



Imię i nazwisko autora rozprawy: Paweł Szewczuk  
Dyscyplina naukowa: Inżynieria Mechaniczna

## ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Eksperymentalna analiza wpływu ruchu posuwisto-zwrotnego i obrotowego oraz miejscowych zmian geometrii na skuteczność wypierania cieczy wiertniczych z przestrzeni pierścieniowej

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Experimental analysis of the influence of reciprocating and rotational motion as well as local geometry changes on drilling fluids displacement from the annular space

Promotor dr hab. inż. Marek Szkodo, prof. nadzw. PG  <i>podpis</i>	Drugi promotor   <i>podpis</i>
<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>	<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>
Promotor pomocniczy  <i>podpis</i>	Kopromotor  <i>podpis</i>
<Stopień, imię i nazwisko>	<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>

## Spis Treści

<b>Spis Treści</b> .....	<b>1</b>
<b>Lista Rysunków</b> .....	<b>2</b>
<b>Lista Tabel</b> .....	<b>6</b>
<b>Podziękowania</b> .....	<b>7</b>
<b>Dedykacja</b> .....	<b>8</b>
<b>Streszczenie w języku polskim</b> .....	<b>9</b>
<b>Streszczenie w języku angielskim</b> .....	<b>10</b>
<b>Lista symboli, skrótów i indeksów</b> .....	<b>11</b>
<b>Rozdział 1 Wprowadzenie</b> .....	<b>13</b>
1.1. Rola węglowodorów we współczesnym świecie .....	13
1.2. Etap cementowania otworu wiertniczego w procesie wydobywania węglowodorów .....	18
1.3. Ryzyko związane z niepowodzeniem operacji cementowania .....	24
<b>Rozdział 2 Analiza stanu wiedzy</b> .....	<b>36</b>
2.1. Kroki milowe w zrozumieniu procesu wypierania się cieczy w przestrzeni pierścieniowej 36	
2.2. Model matematyczny .....	49
<b>Rozdział 3 Postawione tezy i cel pracy</b> .....	<b>52</b>
<b>Rozdział 4 Wpływ geometrii przestrzeni pierścieniowej i ruchu wewnętrznej rury na proces wypierania – badania eksperymentalne na stanowisku badawczym</b> .....	<b>54</b>
4.1. Stanowisko badawcze .....	54
4.2. Przebieg testów .....	76
4.3. Analiza wyników .....	77
<b>Rozdział 5 Analiza danych otworowych</b> .....	<b>101</b>
<b>Rozdział 6 Omówienie wyników i wnioski</b> .....	<b>111</b>
<b>Rozdział 7 Rekomendacje</b> .....	<b>114</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>117</b>

## Lista Rysunków

Rysunek 1 Wielkość populacji ludzkiej w ostatnich 12 000 lat [2] .....	13
Rysunek 2 Produkcja ropy względem wielkości populacji ludzkiej .....	14
Rysunek 3 Krzywe zależności popytu i podaży od ceny .....	15
Rysunek 4 Produkcja energii elektrycznej w rozróżnieniu na sposób jej otrzymywania [10] .....	16
Rysunek 5 Światowe zapotrzebowanie energetyczne ze względu na źródło energii [14] .....	17
Rysunek 6 Wizualizacja eksperymentalnego reaktora fuzyjnego ITER Tokamak [17] .....	18
Rysunek 7 Udział typów złóż w wydobywaniu gazu w USA [18] .....	19
Rysunek 8 Typy złóż węglowodorów [19] .....	20
Rysunek 9 Eksploatowane złoża Yates w USA [20] .....	21
Rysunek 10 Kamienie milowe w eksploatacji morskiej węglowodorów [22] .....	21
Rysunek 11 Schemat otworu wiertniczego .....	22
Rysunek 12 Wizualizacja płaszczu cementowego [23] .....	22
Rysunek 13 Schemat procesu cementowania otworu wiertniczego .....	23
Rysunek 14 Rodzaje kanałów w płaszczu cementowym .....	25
Rysunek 15 Schemat korozji kolumny rur [26] .....	26
Rysunek 16 Wyniki pomiarów ubytku grubości ściany kolumny rur uzyskane dzięki kawernomierzowi 16-ramiennemu [26] .....	27
Rysunek 17 Paląca się platforma wiertnicza Deepwater Horizon 22.04.2010 o godzinie 14:51 [30] .....	28
Rysunek 18 Zdjęcia satelitarne - wyciek ropy naftowej w wyniku zatonięcia platformy Deepwater Horizon widziany z orbity ziemskiej, 24 maja 2010 [31] .....	29
Rysunek 19 Zasięg wycieku ze złoża Macondo [32] .....	30
Rysunek 20 Planowane rozmieszczenie płynów podczas operacji cementowania [35] .....	31
Rysunek 21 Wizualizacja zasięgu występowania mieszanek wybuchowych o 21:46 - Deepwater Horizon [36] .....	33
Rysunek 22 Wykresy rejestrowanych pomiarów ciśnienia, natężenia przepływu i zapełnienia zbiornika na platformie Deepwater Horizon [34] .....	34
Rysunek 23 Wydarzenia poprzedzające zatonięcie platformy - oś czasu [34] .....	35
Rysunek 24 Wypływ z odwiertu na podstawie analizy danych [34] .....	35
Rysunek 25 Analiza sforsowanych barier poprzedzających wyciek [34] .....	36
Rysunek 26 Schemat centralizatora zamieszczony w zgłoszeniu patentowym US [51] .....	38
Rysunek 27 Charakter przepływu w przestrzeni pierścieniowej [56] .....	40
Rysunek 28 Proces wypierania cieczy w ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej a) bez rotacji wewnętrznej rury, b) z rotacją wewnętrznej rury wynoszącą 10 obrotów na minutę, c) z rotacją wewnętrznej rury wynoszącą 20 obrotów na minutę [57] .....	41
Rysunek 29 Efekt rotacji wewnętrznej rury na proces wypierania .....	42
Rysunek 30 Tworzenie się kieszeni płuczkowych w wąskich rejonach ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej .....	42
Rysunek 31 Wizualizacja przykładowego rozkładu prędkości w ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej, począwszy od lewej 25%, 50% i 75% [58] .....	43
Rysunek 32 Ogólna klasyfikacja płynów nienewtonowskich .....	43
Rysunek 33 Zobrazowanie przepływu laminarnego i turbulentnego w przestrzeni pierścieniowej [62] .....	44

Rysunek 34 Wizualizacja profilu prędkości cieczy wypierającej w przestrzeni pierścieniowej dla różnych stopni ecentryczności [65] .....	45
Rysunek 35 Schemat występowania szczelinowania tłokowego w wyniku ruchu kolumny rur ....	45
Rysunek 36 Agregaty szczelinujące [66] .....	46
Rysunek 37 Dwa przykładowe rozstawy czujników typu patch array podczas operacji szczelinowania hydraulicznego [67] .....	46
Rysunek 38 Wyniki pomiarów otworowych: litologia – lewa strona, jakość zacementowania - prawa strona [68] .....	47
Rysunek 39 Nieregularna przestrzeń pierścieniowa wywołana spiralnym ruchem wiertła w miękkiej formacji skalnej [68].....	48
Rysunek 40 Schemat procesu wypierania cieczy [28] .....	52
Rysunek 41 Schemat stanowiska badawczego.....	54
Rysunek 42 Koncentryczna przestrzeń pierścieniowa.....	56
Rysunek 43 Wizualizacja przekrojów poprzecznych przestrzeni pierścieniowych o ecentryczności odpowiednio od lewej strony 25%, 50% i 75%.....	56
Rysunek 44 Wizualizacja budowy i umieszczenia jednego z typów centralizatorów obecnie stosowanego w przemyśle wydobywczym [73] .....	57
Rysunek 45 Przestrzeń pierścieniowa ze zwężeniem, począwszy od lewej strony 25%, 50% i 75% .....	58
Rysunek 46 Obrazowanie wyniku badania kawernomierzem (prawa strona) z zestawieniem warstw skalnych (lewa strona) [74].....	59
Rysunek 47 Struktura montmorylonitu [76] .....	59
Rysunek 48 Częściowe zamknięcie przestrzeni pierścieniowej, począwszy od lewej strony 50%, 75% i 90% .....	60
Rysunek 49 Wizualizacja modelu przeszkody przepływu zamykającej prześwit w 75% .....	60
Rysunek 50 Urządzenie do oczyszczania ścian odwiertu z amerykańskiego zgłoszenia patentowego z 1969 [77].....	61
Rysunek 51 Zdjęcie stanowiska badawczego obrazujące rozstaw konduktometrów (sond SI 3013) na stanowisku badawczym .....	62
Rysunek 52 Przypisane numery dla kanałów czujników przewodności .....	63
Rysunek 53 Widok boczny sondy SI 3013 [78] .....	63
Rysunek 54 Przetwornik przewodności c3630 firmy B&C [78] .....	63
Rysunek 55 Skalibrowane przetworniki przewodności elektrycznej.....	64
Rysunek 56 Schemat działania przepływomierza elektromagnetycznego [79] .....	65
Rysunek 57 Wartość maksymalnego błędów wskazań przepływomierza w zależności od prędkości liniowej [79].....	66
Rysunek 58 Wizualizacja stanowiska badawczego do pomiaru stopnia wyparcia cieczy wypieranej .....	66
Rysunek 59 Zbudowane stanowisko badawcze .....	67
Rysunek 60 Wizualizacja przekroju poprzecznego komory wylotowej.....	68
Rysunek 61 Rysunki złożeniowe wybranych elementów ze stanowiska badawczego.....	69
Rysunek 62 Wyfrezowany główny element komory odprowadzającej.....	69
Rysunek 63 Pochylenie osi stanowiska o 30° .....	70
Rysunek 64 Zdjęcie stanowiska badawczego z widocznymi systemami ruchu obrotowego i posuwisto-zwrotnego.....	71

