosuje się nieorganiczne sole i kompleksy wielowartościowych kationów (głównie Al i Fe), takich jak:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ , ałuny glinowe, kompleksy hydroksyglinowe i hydroksyżelowe, a także  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  i  $\text{FeSO}_4$  [30].

Jako flokulanty stosuje się najczęściej [21, 30, 52, 54]:

- krzemionkę aktywowaną,
- hydrolizowaną skrobię,
- karboksymetylocelulozę,
- polianionową celulozę,
- poliwinylowo aminy,



Rys. 2. Zamknięty obieg płuczki możliwy do zastosowania w technologiach HDD i DP

Fig. 2.. Closed scrubber circuit possible for HDD and DP technologies

- pochodne kwasu poliakrylowego, takie jak np. częściowo hydrolizowany poliakryloamid w odpowiednich stężeniach,
- syntetyczne polimery o dużych masach cząsteczkowych.

Zasada działania stacji flokulacyjnej polega na tym, że płuczka wiertnicza pochodząca po oczyszczeniu na urządzeniach mechanicznej separacji fazy stałej przekazywana jest przez pompy do modułu dozowania koagulantu/flokulantu. Koagulanty mają za zadanie zmniejszenie stateczność emulsji płuczki i tym samym pozwalają polimerowi flokującemu lepiej przylegać do drobnych cząstek stałych. Następnie płuczka wiertnicza jest transferowana do systemu mieszającego, a stamtąd do wirówki lub komorowej prasy filtracyjnej. Po odwirowaniu/odwodnieniu na prasie filtracyjnej otrzymuje się odpad o zawartości suchej masy w przedziale od 60 do 70% wag., przez co jego późniejsze zagospodarowanie staje się łatwiejsze. Natomiast odzyskany płyn wiertniczy ma niską gęstość i może zostać użyty, jako podstawa dla przygotowania nowych płuczek wiertniczych [21, 41]. Częstą praktyką jest rozcieńczanie płuczki przed zabiegiem koagulacji i/lub flokulacji. Nawet nieznacznie rozcieńczona płuczka łatwiej poddaje separacji na drodze destabilizacji chemicznej.

Na rys. 2 przedstawiono system zamkniętego obiegu płuczki możliwego do zastosowania w technologiach HDD i DP.

W efekcie zastosowania tej metody następuje zintensyfikowanie i zwiększenie skuteczności tradycyjnego systemu oczyszczania płuczek wiertniczych, zwiększenie przydatności płuczki do ponownego użycia, a także zmniejszenie ilości odpadów wiertniczych.

Dodatkowo odpady pozostałe po odwirowaniu lub odwodnieniu na prasie filtracyjnej można poddać niezbędnym procesom technologicznym prowadzącym do przekształcenia odpadu w produkt (np. poprzez granulację ze spoiwami mineralnymi lub/i hydraulicznymi i określić należy je jako odzysk odpadów wiertniczych.

## 5. Dyskusja

Technologia HDD i Direct Pipe® są obecnie równorzędnymi i niezastąpionymi technologiami dla przekroczeń kilkusetmetrych odcinków instalacji rurociągów o średnicach powyżej 700 mm. W technologiach bezwykopowych głównie stosuje się płuczki bentonitowe modyfikowane polimerami [1, 9, 23, 24, 37, 44]. Płuczki te są wysoce stabilnymi polimerowo-mineralnymi układami o wysokich właściwościach reologicznych [55]. Sai Deg et al. [44]