Rysunek 65 Wiertnia z widocznym systemem bloczkowym umożliwiającym zapuszczanie i wyciąganie kolumny rur .....	72
Rysunek 66 Uzyskany ruch posuwisto-zwrotny na stanowisku .....	72
Rysunek 67 Schemat budowy reometru Brookfield R/S–CPS+ [81] .....	74
Rysunek 68 Zależność szybkości ścinania od naprężenia stycznego w $T=25^{\circ}\text{C}$ [81].....	75
Rysunek 69 Zdjęcie aglomeratów cząsteczek stałych po przeprowadzonym pomiarze [81].....	75
Rysunek 70 Zarejestrowany sygnał czterech pierwszych czujników przewodności podczas testów stanowiska.....	78
Rysunek 71 Uśredniony zapis wskazań czujników przewodności w domenie czasu .....	79
Rysunek 72 Przetworzony uśredniony zapis z 4 czujników przewodności.....	80
Rysunek 73 Procedura obróbki danych z badań Deawwanich z 2013, I - zapis przewodności, II – bezwzględna zmiana przewodności, III – skuteczność wyparcia [28] .....	81
Rysunek 74 Wizualizacja procesu wypierania cieczy dla koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej (lewa kolumna), a przestrzeni pierścieniowej charakteryzującej się 50% stopniem ecentryczności [28] .....	82
Rysunek 75 Proces wypierania cieczy w przestrzeni koncentrycznej, ciecz I wypiera ciecz numer III, 2l/s .....	83
Rysunek 76 Skuteczność wyparcia względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – przestrzeń koncentryczna, III/I, bez obrotu wewnętrznej kolumny, bez pochylenia osi, uśrednione wskazanie czujników dolnego poziomu .....	84
Rysunek 77 Skuteczność wyparcia cieczy względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – przestrzeń koncentryczna, III/I, bez obrotu wewnętrznej kolumny, bez pochylenia osi, sondy o numerach 1 i 3 .....	84
Rysunek 78 Skuteczność wyparcia względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – przestrzeń koncentryczna, bez obrotu wewnętrznej kolumny, bez pochylenia osi porównanie wyników dla scenariuszy testów nr 5 i 6.....	86
Rysunek 79 Skuteczność wyparcia cieczy względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – przestrzeń koncentryczna, III/I, bez obrotu wewnętrznej kolumny, pochylenie osi $45^{\circ}$ , sondy o numerach 6 i 8 .....	87
Rysunek 80 Skuteczność wyparcia cieczy względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – przestrzeń koncentryczna, pochylenie osi $30^{\circ}$ , porównanie wyników dla scenariuszy testów 7 i 10.....	88
Rysunek 81 Porównanie wyników uśrednionych i wskazań czujników o najniższej wartości dla scenariusza testu numer 1 (brak ruchu posuwisto-zwrotnego), 13 (ruch o częstotliwości 0,2Hz) i 14 (ruch o częstotliwości 0,4Hz) .....	89
Rysunek 82 Porównanie najniższych wskazań czujników dla scenariuszy testów nr 22, 24 i 25 ...	90
Rysunek 83 Proces wypierania cieczy w przestrzeni pierścieniowej o stopniu ecentryczności 50% [28] .....	91
Rysunek 84 Skuteczność wyparcia cieczy względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – bez obrotu wewnętrznej kolumny, bez pochylenia osi, porównanie wyników dla scenariuszy testów nr 26, 27 i 28 .....	92
Rysunek 85 Skuteczność wyparcia względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – para cieczy III/I, bez obrotu wewnętrznej kolumny, bez pochylenia osi, sondy o numerach 5 i 7, scenariusz testu nr 28.....	93

Rysunek 86 Porównanie wyników uśrednionych i wskazań czujników o najniższej wartości dla scenariuszy testów nr 42, 43, 44 i 45 .....	95
Rysunek 87 Porównanie wyników uśrednionych i wskazań czujników o najniższej wartości dla scenariuszy testów nr 49, 50 i 51 .....	97
Rysunek 88 Porównanie stopnia wyparcia dla scenariuszy testu nr 5 i 51 z zaznaczonymi czasami dojścia do stabilizacji, w obu scenariuszach pochylono oś stanowiska o 30° .....	97
Rysunek 89 Wyniki symulacji procesu wypierania cieczy dla 0,5s; 1s; 1,5s; 2s; 4s - częściowe zamknięcie przestrzeni pierścieniowej wynoszące 50% prześwitu [58] .....	98
Rysunek 90 Porównanie wyników uśrednionych i wskazań czujników o najniższej wartości dla scenariuszy testu nr 58, 59 i 60 .....	99
Rysunek 91 Porównanie różnic wskazań skuteczności wyparcia między poziomami dla scenariuszy testu nr 28, 64 i 56 .....	100
Rysunek 92 Widoczna kieszeń cieczy wypieranej przy ścianie zewnętrznej rury, scenariusz testu nr 62.....	101
Rysunek 93 Schemat działania kawernomierza [82] .....	102
Rysunek 94 Schemat pomiaru średnicy otworu kawernomierzem czteroramiennym [84].....	102
Rysunek 95 Schemat pomiaru CBL [84].....	103
Rysunek 96 Wyniki testu na płytkim otworze badawczym - kawernomierz + wyniki CBL [58] ...	105
Rysunek 97 Wyniki pomiaru średnicy otworu kawernomierzem, 4 kolumny wskazań wynikają z zastosowania kawernomierza 8 ramiennego .....	106
Rysunek 98 Narzędzie otworowe typu reamer shoe [85] .....	107
Rysunek 99 Wyniki pomiaru kawernomierzem w przedziale 2550-3150m .....	108
Rysunek 100 Wyniki stanu zacementowania, od lewej - głębokość, mapa amplitudy, znormalizowana mapa amplitudy, mapa związania, mapa obecności cementu, 2460-2730m ...	109
Rysunek 101 Wyniki stanu zacementowania, od lewej - głębokość, mapa amplitudy, znormalizowana mapa amplitudy, mapa związania, mapa obecności cementu, 2890-3190m ...	110
Rysunek 102 Wizualizacja opracowanego buta cementacyjnego i gotowe urządzenie podczas testów na odwiercie głębokim .....	111
Rysunek 103 Rozdrobnione zwierciny materiału skalnego w wyniku pracy urządzenia.....	112
Rysunek 104 Schemat proponowanych zmian w stanowisku badawczym służącym do analizy procesu wypierania cieczy w przestrzeni pierścieniowej.....	115
Rysunek 105 Wizualizacja wpływu surfaktantów na wypieranie płuczek olejowych [88] .....	116

## Lista Tabel

Tabela 1 Kroki milowe w zrozumieniu przepływu jednofazowego w przestrzeni pierścieniowej	37
Tabela 2 Skład analizowanych cieczy .....	73
Tabela 3 Wyniki stopnia wyparcia cieczy dla koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej .....	85
Tabela 4 Wyniki stopnia wyparcia cieczy dla ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej .....	92
Tabela 5 Wyniki stopnia wyparcia cieczy dla przestrzeni pierścieniowej z miejscowym zwężeniem .....	96
Tabela 6 Wyniki stopnia wyparcia cieczy dla przestrzeni pierścieniowej z częściowym zamknięciem prześwitu .....	98

## Podziękowania

Przede wszystkim chciałbym wyrazić dogłębną wdzięczność mojemu promotorowi dr hab. inż. Markowi Szkodo, prof. nadzw. PG za przekazaną wiedzę oraz jego wsparcie podczas realizacji tezy.

Chciałbym również wyrazić moją wdzięczność firmie PGNiG S.A. i Geofizyka Toruń S.A. za współpracę i udostępnienie kluczowych danych.

Mam przyjemność podziękować moim kolegom Michałowi Antoszkiewiczowi, Mateuszowi Kmiecowskiemu, Jackowi Łubińskiemu oraz Łukaszowi Bolewskiemu za olbrzymi wkład w stworzenie stanowiska badawczego z rozdziału 4, oraz podziękować ostatniemu za współpracę podczas testów polowych. Bez ich wiedzy, pracy i poświęcenia ta rozprawa nie mogłaby powstać w obecnej formie.

Ponad wszystko chciałbym wyrazić swoją wdzięczność Narodowemu Centrum Badań i Rozwoju za współfinansowanie grantu o akronimie PPPI, który umożliwił realizację badań otworowych i laboratoryjnych.

Na koniec chciałbym podziękować firmie Cemet Ltd. Sp. z o.o. za współpracę przy realizacji projektu badawczego PPPI.



## Dedykacja

Chciałbym zadedykować tę tezę mojej rodzinie, zwłaszcza żonie Kasi za wsparcie i bezwarunkową miłość oraz synowi Adasiowi za wnoszenie w moje życie masy radości każdego dnia.

## Streszczenie w języku polskim

Rozprawa przedstawia analizę wpływu ruchu kolumny rur stosowanego w wiertnictwie oraz miejscowych zmian geometrii przestrzeni pierścieniowej na skuteczność procesu wypierania się cieczy. Jest to pierwsze badanie w otwartej literaturze omawiające te czynniki, w którym opisano wyniki eksperymentów na dedykowanym stanowisku badawczym.

W pracy omówiony został wpływ węglowodorów na współczesną cywilizację, jak również wpływ skuteczności procesu wypierania cieczy wiertniczych na powodzenie całej operacji ich pozyskiwania.

W dalszej części omówione zostały kroki milowe w zrozumieniu procesu wypierania się cieczy wiertniczych jak i podstawowe zależności matematyczne definiujące ruch cząsteczek płynu.

W rozdziale 3 postawione zostały cztery tezy nawiązujące do tematu rozprawy, które w rozdziale 4 zostały potwierdzone opisanymi wynikami eksperymentalnymi. Udowodniono:

- zwiększenie wydajności wypierania cieczy z przestrzeni pierścieniowej przy implementacji ruchu posuwisto-zwrotnego,
- zwiększenie wydajności procesu przy implementacji ruchu obrotowego,
- dalsze zwiększenie wydajności procesu przy implementacji ruchu posuwisto-zwrotnego i obrotowego,
- zmniejszenie wydajności procesu w sąsiedztwie zwężeń otworu.

Dodatkowo, negatywny wpływ zwężeń został potwierdzony analizą wyników płytkich otworów eksperymentalnych jak i otworów komercyjnych przedstawioną w rozdziale 5.

## Streszczenie w języku angielskim

The dissertation presents the influence of casing column movement and local changes in the annuli on the drilling fluid displacement effectiveness. This is the first study in open literature that discusses these factors based on the test rig experimental results.

Furthermore, the thesis discusses impact of the hydrocarbons on modern civilization, as well as impact of the drilling fluid displacement process effectiveness on the entire extraction operation success.

The following section discusses milestones in the drilling fluids displacement understanding as well as the basic mathematical relationships that define movement of the fluid molecules.

Chapter 3 presents four thesis related to the dissertation topic, which were confirmed in Chapter 4 by the described experimental results. It has been proven that there is:

- increase in the fluid displacement efficiency in the annuli when implementing a reciprocating movement,
- increase in the process efficiency when implementing rotary motion,
- further increase in the process efficiency when simultaneously implementing reciprocating and rotary motion,
- reduction of the process efficiency in the vicinity of the annuli stenosis.

Additionally, the negative impact of the stenosis has been confirmed by the analysis of the experimental and commercial wells results, presented in Chapter 5.

## Lista symboli, skrótów i indeksów

ERD - wydłużony zasięg wiercenia (ang. extended reach drilling)  
HPHT - wysokociśnieniowe i wysokotemperaturowe wiercenia (ang. high-pressure and high-temperature drilling)  
BOP - zabezpieczenie przeciwybuchowe (ang. blow-up preventer)  
psi – funt na cal kwadratowy  
d - udział procentowy  
 $\rho$  - gęstość,  $\text{kg/m}^3$ ;  
u - prędkość wypadkowa,  $\text{m/s}$ ;  
 $u_r$  - prędkość w kierunku promieniowym,  $\text{m/s}$ ;  
 $u_\theta$  - prędkość w kierunku stycznym,  $\text{m/s}$ ;  
 $u_z$  - prędkość w kierunku osiowym,  $\text{m/s}$ ;  
 $\omega$  - przepływ styczny,  $1/\text{s}$ ;  
r - promień, m;  
t - czas, s;  
r (indeks) - kierunek promieniowy, współrzędne cylindryczne  
 $\theta$  (indeks) - kierunek styczny, współrzędne cylindryczne  
z (indeks) - kierunek osiowy, współrzędne cylindryczne  
 $\tau_{\theta\theta}, \tau_{\theta z}, \tau_{\theta r}, \tau_{rz}$  - składowe kierunkowe naprężenia ścinającego,  $\text{N/m}^2$ ;  
 $F_r, F_\theta, F_z$  - składowe kierunkowe siły ciężkości, N;  
g - przyspieszenie ziemskie,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  
 $\tau_{rr}, \tau_{\theta\theta}, \tau_{\theta r}, \tau_{rz}$  - składowe kierunkowe naprężenia ścinającego,  $\text{N/m}^2$ ;  
 $\omega$  – prędkość styczna,  $\text{m/s}$ ;  
a, b, c – parametry geometryczne;  
 $\tau$  – naprężenie ścinające,  $\text{N/m}^2$ ;  
 $\dot{\gamma}$  - prędkość ścinania,  $1/\text{s}$ ;  
 $\dot{\gamma}_{rz}$  - element osiowy prędkości ścinania,  $1/\text{s}$ ;  
 $\dot{\gamma}_{r\theta}$  - element rotacyjny prędkości ścinania,  $1/\text{s}$ ;  
 $\Delta p$  - spadek ciśnienia spowodowany tarciem wewnętrznym płynu,  $\text{N/m}^2$ ;  
 $\rho_A$  - gęstość cieczy wypieranej,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $\rho_B$  - gęstość cieczy wypierającej,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $\tau_{yA}$  - granica płynięcia cieczy wypieranej,  $\text{N/m}^2$ ;  
i - szerokość szczeliny pierścieniowej, m;  
e - parametr stopnia ecentryczności;  
o – przesunięcie promieniowe między osiami odwiertu i kolumny rur, m;  
 $R_0$  – zewnętrzny promień (ściana odwiertu), m;  
 $R_i$  – wewnętrzny promień (zewnątrzna ściana kolumny rur), m;  
d - procentowa skuteczność wyparcia cieczy wypieranej;  
C - zarejestrowany sygnał przewodności mieszaniny obu cieczy;  
 $C_0$  - zarejestrowany sygnał przewodności dla cieczy wypieranej;  
 $C_1$  - zarejestrowany sygnał przewodności dla cieczy wypierającej;  
 $\alpha_p, \alpha_q$  - udział objętościowy dla frakcji wypieranej i ciągłej  
 $\partial V$  - całkowita objętość,  $\text{m}^3$ ;  
A - powierzchnia przekroju przestrzeni pierścieniowej,  $\text{m}^2$ ;  
 $\partial V$  - całkowita objętość przestrzeni pierścieniowej,  $\text{m}^3$ ;

$\partial V_p, \partial V_q$  - objętość fazy rozproszonej i ciągłej,  $m^3$ ;

$S_0$  - współczynnik przesunięcia osiowego

$d\omega$  - zmiana pozycji kątowej

$o$  - przesunięcie osiowe, m;

$C_0$  - zmierzony sygnał przewodności dla fazy pierwotnej

$C_1$  - zmierzony sygnał przewodności dla fazy wtórnej

$C$  - zarejestrowany sygnał przewodności

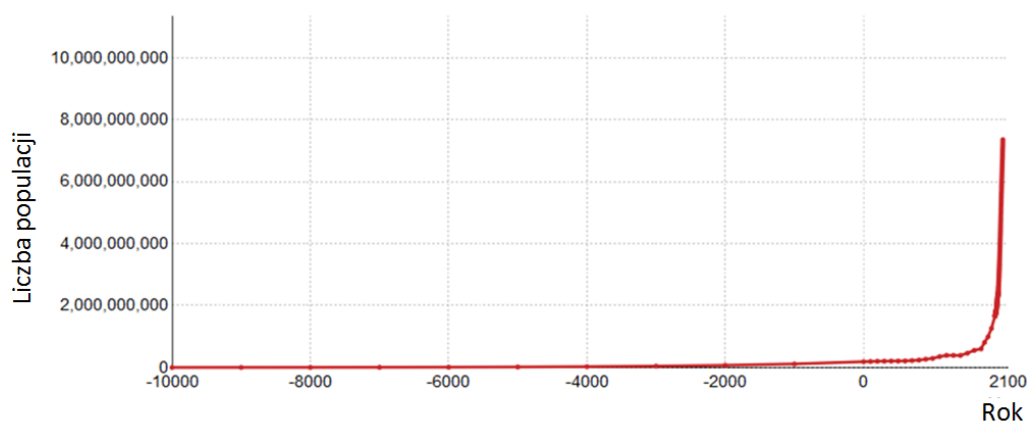
TVD - rzeczywista głębokość wertykalna (ang. true vertical depth), m;

## Rozdział 1 Wprowadzenie

### 1.1. Rola węglowodorów we współczesnym świecie

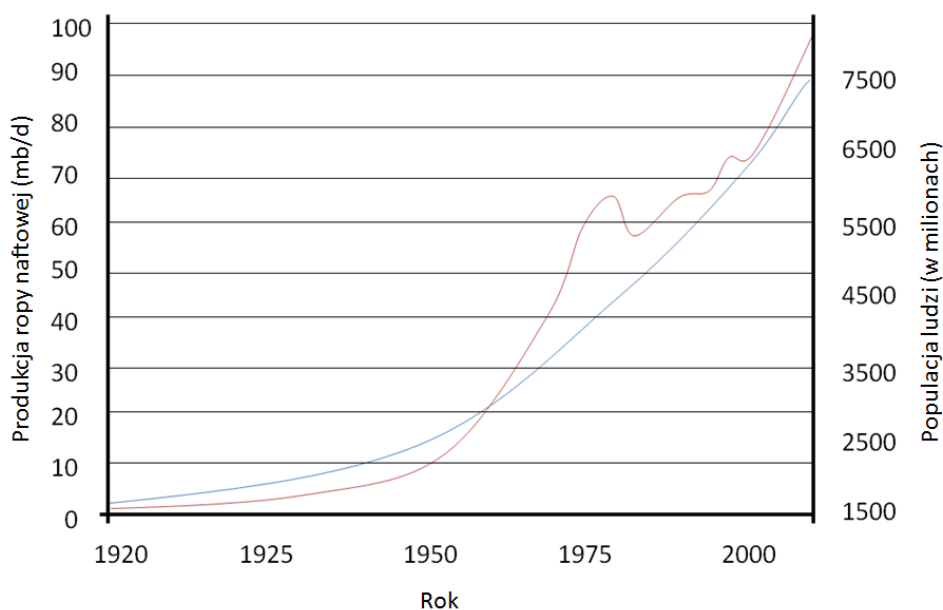
Każda populacja, aby przetrwać w długiej perspektywie czasu musi być zdolna do funkcjonowania z wykorzystaniem tylko surowców odnawialnych oraz bez niszczenia środowiska, w którym żyje. Populacja taka nie może generować więcej odpadów niż procesy naturalne są w stanie odtworzyć. W tej perspektywie populacja ludzka nigdy nie mogła za taką uchodzić.

W swojej książce "Naga Małpa" biolog Desmond Morris opisuje unikalny gatunek niemal bezwłosej małpy zaliczanej do rzędu naczelnych, która w procesie ewolucji stała się drapieżnikiem [1]. Ta pozornie niewielka zmiana w porównaniu do całej biosfery, w połączeniu z rozwiniętym mózgiem, przeciwstawnym kciukiem i oczami umieszczonymi równolegle na przedzie czaszki zapoczątkowała zmiany, które nie miały precedensu w historii planety. Po raz pierwszy to nie naturalne mechanizmy regulowały liczbę osobników i ich wpływ na otoczenie. Od początku pojawienia się tego gatunku, wraz z poszerzeniem się terytorium jego występowania, liczba osobników stopniowo rosła. Na przestrzeni wieków wynalazki takie jak: rolnictwo, narzędzia do polowania, koło, metoda odlewania brązu czy opanowanie irygacji prowadziły do zwiększania się maksymalnej liczby osobników mogących przetrwać na danym terytorium [1]. Wraz z końcem epoki wielkich odkryć geograficznych można przyjąć, iż terytorium te w przybliżeniu osiągnęło obecne jego rozmiary. Nie mniej jednak, do 1800 roku wzrost liczby osobników tego gatunku był stopniowy. Na początku XIX wieku populacja ludzka wynosiła 1 miliard osobników, aby w 1900 roku przyrost osiągnął charakter wykładniczy (Rysunek 1) [2].



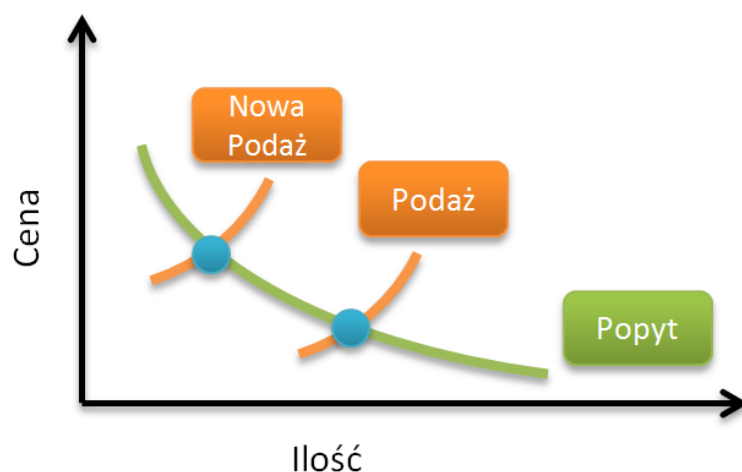
Rysunek 1 Wielkość populacji ludzkiej w ostatnich 12 000 lat [2]

Aby zrozumieć zmiany, które zaszły w tamtym czasie kluczowe jest zrozumienie, że przed Rewolucją Przemysłową, która rozpoczęła się w Wielkiej Brytanii w 1760 roku, niemal cała wykorzystywana przez ludzi energia powstawała w wyniku pracy ich mięśni. To niezwykle istotne, gdyż w zależności od realizowanego zadania, człowiek jest w stanie wytwarzać strumień energii rzędu 200 watów przez stosunkowo krótki okres czasu. Można przyjąć, iż wartość ta odpowiada obciążeniu organizmu podczas intensywnej jazdy rowerem [3] (dla porównania wartość 745.7 watów przyjęto jako jeden koń mechaniczny [4]). Oznacza to, iż aby osiągnąć ekwiwalent energetyczny spalania jednej baryłki ropy naftowej (159 litrów, 6.1 GJ [5]) człowiek musiałby jechać rowerem szybkim tempem bez żadnej przerwy przez niemal rok. To zestawienie pokazuje jakie możliwości stanęły przed nim otworem. Mniej ludzi było potrzebnych do prostych prac fizycznych jak na przykład praca na roli. Coraz większa część populacji mogła się edukować i specjalizować, co doprowadziło do rozwoju wielkoskalowej irygacji i mechanizacji. Co warto podkreślić, proces ten napędzał się samoistnie. Dzięki postępowi techniki i nauki możliwe było osiągnięcie kolejnych przełomów, jak na przykład: stworzenie wysokowydajnych odmian roślin, opanowanie irygacji o przemysłowych rozmiarach czy masowe wykorzystanie węglowodorów do produkcji nawozów. Tak rozpoczęła się Zielona Rewolucja, która podniosła możliwy maksymalny poziom ludzkiej populacji. Zasadnicze jest właśnie zrozumienie w jak dużym stopniu była ona możliwa dzięki wykorzystaniu węglowodorów kopalnych. Rysunek 2 przedstawia relację między dzienną produkcją ropy naftowej, a poziomem populacji ludzi od 1920 roku. Pomimo tego, iż minęło ponad 70 lat od czasu, w którym nasiliły się te zmiany, relacja ta jest nadal aktualna.