uwazają, że wysokie wartości stosunku granicy płynięcia do lepkości plastycznej (YP/PV) przynoszą korzyści podczas wiercenia w postaci lepszego transportu zwiercin, jednakże wysokie wartości lepkości plastycznej skutkują gorszym oczyszczeniem płuczki z fazy stałej, a także powodują większe opory przepływu. Dodatkowo faza stała w którą wzbogaca się płuczka podczas wiercenia powodują zmianę jej pierwotnych parametrów reologicznych. Szybkość zmian tych parametrów zależy od mechanicznej prędkości wiercenia, rozdrobnienia i składu zwiercin oraz metod i sprawności układu oczyszczania płuczki wiertniczej. W profilu geologicznym Polski dominują głównie minerały ilaste [24]. Minerały ilaste mają zdolność sorbowania kationów i anionów, zatrzymywania ich oraz wymiany na inne kationy i anion. Właściwości te mają także istotne znaczenie w kontekście minimalizacji i zagospodarowania odpadów wiertniczych [8, 16].

Odpadowe płuczki wiertnicze o charakterze układów koloidalnych zawdzięczają swoją stabilność takim czynnikom jak [16, 21.]:

- zawartość jednoimiennych ładunków elektrostatycznych cząstek wchodzących w skład koloidów, tworzonych głównie przez zespół połączonych ze sobą substancji mineralnych i organicznych typu polimerycznego,
- wielkość otoczek hydratacyjnych okalających hydrofilne składniki cząstek koloidalnych,
- udziałowi wysoce hydrofilnych polimerów (między innymi pochodnych poliakryloamidu i biopolimerów).

Mechaniczne systemy recyklingu płuczki wiertniczej są najbardziej efektywne w przypadku przewiercania frakcji piaskowych, żwirowych i skalistych. Płuczki stosowane do przewiercania gleby zawierającej glinę i minerały ilaste nie dają się skutecznie oczyścić tylko na drodze separacji mechanicznej [8]. Bez wstępnego przygotowania i destabilizacji z zastosowaniem metod chemicznych nie poddają się one procesom skutecznego odwirowania lub odwodnienia. Badania współczynnika filtracji odpadów wiertniczych prowadzone przez K. Macnara et. al. [30] wykazały, że odpady wiertnicze mają współczynnik filtracji na poziomie  $k = 1,9 - 1,7 \cdot 10^{-8}$  [m/s], przy zawartości wody ok. 46 – 78 %. Destabilizacja tego typu układów zawierających znaczne ilości minerałów ilastych i polimerów utrudniona jest poprzez stabilizację elektrostatyczną, która to zapewnia im szczególne właściwości, takie jak brak rozdziału faz, homogeniczność. Skuteczność stosowanych koagulantów/flokulantów spada wraz ze wzrostem udziału polimeryczno-ilastej

frakcji koloidalnej. Nie jest możliwe wypracowanie jednolitej receptury stosowania koagulantów i flokulantów. Dobór koagulantu/flokulanta, jego stężenie i proporcje zależne są od właściwości fizyko-chemicznych samej płuczki, od przewiercanego interwału skalnego od rodzaju wybranego koagulantu i flokulanta. Dlatego nowym nurtem badawczym stały się niskocząsteczkowe kopolimery kationowo-niejonowe o wysokim stopniu jonowości, zawierające w strukturze 1-rzędowe grupy aminowe [54], kationowo-jonowe kopolimery o małej masie cząsteczkowej zawierające w swojej strukturze pierwszorzędowe grupy aminowe, jak np. polimery N-winyloaminy [20] jak również nieorganiczno-organiczne kompozytowe flokulanty do separacji ciała stałe-ciecz [54].

Zaproponowany przez autorów system oczyszczania płuczki wiertniczej pozwala na pracę w zamkniętym obiegu, który umożliwia powtórne wykorzystanie znaczącej jej części zarówno do wiercenia kolejnego otworu jak i zastosowania jako osnowy do sporządzania nowej płuczki wiertniczej. Powstały odpad po procesie odwodnienia na wirówce/komorowej prasie filtracyjnej staje się mineralnym materiałem o charakterze spoistym, drobnoziarnistym i plastycznej konsystencji. Odseparowana przez system oczyszczania faza stała powinna zostać zutilizowana zgodnie z procedurami przewidzianymi prawem.