Rysunek 2 Produkcja ropy względem wielkości populacji ludzkiej  
 czerwona linia - produkcja ropy dziennie, niebieska linia - liczba ludności  
 wykres przygotowany bazując na danych z [2, 6]

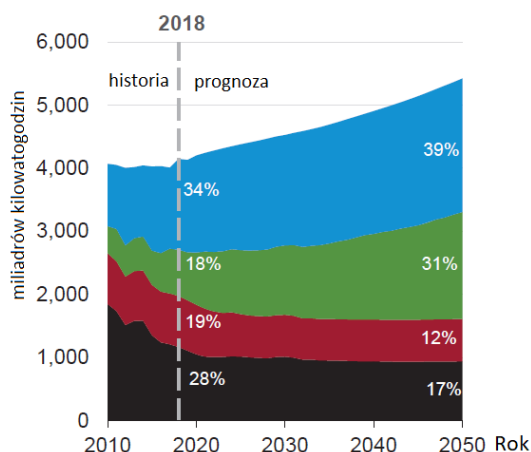
Spadek w produkcji ropy i gazu prowadzi do podwyższenia ich ceny, a w efekcie do podwyższenia cen żywności (Rysunek 3), ze względu na to, że węglowodory są niezbędne do masowej jej produkcji. W efekcie wyginie ta część populacji, która do tej pory operowała na granicy przetrwania. Dlatego też w świecie, w którym według WHO ponad 16 tysięcy dzieci ginie każdego dnia z powodu głodu i ubóstwa [7], optymalizacja produkcji ropy naftowej jest jednym z kluczowych wyzwań stojących przed cywilizacją.



Rysunek 3 Krzywe zależności popytu i podaży od ceny  
niebieskie punkty przedstawiają punkty równowagi

Pomimo tego, że we współczesnym świecie można odnieść wrażenie, iż energia elektryczna zastępuje spalanie paliw kopalnych i może być uważana za tzw. czystą energię, kluczowa jest analiza jak ta energia została wyprodukowana. Patrząc na udział sposobu produkcji energii elektrycznej na świecie widać, iż nie tylko spalanie gazu ziemnego odgrywa istotną w nim rolę, ale również, że udział ten będzie rósł w kolejnych latach (Rysunek 4). Energia elektryczna jest tak ekologiczna jak łańcuch produkcyjny wykorzystany do jej wytworzenia. Nie ogranicza się to do samego procesu spalania, gdzie gaz ziemny może być uznany za przyjazny środowisku, ale również do wszystkich procesów związanych z jego pozyskaniem magazynowaniem i transportem. W wielu przypadkach wytworzenie jednostki energii w wyniku spalania węglowodorów (szczególnie gazu ziemnego) może wygenerować mniej odpadów niż uzyskiwanych jest w wyniku procesów uznawanych za przyjazne środowisku, gdy weźmie się pod uwagę cały cykl funkcjonowania instalacji [8]. Ekologiczność takich instalacji może być dodatkowo analizowana pod kątem zmian krajobrazu lub jej wpływu na zoocenozę (zwierzęca część biotopu). W takiej perspektywie ekologiczność farm wiatrowych może być poddana w wątpliwość chociażby ze względu na szkodliwy wpływ spowodowany wysokim natężeniem dźwięku w ich bliskości [9].





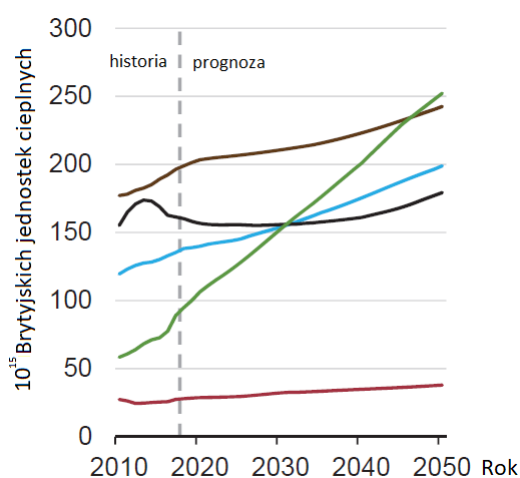
Rysunek 4 Produkcja energii elektrycznej w rozróżnieniu na sposób jej otrzymywania [10]  
 kolor niebieski - gaz ziemny, zielony - energia odnawialna, bordowy - energia jądrowa,  
 czarny – węgiel

Warto zwrócić uwagę na sposób produkcji energii odnawialnej. Farmy wiatrowe lub panele fotowoltaiczne mogą posłużyć za odpowiedni przykład. Biorąc pod uwagę proces produkcji, transportu, instalacji i ponad wszystko recyklingu, gdzie główną rolę odgrywają węglowodory [11], może się okazać, iż w części przypadków uzyskana w ten sposób energia odnawialna jest mniej *przyjazna środowisku* niż energia uzyskana ze spalania np. gazu ziemnego. Wynika to z faktu, że cały łańcuch produkcji pozostawił po sobie więcej szkodliwych produktów ubocznych. Nawet przy założeniu pominięcia etapu recyklingu, który z punktu długofalowej ochrony środowiska jest krytyczny, przy stopie zwrotu inwestycji energetycznej zawierającej się w granicach 1 do 4 lat i dwuletniej gwarancji instalacyjnej może okazać się, iż w wielu przypadkach inwestycja ta nie zwróci nawet zainwestowanej energii elektrycznej potrzebnej do wyprodukowania paneli fotowoltaicznych [12,13]. Innymi aspektami decydującym o ekologiczności takiej inwestycji są:

- miejsce montażu instalacji (położenie geograficzne, nachylenie dachu i jego azymut, brak występowania miejscowych zacienień),
- prawidłowo zaprojektowana instalacja,
- prawidłowa instalacja,
- prawidłowa eksploatacja (okresowe czyszczenie).

Dopiero przy spełnieniu tych wszystkich elementów można mówić o możliwości występowania ekologicznego aspektu takich instalacji. Wciąż są one jednak wyjątkowo narażone na zdarzenia pogodowe jak na przykład opady gradu, które mogą przekreślić ten czynnik, a które w przypadku generowania energii ze źródeł konwencjonalnych nie mają istotnego znaczenia.

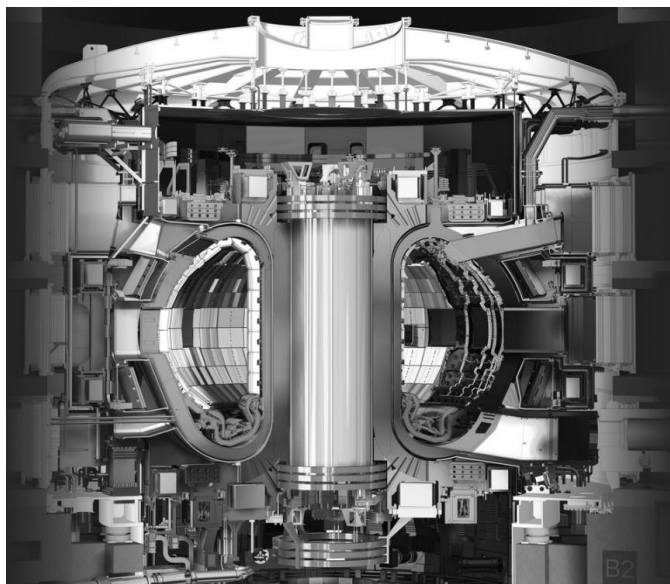
Udział węglowodorów w światowej konsumpcji energii staje się tym bardziej wyraźny jeśli weźmie się pod uwagę całkowite zapotrzebowanie energetyczne (Rysunek 5). Pomimo, iż prognozy na następne 30 lat wskazują, iż źródła odnawialne będą najszybciej rosnącym źródłem energii to dopiero po 25 latach mają wyprzedzić ropę naftową i inne paliwa płynne jako główny składnik w światowej produkcji energii. Co więcej, pomimo dynamicznie rosnącego udziału źródeł odnawialnych wzrost ten odbywać się będzie głównie kosztem węgla i energii atomowej, których przyrost w przeliczeniu na brytyjskie jednostki ciepła będzie znikomy w porównaniu do przyrostu ilości energii uzyskiwanej z pozostałych źródeł. Zakłada się, że w 2050 roku udział węglowodorów będzie odpowiadał za połowę światowej produkcji energii.



Rysunek 5 Światowe zapotrzebowanie energetyczne ze względu na źródło energii [14]  
jasny brązowy – ropa naftowa i inne paliwa płynne, czarny – węgiel, niebieski – gaz ziemny,  
zielony – źródła odnawialne, czerwony – energia jądrowa

Obecnie jedynymi rozpoznawanymi postępowaniami w technice, które mogłyby w istotny sposób zmienić przewidywany udział rodzajów paliw w światowym zapotrzebowaniu energetycznym, wydają się być hydraty metanu oraz reaktory fuzyjne. Ilość energii zawarta w zidentyfikowanych złożach hydratów metanu (3000 TMC) co najmniej trzykrotnie przewyższa zidentyfikowane złoża gazu ziemnego w tym tzw. gazu łupkowego (odpowiednio 404 TMC dla złóż konwencjonalnych i 204-456 TCM dla złóż niekonwencjonalnych). Jednak za sprawą swoich właściwości, konsekwencje błędu przy eksploatacji złoża mają potencjał przyćmić wszystkie katastrofy w ludzkiej historii i z tego powodu, na obecną chwilę nie ma możliwości podania daty rozpoczęcia komercyjnej eksploatacji, choć testy polowe odbywają się regularnie [15]. Wynika to z faktu, iż podczas sublimacji  $1\text{m}^3$  hydratów metanu uwalniane jest aż  $164\text{m}^3$  gazu. Przemiana ta jest egzotermiczna i błąd podczas wydobycia może aktywować całe złożo znajdujące się setki metrów pod powierzchnią wody o objętości często liczonej w kilometrach sześciennych. W

przypadku reaktorów fuzyjnych pierwsze uruchomienie komercyjnej operacji przewidywane jest najwcześniej w 2035 roku (Rysunek 6), a zgodnie z optymistycznym scenariuszem minie co najmniej 10 kolejnych lat zanim udział w produkcji energii tą drogą będzie zauważalny w światowym popycie [16].



Rysunek 6 Wizualizacja eksperymentalnego reaktora fuzyjnego ITER Tokamak [17]

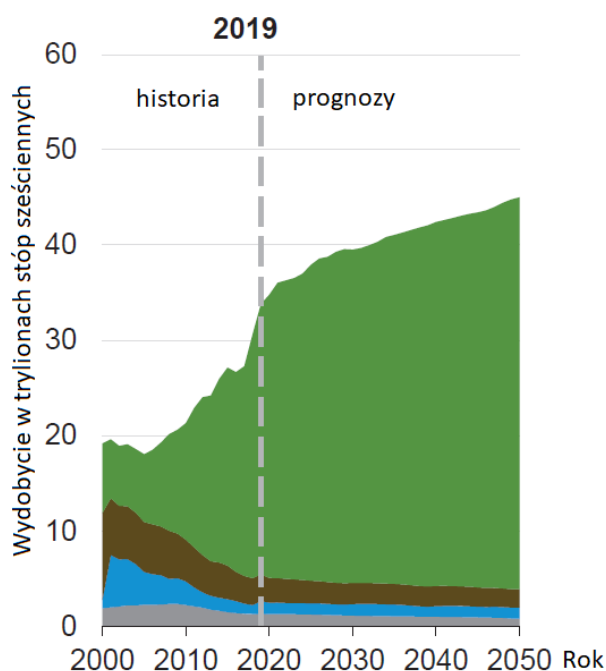
Dane te pokazują jasno, iż wobec rosnącego zapotrzebowania energetycznego i uzależnienia od węglowodorów kopalnych, optymalizacja procesu ich pozyskania jest kluczowa dla rozwoju cywilizacyjnego. Co więcej, choćby niesprostanie ciągle rosnącego popytu przez podaż będzie oznaczało pauperyzację społeczeństwa, co najbardziej odczują osoby znajdujące się w skrajnym ubóstwie. Pomimo, że zjawisko to dotyczy całego globu, to jednak jego efekty są szczególnie widoczne w najbiedniejszych jego rejonach.

## **1.2. Etap cementowania otworu wiertniczego w procesie wydobycia węglowodorów**

Zwiększające się zapotrzebowanie na węglowodory zmusza do stałego poszukiwania nowych źródeł. To z kolei oznacza wiercenie głębiej, w znacznie bardziej wymagających warunkach czy nawet w celu eksploatacji nowych typów źródeł. Dobrym przykładem jest tu gaz łupkowy czy gaz zamknięty (ang. tight gas). Uzyskanie komercyjnego przepływu węglowodorów z tych źródeł zajęło wiele dekad i wymagało dokonania aż dwóch przełomów: opanowania technologii wiercenia

horyzontalnego, jak również technologii szczelinowania hydraulicznego. Wyzwania techniczne jak i stopień trudności ich implementacji wstrzymujące wykorzystanie tego typu pułapek geologicznych były na tyle istotne, iż początkowo analiza ich zagospodarowania ograniczała się do rozważań teoretycznych stanowiących przez dziesiątki lat jedynie ciekawostkę na pograniczu świata nauki i przemysłu. Obecnie zdecydowana większość gazu eksploatowanego w Stanach Zjednoczonych Ameryki pochodzi właśnie ze źródeł niekonwencjonalnych (Rysunek 7). Co ciekawe, wykres produkcji ropy w USA ma tożsamy charakter pomimo, że początkowe jej pozyskanie wcale nie było brane pod uwagę w przypadku tych złóż. Nawet pobieżna analiza poniższego wykresu pozwala na zobrazowanie jak istotny wpływ na rozwój Stanów Zjednoczonych jak i całego świata, miały dokonane przełomy technologiczne. Warto zaznaczyć, iż USA są obecnie największym producentem gazu i jednym z największych producentów ropy naftowej.

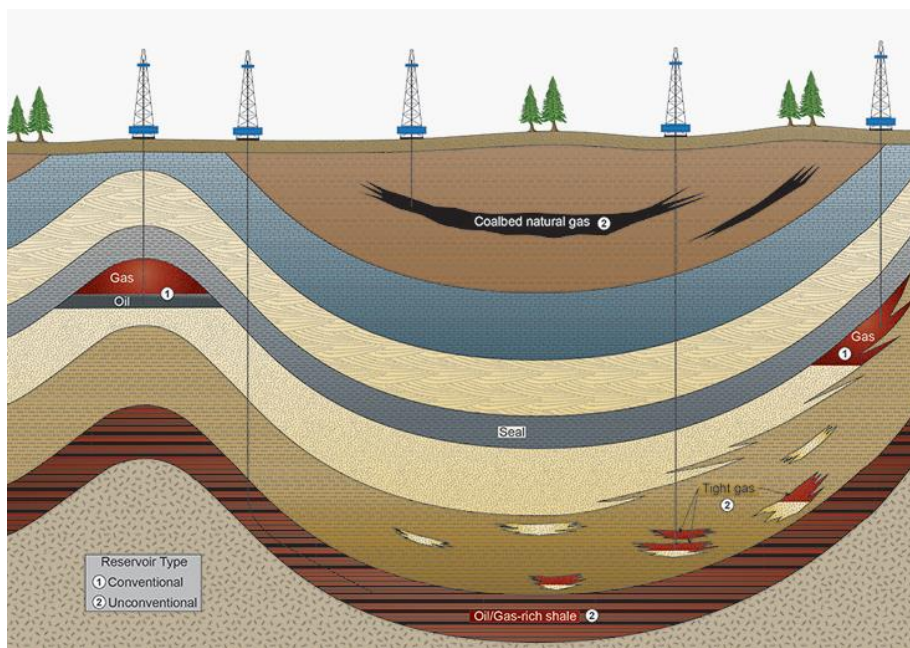
Idąc dalej, można postawić pytanie jak innym środowiskiem dla człowieka byłaby Ziemia, gdyby popyt na węglowodory rocznie przekraczał podaż tych surowców. Na podstawie poprzedniego punktu można założyć, iż byłaby mniej zaludniona, jako że cena ropy byłaby zdecydowanie większa, a co za tym idzie, większa byłaby również cena żywności.



Rysunek 7 Udział typów złóż w wydobyciu gazu w USA [18]  
kolor zielony – źródła niekonwencjonalne (gaz łupkowy i gaz zamknięty), brązowy- źródła konwencjonalne, niebieski – źródła morskie, szary – inne

Poniższy rysunek pokazuje jak bardzo różnią się od siebie poszczególne typy złóż węglowodorów (Rysunek 8). Poszukiwania nowych złóż przestały ograniczać się do lokalizowania

tradycyjnych pułapek geologicznych, a w przypadku złóż niekonwencjonalnych polegają na wykrywaniu całej warstwy geologicznej gdzie węglowodory rozłożone są w sposób niemal równomierny. Ilość uzyskanego surowca przestała zatem sprowadzać się tylko do skuteczności w odnajdywaniu kolejnych zbiorników podziemnych, a raczej do precyzji ich przewiercenia, efektywności szczelinowania i przede wszystkim do objętości warstwy skalnej w otoczeniu odcinka horyzontalnego odwiertu. Oznacza to jedno: im większą część złoża niekonwencjonalnego planuje się eksploatować, tym więcej należy wywiercić w nim odwiertów wydobywczych.



Rysunek 8 Typy złóż węglowodorów [19]

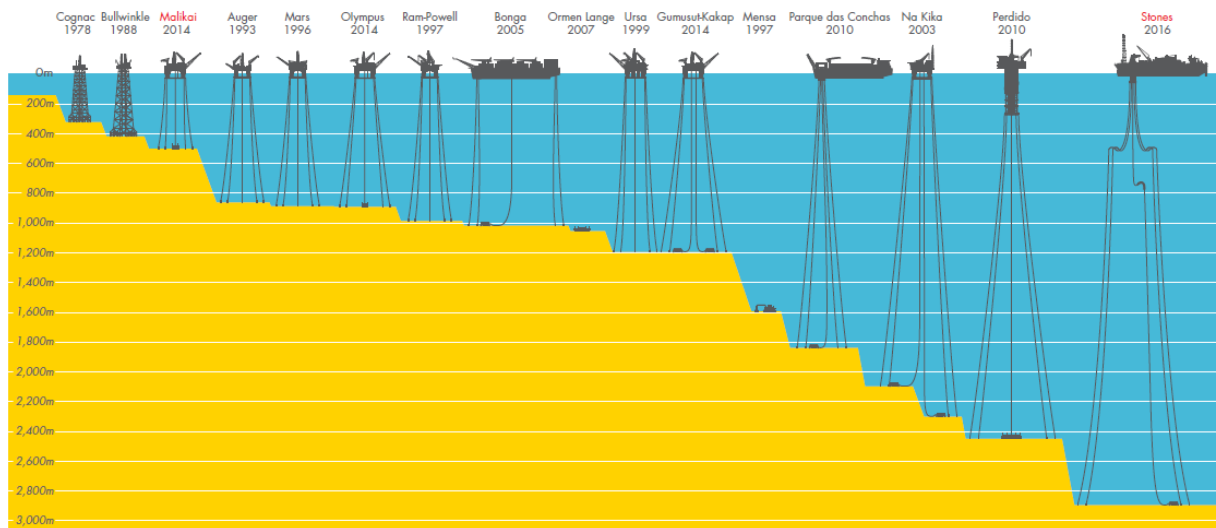
kolor bordowo-czarny – złoża gazu i ropy łupkowej, ciemno bordowy – gaz zamknięty, czarny – gaz w pokładach węgla, 1- złoża konwencjonalne, 2 – złoża niekonwencjonalne

Rysunek 9 obrazuje na ile należy zintensyfikować prace wydobywcze, aby przy obecnym stanie techniki komercyjnej eksploatować złoża niekonwencjonalne. Wzrost ilości odwiertów pociąga za sobą również wzrost prawdopodobieństwa niepowodzenia operacji co może prowadzić do skażenia środowiska.



Rysunek 9 Eksploatowane złożo Yates w USA [20]  
jasne plamy to widoczny wyrównany teren gdzie znajdują się głowice przeważnie dla 6 odwiertów

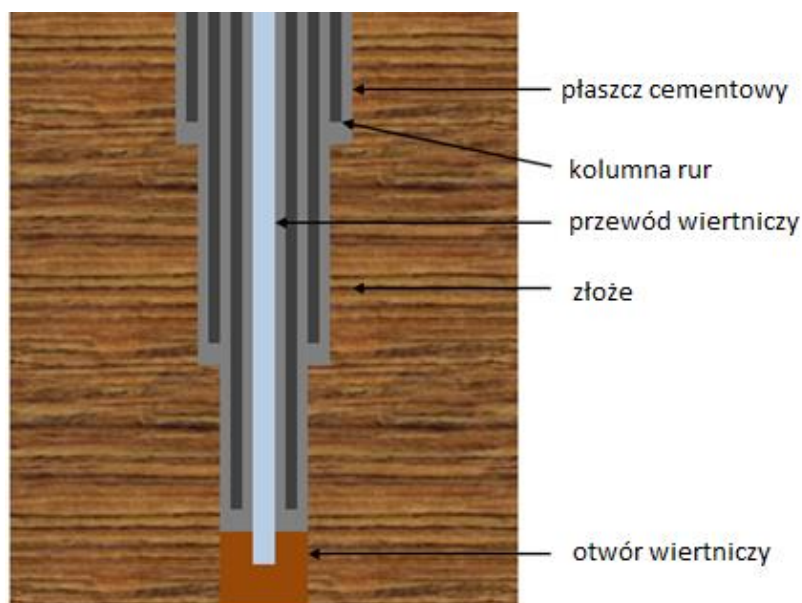
Ewolucja w technice wiertniczej jest najlepiej widoczna w kamieniach milowych morskiej eksploatacji (Rysunek 10). Od zasięgu do dna wynoszącym zaledwie 3m w 1891 używając drewnianych wiertnic, do niemal 3km w 2016 z użyciem statku wiertniczego [21]. Znów jednak, rozwój technologii nie jest wolny od wzrostu ryzyka. Wiele z prowadzonych odwiertów ma charakter eksperymentalny gdy np. bada się nowe złożo, testuje się innowacyjną technikę lub materiały w danych warunkach. Skale konsekwencji wypadku przy tego typu operacji pokazała katastrofa związana z wybuchem i zatonięciem platformy naftowej Deepwater Horizon 2010, która zostanie omówiona w kolejnym rozdziale.