Proponowane przez Autorów rozwiązanie techniczne przekłada się na obniżenie kosztów ponoszonych z tytułu zmniejszenia ryzyka prowadzonych prac, zwiększenia mechanicznej prędkości wiercenia, zmniejszenia konsumpcji wody i materiałów płuczkowych, a także, z tytułu zmniejszenia ilości poddanych utylizacji odpadów wiertniczych oraz zminimalizowania zagrożeń dla środowiska naturalnego.

Wdrożenie technologii minimalizacji ilości odpadów wiertniczych powstających podczas wierceń technologii HDD czy też DP ma pozytywny wydźwięk zarówno ekologiczny jak i ekonomiczny i wpisuje się w trend gospodarki o obiegu zamkniętym.

## 6. Wnioski

1. Technologie bezwykopowe obecnie stanowią niekwestionowaną alternatywę dla technologii standardowych wykopów. Z każdym rokiem ich udział w rynku instalacyjnym znacząco rośnie.
2. Płuczki wiertnicze stosowane w technologiach bezwykopowych zawierają wodę jako płyn bazowy. Bentonity i polimery organiczne są wprowadzane w celu wytworzenia jednorodnego płynu i w celu uzyskania kontroli właściwości reologicznych i stabilności otworu.
3. Dzięki oddzieleniu cząstek stałych na proponowanym przez Autorów systemie, oczyszczona płuczka może być wielokrotnie używana w zamkniętym obiegu płuczkowym. Przyspiesza to postęp wiercenia, znacznie zmniejsza zużycie narzędzi wiertniczych i pomp oraz zmniejsza zużycie wody i materiałów płuczkowych, co ogólnie zwiększa rentowność stosowania technologii HDD i DP i wpisuje się w nurt gospodarki o obiegu zamkniętym.
4. Chemiczna destabilizacja płuczek wiertniczych może być prowadzona metodami koagulacji lub/i flokulacji. Uzyskane w wyniku procesów separacji, faza ciekła (filtrat) i faza stała (placpek filtracyjny, osad) mogą być traktowane jako produkty do wykorzystania lub odpady do dalszego przetwarzania.
5. Sposób zagospodarowania odpadów wiertniczych powstających w technologiach bezwykopowych uzależniony jest od: właściwości fizyko-chemicznych odpadów, uwarunkowań środowiskowych i technicznych (dozwolone prawnie metody, dostępne instalacje do odzysku lub unieszkodliwiania) i logistycznych (opłacalny transport odpadów do tych instalacji).
6. Włączenie procesu koagulacji/flokulacji płuczek wiertniczych do systemu ich oczyszczania może stanowić część systemu racjonalnego zarządzania odpadami wiertniczymi, by zmniejszyć ilość zu-

żytego surowca, zmniejszyć ilość zużytych płuczek wiertniczych, zmniejszyć koszty i odzyskać wartościowe komponenty, a tym samym łączyć środowiskowe korzyści poprzez wyeliminowanie znacznych ilości odpadów wiertniczych.

## Źródło finansowania:

Praca została sfinansowana ze środków programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” dla Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz ze środków wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (nr. 16.16.190.779).