Rysunek 10 Kamienie milowe w eksploatacji morskiej węglowodorów [22]



Pomimo tak wyraźnego rozwoju technologicznego podstawowe zasady przeprowadzania operacji pozyskiwania ropy i gazu pozostały niezmienione od ponad wieku. Dochodzenie do złoża polega na powtarzających się operacjach wiercenia, zapuszczania kolumny rur oraz cementowania powstałej przestrzeni pierścieniowej między zewnętrzną powierzchnią rur, a ścianą odwiertu (Rysunek 11).



Rysunek 11 Schemat otworu wiertniczego

Ostatni etap cyklu jest kluczowy dla całej operacji. Główne zadania wytwarzanego płaszcza cementowego (Rysunek 12) można scharakteryzować w następujący sposób:

- izolacja stref zbiornikowych,
- stabilizacja odwiertu oraz przenoszenie części naprężeń,
- ochrona przed korozją.

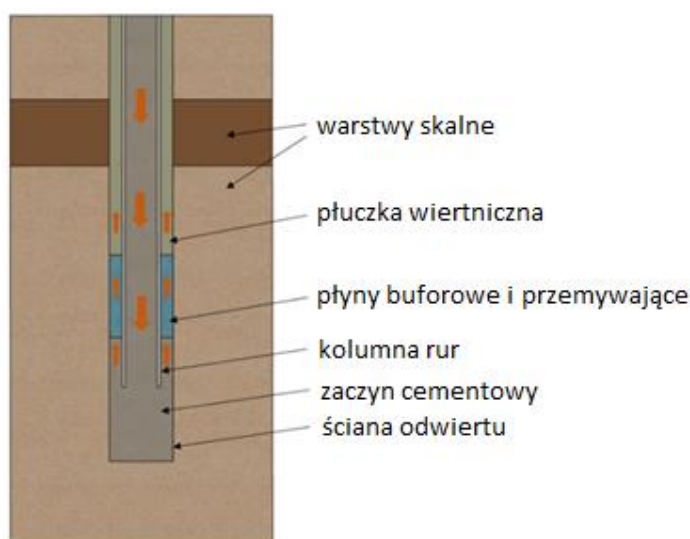


Rysunek 12 Wizualizacja płaszcza cementowego [23]

W celu wytworzenia poprawnego płaszcza cementowego wiele trudności technicznych musi zostać rozwiązanych już na etapie projektowania odwiertu. Główna uwaga poświęcana jest kwestiom reologii cieczy otworowych. Po etapie wiercenia odwiert wypełniony jest płuczką wiertniczą. Jest ona stosowana w celu:

- usuwania zwiercin podczas etapu wiercenia,
- kontrolowania ciśnienia złożowego,
- utrzymywania stabilności ścian odwiertu,
- chłodzenia i smarowania narzędzi wiertniczych,
- przekazywania energii do wiertła i innych narzędzi otworowych.

Z tego powodu skład płuczki wiertniczej jest krytyczny dla powodzenia całej operacji pozyskiwania węglowodorów i musi być kontrolowany przez wszystkie jej etapy. Proces wydobycia gazu i ropy naftowej rozpoczyna się miesiące przed rozpoczęciem wiercenia i wymaga ustalenia szeregu parametrów takich jak: schemat otworu, spodziewane ciśnienie złożowe, rodzaje przewiercanych warstw skalnych, wykorzystywany sprzęt itp.. Na tej podstawie przygotowujemy skład płuczki, jak również pozostałych cieczy wiertniczych i zaczynu cementowego (Rysunek 13).



Rysunek 13 Schemat procesu cementowania otworu wiertniczego

Bez względu na wykorzystywaną technologię cementowania (przez przewód wiertniczy czy przez but cementacyjny) proces cementowania polega na stopniowym wypieraniu się tych trzech typów cieczy:

- płuczki wiertniczej,
- płynów buforowych i przemywających,
- zaczynu cementowego.

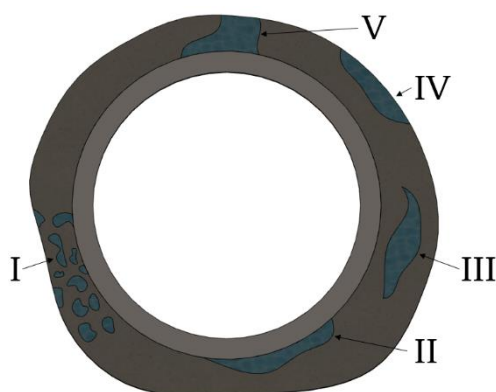


Skuteczność procesu cementowania decyduje o powodzeniu całej operacji wydobycia surowca. Efektem pożądanym jest sytuacja, w której zaczyn cementowy wypełnia całą przestrzeń pierścieniową. Tylko taka sytuacja jest w stanie zapewnić optymalny płaszcz cementowy, który powstanie w wyniku zastygania wprowadzonego zaczynu. Co istotne, sam proces wiązania cementu w warunkach otworowych jest niezwykle złożony. Jego dynamika zależy od ciśnienia i temperatury na danej głębokości, ale również od zastosowanych dodatków mogących przyspieszyć lub opóźnić czas rozpoczęcia wiązania. Przyjęto się, iż pożądane właściwości płaszcz ten uzyskuje dopiero po 28 dniach od cementowania [24]. Każdy odwiert, w zależności od głębokości, składa się z kilku poziomów, każdy o innej średnicy zapuszczanej kolumny rur. Pomimo, że kolejne etapy wiercenia można rozpocząć znacznie szybciej, te informacje dają jasny obraz, iż samo zagospodarowanie złoża, szczególnie niekonwencjonalnego, to wieloletni proces, a cały projekt to dla inwestora, w zależności od potencjału wydobywczego, nawet kilkadziesiąt lat. Dlatego też całą operację należy precyzyjnie planować, a ryzyko możliwie niwelować.

### **1.3. Ryzyko związane z niepowodzeniem operacji cementowania**

Głównym celem operacji cementowania jest całkowite wypełnienie objętości pierścieniowej przez zaczyn cementowy, który po związaniu utworzy płaszcz cementowy. Aby było to możliwe, pompowany przez agregat cementacyjny zaczyn cementowy musi wyprzeć wszystkie inne płyny otworowe. Kontakt zaczynu cementowego z płuczką jest wysoce niepożądany, gdyż na powierzchni styku tych dwóch faz dochodzi do żelowania płuczki wiertniczej. Tworzy się w ten sposób trudna do przetłoczenia masa, co skutkuje wzrostem ciśnienia tłoczenia. W najgorszym wypadku, wymagane do przetłoczenia ciśnienie może przekroczyć możliwości wykorzystywanego agregatu płuczkowego lub zacząć szczelinować ściany odwiertu. Widoczne jest to jako różnica pomiędzy objętościami tłoczonymi, a uzyskiwanymi z odwiertu. Pomimo braku osiągnięcia celu często w takich przypadkach przerywa się operacje cementowania, przeprowadza się kosztowne akcje naprawcze, a nawet podejmuje się decyzje o porzuceniu odcinka lub całego odwiertu [24]. Biorąc pod uwagę np. wyłącznie koszt wynajmu wiertni morskiej, który można szacować na poziomie 500 tysięcy dolarów za dobę, takie zdarzenie ma istotne znaczenie dla opłacalności całego projektu [25]. Pomimo, że wiertnie lądowe są wielokrotnie tańsze, to do utraconych kosztów w obu przypadkach należy doliczyć koszty materiału, szczególnie kolumn rur, czy wynagrodzenie pracowników i podwykonawców.

W rejonach gdzie płuczka wiertnicza czy ciecze buforowe i przemywające nie zostaną zastąpione przez zaczyn cementowy powstają kanały w płaszczu cementowym (Rysunek 14). Rysunek 14 przedstawia pięć typów niedoskonałości, które można obserwować w otworach wiertniczych. Typ pierwszy przedstawia sytuację, w której w zaczynie wytworzyły się drobne, nie połączone ze sobą kawerny. Ich potencjalna szkodliwość dla odwiertu jest ograniczona jeśli wytworzona w ten sposób struktura uniemożliwia migrację płynów złożowych i nie pozwala na rozpoczęcie procesu korozji kolumny okładzinowej czy wydobywczej. W zależności od objętości niewypartej płuczki i wysokości zaafektowanego odcinka płaszczu, problem migracji płynów złożowych może dotyczyć kanałów oznaczonych numerami II do V, przy czym ostatni rodzaj pozwala również na rozpoczęcie procesów korozji. Problem polega na tym, iż często kanały te wypełniają nawet kilkadziesiąt procent przekroju poprzecznego płaszczu i mogą ciągnąć się przez dziesiątki, a nawet setki metrów. W takich przypadkach uzyskanie pierwotnej izolacji strefy zbiornikowej widocznej na testach ciśnieniowych, może dać ekipie realizującej złudne poczucie bezpieczeństwa i doprowadzić do katastrofy w przypadku wytworzenia się bajpasu uzyskanego korka cementowego.

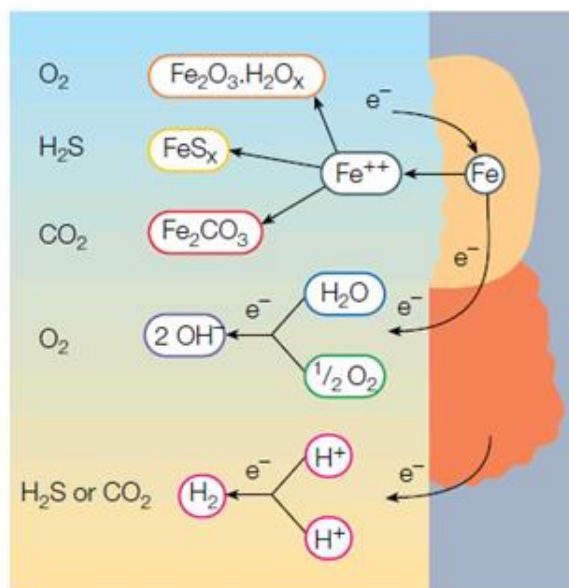


Rysunek 14 Rodzaje kanałów w płaszczu cementowym

Równie istotnym niebezpieczeństwem jest problem korozji kolumny rur (Rysunek 15). Proces ten jest tym bardziej dynamiczny ze względu na wymagające warunki pracy, do których zaliczyć można:

- temperatury dochodzące do 200°C,
- różnice potencjałów elektrycznych,
- obecność H<sub>2</sub>S lub CO<sub>2</sub>,
- wysokie ciśnienie otworowe wynikające z głębokości odwiertu i ciśnienia złożowego.

Już teraz problem korozji jest uznawany za jedno z największych wyzwań w przemyśle wiertniczym, a można zakładać, że jego rola w nadchodzących latach będzie ciągle rosła ze względu na wzrost liczby odwiertów czy intensyfikację eksploatacji złóż z wysokim stężeniem siarkowodoru. Tempo procesu niszczenia odcinka rur jest na tyle wysokie, że zdarzają się przypadki, w których już po 2 latach eksploatacji dochodziło do penetracji kolumny [26]. Szacuje się, że średnia roczna wartość szkód wywołanych korozją w przemyśle wydobycia węglowodorów to bilion dolarów [27].

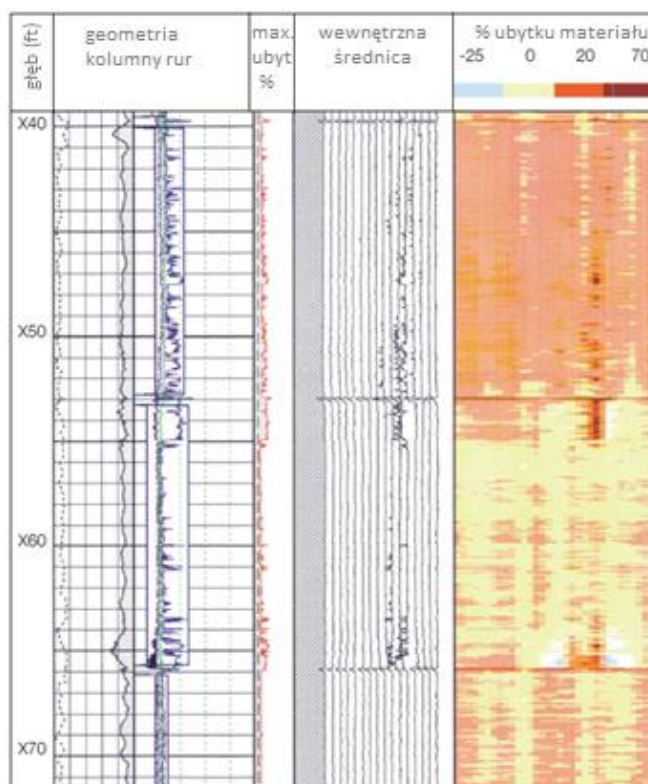


Rysunek 15 Schemat korozji kolumny rur [26]  
kolor szary- kolumna rur, żółty – anoda, pomarańczowy – katoda

Ze względu na charakter procesu, zniszczenie rury zazwyczaj przybiera punktowy, wżerowy charakter, umożliwiając płynowi złożowemu rozpoczęcie migracji (Rysunek 16). Po prawej stronie rysunku przedstawiony został procentowy ubytek materiału kolumny rur na jej całym obwodzie. Ciemnobrązowe rejony wskazują miejsca gdzie ubytek jest największy. Rozdzielczość sprzętu pomiarowego nie pozwoliła na zaobserwowanie, w którym dokładnie miejscu doszło do całkowitej penetracji kolumny rur, jednak widoczne są trzy rejony gdzie ubytek ten wynosi co najmniej 70%. Interesujące jest to, że wszystkie te miejsca są w jednej linii, na długości 6m co może świadczyć, iż podczas procesu cementowania wytworzył się kanał w zaczynie (typ V) umożliwiający rozpoczęcie procesu korozji.

Na samym początku proces ten jest trudny do zarejestrowania ze względu na niewielką średnicę otworu. Jest to możliwe w przypadku częstych badań kontrolnych kamerami termowizyjnymi. Wraz ze wzrostem prześwitu otworu, a co za tym idzie, ze wzrostem natężenia

niepożądanego przepływu, taka awaria staje się widoczna dla operatorów platformy wydobywczej. W najgorszym przypadku takie zdarzenie może doprowadzić do skażenia środowiska, w najlepszym do przeprowadzenia kosztownych operacji naprawczych i wielotygodniowego przestoju w produkcji.



Rysunek 16 Wyniki pomiarów ubytku grubości ściany kolumny rur uzyskane dzięki kawernomierzowi 16-ramiennemu [26]

Warto podkreślić, że proces korozji nie mógłby rozpocząć się w przypadku udanej operacji cementowania. Jednak sytuacja, w której niemal cała płuczka wiertnicza jest usunięta z przestrzeni pierścieniowej, a płaszcz cementowy szczelnie ją wypełnia, jest niezwykle trudna do zaobserwowania nawet podczas testów laboratoryjnych [28]. W praktyce wiertniczej często akceptuje się kilkudziesięciometrowe odcinki, gdzie wyniki wskazują brak związania płaszcza cementacyjnego z powierzchnią rury, jeśli tylko taka sekcja przejdzie próby ciśnieniowe. Może to oznaczać sytuację, w której kanał typu V zajmuje niemal cały przekrój poprzeczny przestrzeni pierścieniowej. Jest to możliwe w wyniku formowania się tzw. przepływu palcowego, gdzie zaczyn cementowy przepływa przez taki odcinek jedynie wąskim strumieniem, nie wypychając niemal w ogóle płuczki wiertniczej na tym odcinku. W marcu 2017 na całym świecie aktywnych było ponad 730 tysięcy odwiertów wydobywczych [29], co wskazuje na skalę problemu, z którym może przyjąć się zmierzyć przemysłowi wydobywczemu za 20 lub 30 lat. W rzeczywistości problem ten jest

jeszcze poważniejszy, gdyż przywołana liczba nie uwzględnia odwiertów, które są już nieaktywne na przykład ze względu na zbyt znikomy przepływ węglowodorów niepozwalający na kontynuowanie komercyjnego wydobycia. Wiele z tych nieaktywnych odwiertów zostało wykonanych w czasach, w których technologia nie umożliwiała analizy poprawności przeprowadzenia operacji cementowania. Może się zatem zdarzyć, że pomimo poprawnego ich zabezpieczenia kończącego produkcję, korozja stworzy bajpasy omijające wytworzone korki cementowe i z wykorzystaniem kanałów w zaczynie cementowym umożliwi migracje płynów złożowych doprowadzając na przykład do skażenia zbiorników wody pitnej. Jest to oczywiście jeden z najgorszych, a zarazem mało prawdopodobnych scenariuszy jednak przy ilości odwiertów liczonej w milionach nawet takie scenariusze stają się realne.

Potencjalne konsekwencje nie ograniczają się, jednak tylko do zdarzeń związanych z korozją, czy będących zagrożeniem w długiej perspektywie czasu. Jak pokazał przykład wycieku ropy naftowej ze złoża Macondo spowodowanego wybuchem i zatonięciem platformy wiertniczej Deepwater Horizon następstwa niepoprawnie przeprowadzonej operacji cementowania mogą mieć bardziej bezpośrednią i dynamiczną naturę (Rysunek 17).



Rysunek 17 Paląca się platforma wiertnicza Deepwater Horizon 22.04.2010 o godzinie 14:51 [30]

Rozmiary tej katastrofy były tak rozległe, że w celu monitorowania jej efektów i dynamiki zmian konieczne było stałe wykorzystanie satelit (Rysunek 18). Biały kolor na zdjęciu przedstawia ciągłą warstwę unoszącej się na powierzchni ropy, od której odbija się światło. W górnym prawym rogu widoczne są skrawki zatoki nieskażone jeszcze w tym dniu ropą naftową. W chwili wykonania

zdjęcia od zatonięcia platformy minął miesiąc i 4 dni. Dla porównania w lewym dolnym rogu przedstawiona jest mapa południowowschodniej części Stanów Zjednoczonych Ameryki.



Rysunek 18 Zdjęcia satelitarne - wyciek ropy naftowej w wyniku zatonięcia platformy Deepwater Horizon widziany z orbity ziemskiej, 24 maja 2010 [31]

Prawdziwy zakres skażenia pokazany jest dopiero na Rysunku 19, gdzie widoczny jest maksymalny zasięg obecności poszczególnych frakcji ropy naftowej.

W wyniku cementowania odwiertu jak i w bezpośrednim jego następstwie popełniono szereg błędów i zaniedbań, które doprowadziły do ominięcia wszystkich dostępnych zabezpieczeń, uwolnienia gazu ze złoża, a w konsekwencji do wybuchu i zatonięcia platformy. Głowica zlokalizowana była około 1,6 km pod powierzchnią wody. Wyciek udało się zatamować dopiero po 87 dniach. Do tego czasu do Zatoki Meksykańskiej wydostało się 205,8 miliona metrów sześciennych ropy. W wyniku eksplozji śmierć poniosło 11 ludzi, a kolejnych 17 osób odniosło ciężkie obrażenia [32].





Rysunek 19 Zasięg wycieku ze złoża Macondo [32]  
 kolor zielony – bardzo lekkie frakcje ropy, żółty – lekkie, pomarańczowy – średnie, czerwony – ciężkie

Całkowite koszty akcji ratowniczej i wypłaty odszkodowań wyniosły około 40 mld dolarów [33]. Ze względu na wysokość kwoty jak i spadek zaufania inwestorów czy firm ubezpieczeniowych, to pojedyncze zdarzenie doprowadziło niemal do bankructwa trzeciego największego koncernu wydobywczego na świecie. Ze względu na obszar skażenia oraz biorąc pod uwagę długofalowe następstwa, katastrofa ta jest wskazywana jako największa spowodowana działalnością ludzką.

Koncern British Petroleum (BP) zleciło wewnętrzną analizę tego zdarzenia, upubliczniając cały raport. Wskazanych w nim zostało 8 podstawowych przyczyn tej katastrofy. Co kluczowe z punktu widzenia rozprawy, eliminacja pierwszej przyczyny (brak izolacji strefy zbiornikowej w wyniku niepoprawnie przeprowadzonej operacji cementowania) wyeliminowałaby możliwość wystąpienia zdarzenia. Pozostałych 7 przyczyn odnosi się do błędów i luk w zaporach systemu bezpieczeństwa [34].

Pomimo, iż raport wskazuje na 8 głównych przyczyn, z powodu których doszło do tego zdarzenia (opis poniżej), przyjmuje się, że pojedynczych błędów i zaniedbań na etapie projektowania odwiertu, analiz ryzyka jak i samego jego wykonania było około 1000.

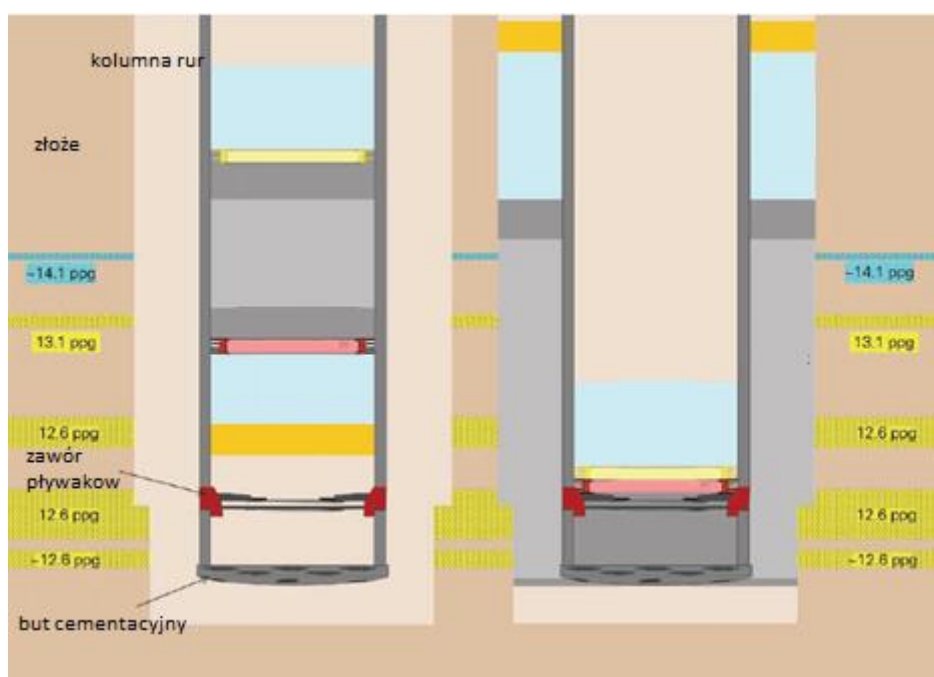
1 Bariera cementowa przestrzeni pierścieniowej nie izolowała węglowodorów.