## LITERATURA

- [1] American Gas Association, Pipeline Research Committee. 1994. “Drilling fluids in pipeline installation by horizontal directional drilling”. *Practical application manual*. PR-227-9321, Tulsa, OK.
- [2] Anderson Michael Rai. 2013. “Principles of Solids Control”. *Trenchless Technology*, <https://trenchlesstechnology.com/principles-of-solids-control/>, dostęp on-line 31.07. 2023 r.
- [3] American Assosation of Drilling Engineers. 2014. “Shale Shakers and Drilling Fluids System”. *American Assosation of Drilling Engineers*. Texas.
- [4] ASME Shale Shaker Committee. 2005. “Drilling Fluids Processing Handbook” *Elsevier INC*. London.
- [5] Hans-Joachim Bayer. 2005. “HDD Practice Handbook”. *Vulkan-Verlag GmbH*.
- [6] Darsh Belani, Jayeshkumar Pitroda, Jaydev Jagmohandas Bhavsar. 2014. “A Review On Trenchless Technology: State Of Art Technology For Underground Utility Services.” National Conference on: “*Trends and Challenges of Civil Engineering in Today's Transforming World*” 29<sup>th</sup> March. ISBN: 978-81-929339-0-0.
- [7] David Bennett, Samuel Ariaratnam. 2017. “Horizontal Directional Drilling (HDD). Good Practices Guidelines”. *The North American Society for Trenchless Technology*, HDD Consortium, USA, 4th Edition.
- [8] Biao Shu, Baosong Ma, Cong Zeng, Haitao Lan. 2011. „Preparation and Recycling of Drilling Mud in Large Scale Horizontal Directional Drilling Projects in Mainland China”, Conference Paper: *Sustainable Solutions For Water, Sewer, Gas, And Oil Pipelines* ICPTT.
- [9] Bielewicz Danuta. 2009. „Płyny wiertnicze”, *Wydawnictwa AGH*, Kraków.
- [10] Bueno Sharon. 2019. „Przekroczenie Zatoki Meksykańskiej w technologii Direct Pipe”. *Inżynieria Bezwykopowa*, (1): 96–99.
- [11] Ben Clark, Barry Sorteberg. 2015. “Centrifuges Improve Directional Drilling Operations and Reduce Disposal Costs”, *Trenchless Technology*.
- [12] C. Como. 2006. “Drilling Fluid Use and Drilling Waste Disposal on HDD Project”. *Technical Papers from North American Society for Trenchless Technology*.
- [13] Firkowski Marcin. 2020. „Technologia Direct Pipe w skomplikowanych warunkach geologicznych”, *Inżynieria Bezwykopowa*. (2).
- [14] Firkowski Marcin, Szypuła Krzysztof. 2016. „Pierwsze w Polsce przekroczenia w technologii Direct Pipe”, *Inżynieria Bezwykopowa*, (4).
- [15] Gerasimova Vera. 2016. “Underground Engineering and Trenchless Technologies at the Defense of Environment” 15<sup>th</sup> international Scientific Conference “*Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development, Procedia Engineering*” (165) : 1395-1401.
- [16] Gonet Andrzej i inni. 2006. „Metody przetwarzania organiczno-mineralnych odpadów wiertniczych w aspekcie ich zagospodarowania”. *Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica*.
- [17] Hermes Science Publishing Ltd. 2004. “Recommendations French Society for Trenchless Technology, Microtunneling and Horizontal Drilling”. First published in Great Britain 2004 by *Hermes Science Publishing Ltd*.

- [18] Jamrozik Aleksandra, Ziąja Jan, Gonet Andrzej. 2011. "Analysis of applicability of modified drilling waste for filling out annular space in horizontal directional drilling". *Polish Journal of Environmental Studies*. vol. 20 (3): 671–675.
- [19] Jamrozik Aleksandra, Gonet Andrzej, Fijał Jerzy, Terpiłowski Konrad, Czekaj Lucyna. 2014. "Analysis of waste mud stability". *AGH Drilling, Oil, Gas*, vol. 31 (1).
- [20] Jamrozik Aleksandra, Ziąja Jan, Wysocki Sławomir. 2025. "Improving Energy Efficiency in the Management of Drilling Waste from Trenchless Gas and Power Pipeline Construction Through the Implementation of Photovoltaic Panels and Circular Economy Principles", *Energies*, 18(4) : 1-27.
- [21] Jamrozik Aleksandra, Wiśniowski Rafał, Gonet Andrzej. 2019. "The best available techniques for the control of solids and treatment of oil-contaminated drilling waste" *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 19(1.2): 1099–1108.
- [22] Krechowicz Maria, Gierulski Waclaw, Loneragan Stephen, Kruse Henke. 2022. "External Risk Factors Evaluation in Horizontal Directional Drilling Technology Using Failure Mode and Effect Analysis". *Management and Production Engineering Review* Volume 13 (1) : 76–88. DOI: 10.24425/mper.2022.140878
- [23] Kuliczkowski Andrzej i inni. 2019. „Technologie bezwykopowe w inżynierii środowiska”, Wydanie drugie. *Wydawnictwo "Seidel-Przywecki"*.
- [24] Kwast-Kotlarek Urszula, Heldak Maria, Szczepański Jakub. 2018. "Introducing Bentonite into the Environment in the Construction Stage of Linear Underground Investment Using the HDD Method". *Appl. Sci.* 8(11).
- [25] Lang Gerhard, Pfeff Diana, Hayes Ben. 2016. "Direct Pipe As An Alternative To HDD, Method And Case Studies" *Herrenknecht AG*.
- [26] Lu Hongfang, Matthews John, Iseley Tom. 2020. "How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis". *Journal of Cleaner Production*, Volume 261, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121215>
- [27] Lu Hongfang, Xi Ma, Azimi Mohammadamin. 2020. "US natural gas consumption prediction using an improved kernel-based nonlinear extension of the Arps decline model" *Energy* Volume 194.
- [28] M-I Drilling Fluids, Schlumberger Company. 2023. "HDD, Mining & Waterwell. Product listing and applications", <https://www.slb.com/-/media/files/mi/catalog/hdd-catalog.ashx> Dostęp on-line: 31.07.2023 r.
- [29] M-I Drilling Fluids, Schlumberger Company. 2023. "Solids Control Solutions for HDD, Mining & Waterwell. Reduce waste, recover more fluid, and increase performance". <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/drilling/drilling-fluids-and-well-cementing/solids-control/solids-control-solutions-for-hdd-mining-and-waterwell> Dostęp on-line: 31.07.2023 r.
- [30] Macnar Kazimierz, Gonet Andrzej, Stryczek Stanisław. 2008. "Dewatering and neutralization of waste drilling muds." *Mineralogia – Special Papers. MECC'08: 4th Mid-European Clay Conferenc.*
- [31] Mishra Tabitha. 2019. "The Direct Pipe Method: Combining the Benefits of HDD and Microtunneling" <https://www.trenchlesspedia.com/the-direct-pipe-method-combining-the-benefits-of-hdd-and-microtunneling/2/4153> dostęp on-line, 19.02.2025 r.
- [32] Montazar Rabiël, Kuo Ping, Chang Sonny, Gelinat Marc. 2018. "Analysis and Design of Pipes Installed via Direct Pipe® Technology", *North American Society for Trenchless Technology*, NASTT's 2018 No-Dig Show Palm Springs, California.
- [33] Najafi Mohammad, Gokhale Sanjiv, Ma Baosong. 2021. "Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal", 2<sup>nd</sup> Edition. *Hardcover – Import*.
- [34] Naveen Kumar at all. 2021. "A Review on Trenchless Technology". *International Journal for Modern Trends in Science and Technology* (7) :202-207.
- [35] Osikowicz Robert. 2023. "Long And Large Diameter HDD Crossings. Top 100 Światowych Projektów". *Inżynieria Bezwykopowa* (1).
- [36] Osikowicz Robert. 2021. „Analiza porównawcza HDD vs. DP”. *VI Konferencja Techniczna ROE*. Kraków.
- [37] Osikowicz Robert. 2016. „Zamknięty obieg płuczkowy, cz. I: Idea”. *Inżynieria Bezwykopowa* (1).
- [38] Osikowicz Robert. 2013. „Rynek płynów wiertniczych”, *Inżynieria Bezwykopowa* (4).
- [39] Osikowicz Robert. 2018. „Planowanie i realizacja projektów HDD” cz. III, *Inżynieria Bezwykopowa*, (3).
- [40] Osikowicz Robert. 2016. „Zamknięty obieg płuczkowy, cz. II: Selekcja Parametrów”. *Inżynieria Bezwykopowa*, (2).
- [41] Ptak Sebastian. 2019. „Utylizacja płuczki wiertniczej stosowanej w projektach HDD”, *Inżynieria Bezwykopowa*, (4).
- [42] Rezolucja ONZ. 2015. "Przekształcamy nasz świat: Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030 (Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development), Rezolucja przyjęta przez Zgromadzenie Ogólne w dniu 25.09.2015 r.
- [43] Robison Jonathan, Arens Nicholas. 2017. "Direct Pipe® Construction – An Engineering Perspective on Quality Assurance". Conference: Pipelines. <https://www.researchgate.net/publication/318893184>, dostęp on-line 13.02.2025r.
- [44] Sai Deng, Chao Kang, Alireza Bayat and Trovato Cainan. 2020. "Rheological Properties of Clay-Based Drilling Fluids and Evaluation of Their Hole-Cleaning Performances in Horizontal Directional Drilling". *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. Volume 11 (3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.000047](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.000047). dostęp on-line 13.02.2025 r.
- [45] Skonberg Eric, Muindi Tennyson. 2014. „Pipeline Design for Installation by Horizontal Directional Drilling” Second Edition, ASCE Manuals and reports on Engineering Practices No. 108, Horizontal Directional Drilling Guideline Task Committee of the Technical Committee on Trenchless Installation of Pipelines of the Pipeline Division of the American Society of Civil Engineers. published by the *American Society of Civil Engineers*.
- [46] Sparks E. Andrew, Hotz Robert. 2022. "Direct Pipe Is No Panacea, but it Could be the Right Solution". Portal: trenchlesstechnology.com, <https://trenchlesstechnology.com/direct-pipe-is-no-panacea-but-it-could-be-the-right-solution/> dostęp on-line, 25.01.2025 r.
- [47] Ustawa z dnia 10 lipca 2008 r. o odpadach wydobywczych (Dz.U.2022 r. poz. 2336),
- [48] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U.2022 r. poz.699)
- [49] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (tekst jedn. Dz.U. z 2021 r., poz. 1973 ze zm.),
- [50] Willoughby David. A. 2005. „Horizontal Directional Drilling utility and pipeline applications”.
- [51] Serwis Rzeczypospolitej Polskiej. Cele zrównoważonego rozwoju, <https://www.gov.pl/web/rozwoj-technologie/cele-zrownowazonego-rozwoju>, dostęp on-line, 19.02.2025 r.
- [52] Wysocki Sławomir. 2010. „Flokulacja suspensji ilastych i zasolonych płuczek wiertniczych z zastosowaniem nowo opracowanych flokulantów kationowych (PT-FLOC-201107)". *Wydawnictwa AGH Wiertnictwo, Nafta, Gaz*. T. 27 (4).
- [53] Xufeng Yan, Samuel T. Ariaratman, Shun Dong, Cong Zeng. 2018. "Horizontal directional drilling: State-of-the-art review of theory and applications", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 72 : 162-173.
- [54] Yang Liu, et al. 2021. "The Study of Optimization of Flocculation and Destabilization Technology of Waste PEM Drilling Fluid in Bohai Oilfield", *Front. Energy Res.*, 03 December 2021 r., Sec. Advanced Clean Fuel Technologies, Volume 9 – <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.796786>
- [55] Ziąja Jan, Wiśniowski Rafał, Jamrozik Aleksandra, Knez Dariusz. 2018. "Modern construction technologies of gas pipelines and oil pipelines" *SGEM 2018 – 18<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Albena, Bulgaria*.