W przeddzień wypadku cement został wpompowany do kolumny rur, a stamtąd do przestrzeni pierścieniowej w celu uniemożliwienia migracji węglowodorów ze złoża do odwiertu. Zaczyn cementowy, który został umieszczony w głównej strefie węglowodorowej był lekkim, azotowanym cementem pianowym. Ten zaczyn, prawdopodobnie na skutek oddzielenia się i penetracji azotu, umożliwił migracje węglowodorów w przestrzeni pierścieniowej. Zespół

dochodzeniowy stwierdził, że wystąpiły uchybienia w projektowaniu i testowaniu cementu, jak również zapewnieniu jakości i ocenie ryzyka.

## 2 But cementowy nie izolował strefy węglowodorów (Rysunek 20).

Po wejściu do przestrzeni pierścieniowej węglowodory przedostały się przez odwiert wiertniczy, a następnie but cementacyjny zainstalowany na końcu kolumny rur do strefy pomiędzy rurami okładzinowymi 9 7/8 cala i 7 cali. Pierwszą barierą był cement na wylocie buta cementacyjnego, a drugą kołnierz płytakowy, który jest urządzeniem montowanym na górze buta cementacyjnego zabezpieczającym przed przepływem wstecznym. Zespół prowadzący dochodzenie stwierdził, że wnikanie węglowodoru odbywało się niemal na pewno przez but cementacyjny, a nie przez uszkodzenie samej kolumny rur okładzinowych, czy przez system uszczelnień na podwieszeniu kolumny. Zespół badawczy zidentyfikował potencjalne przyczyny, które mogą wyjaśniać w jaki sposób doszło do uszkodzenia tych dwóch barier.



Rysunek 20 Planowane rozmieszczenie płynów podczas operacji cementowania [35]  
kolor jasny brązowy – płuczka, szary – zaczyn cementowy, niebieski – płyn buforowy, pomarańczowy – olej, czerwony – dolny korek cementacyjny, żółty – górny korek cementacyjny

## 3 Test ciśnieniowy został zaakceptowany, pomimo że nie uzyskano izolacji strefy zbiornikowej.

Przed zakończeniem prac na odcinku odwiertu przeprowadzono test ciśnieniowy w celu sprawdzenia integralności mechanicznych barier (but cementacyjny, kolumna rur okładzinowych i podwieszenie kolumny rur). Badanie polegało na zastąpieniu ciężkiej płuczki wiertniczej lżejszą wodą morską, aby wytworzyć kontrolowany stan nierównowagi ciśnienia. Odczyty ciśnienia i



przepływu w czasie testu ciśnieniowego były wskaźnikami migracji ze złoża co oznacza, że nie udało się uzyskać integralności tych barier. Mimo to, załoga jednostki wiertniczej Transocean i kierownictwo platformy BP przyjęli błędny pogląd, że test zakończył się sukcesem i że izolacja została osiągnięta.

4 Przepływ ze złoża nie został rozpoznany do czasu, aż węglowodory nie znalazły się w kolumnie łączącej głowicę wydobywczą z platformą.

Po zaakceptowaniu testu ciśnieniowego odwiert został przywrócony do stanu równowagi, uniemożliwiając dalszą migrację z odwiertu. Później w ramach standardowych operacji, ciężka płuczka wiertnicza znów została zastąpiona wodą morską, ponownie wprowadzając stan nierównowagi ciśnienia w odwiercie. W miarę upływu czasu umożliwiała to przepływ węglowodorów przez kolumnę okładzinową i zawór odcinający BOP (ang. blowout preventer). Wyraźne sygnały wskazujące na migrację węglowodorów wraz ze wzrostem ciśnienia w kolumnie wiertniczej były rejestrowane w czasie rzeczywistym na około 40 minut, zanim załoga platformy podjęła pierwsze działania w celu odzyskania kontroli w odwiercie. Reakcja załogi nastąpiła dopiero w momencie, w którym węglowodory zaczęły wydostawać się już na powierzchnię. Załoga platformy nie rozpoznała początkowo rozszczelnienia się złoża i instalacji oraz nie podjęła do tego momentu działań, aby przywrócić kontrolę nad złożem.

5 Przeprowadzone działania naprawczo-ratunkowe nie przywróciły kontroli nad odwiertem.

Pierwsze działania naprawcze w zakresie odwiertu polegały na zamknięciu zaworu BOP i przekierowaniu wypływu ze złoża do systemu separatora gazu płuczkowego platformy Deepwater Horizon (MGS), zamiast skierować przepływ za burtę. Gdyby strumień został tam skierowany, zamiast do systemu MGS, dałoby to więcej czasu na reakcję, a konsekwencje wypadku mogłyby zostać zminimalizowane.

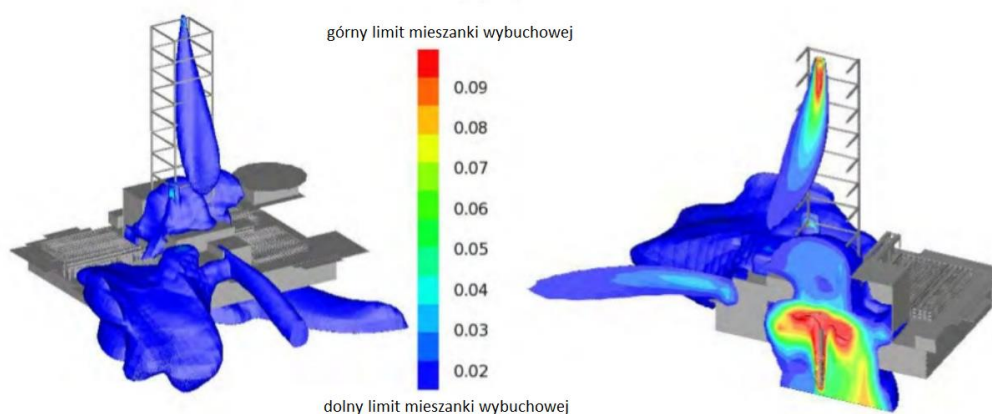
6. Przekierowanie do separatora gazu płuczkowego spowodowało intensywny wypływ gazu na platformie.

Po przekierowaniu do MGS, węglowodory zostały wypuszczone bezpośrednio na platformę wiertniczą przez dwunasto-calowy otwór spustowy systemu MGS. Inne drogi przepływowe również prowadziły gaz na urządzenia wiertnicze. Zwiększyło to prawdopodobieństwo stworzenia wybuchowej mieszanki gazu i powietrza w pobliżu potencjalnego miejsca zapłonu. Co istotne, konstrukcja systemu MGS umożliwiła przekierowanie

przepływu do zbiornika MGS, choć przepływ na tym etapie był już relatywnie wysoki. Doprowadziło to do awarii sytemu separatora.

#### 7. System przeciwpożarowy nie zapobiegał zapłonowi węglowodorów.

Węglowodory migrowały poza obszary Deepwater Horizon, które zostały sklasyfikowane jako miejsca szczególnej ochrony przeciwpożarowej, do miejsc gdzie potencjał zapłonu był wyższy. System ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji prawdopodobnie przeniósł mieszanek bogatą w gaz do maszynowni, powodując awarie co najmniej jednego silnika i tworząc przez to potencjalne źródło zapłonu.



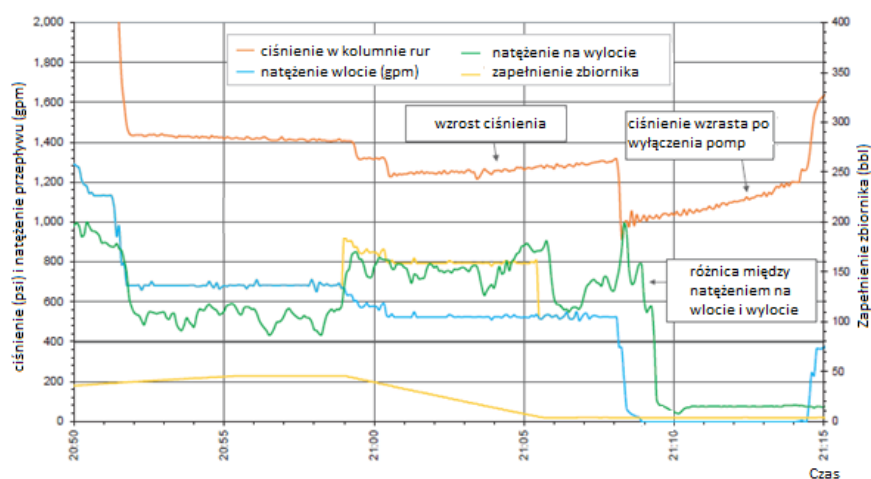
Rysunek 21 Wizualizacja zasięgu występowania mieszanki wybuchowej o 21:46 - Deepwater Horizon [36]

#### 8. Tryb awaryjny BOP nie uszczelnił odwiertu.

Trzy systemy pracy zaworu BOP w trybie awaryjnym okazały się nieskuteczne przy uszczelnianiu odwiertu. Eksplozje i pożary prawdopodobnie uniemożliwiły awaryjną sekwencję odcięcia odwiertu (główną metodę awaryjną dostępną dla personelu wiertniczego, która została zaprojektowana do uszczelnienia odwiertu i odłączenia pionu morskiego od studni). Stan krytycznych komponentów w żółtych i niebieskich kapsułach sterowania na zawrze BOP prawdopodobnie uniemożliwił uruchomienie kolejnej awaryjnej metody kontroli odwiertu - funkcji trybu automatycznego (AMF), która została zaprojektowana do uszczelniania studni bez interwencji personelu wiertniczego po utracie ciśnienia hydraulicznego, mocy elektrycznej i łączności z platformy do stanowisk kontrolnych BOP. Badanie kapsuł kontrolnych BOP po wypadku ujawniło, że wystąpiła krytyczna usterka zaworu elektromagnetycznego w systemie żółtym, a w systemie niebieskim akumulatory AMF były niewystarczająco naładowane. Przyjmuje się, iż usterki te istniały w czasie wypadku. Próba aktywowania funkcji automatycznego zamknięcia odwiertu za pomocą zdalnie sterowanego robota podwodnego spowodowała uruchomienie siłowników

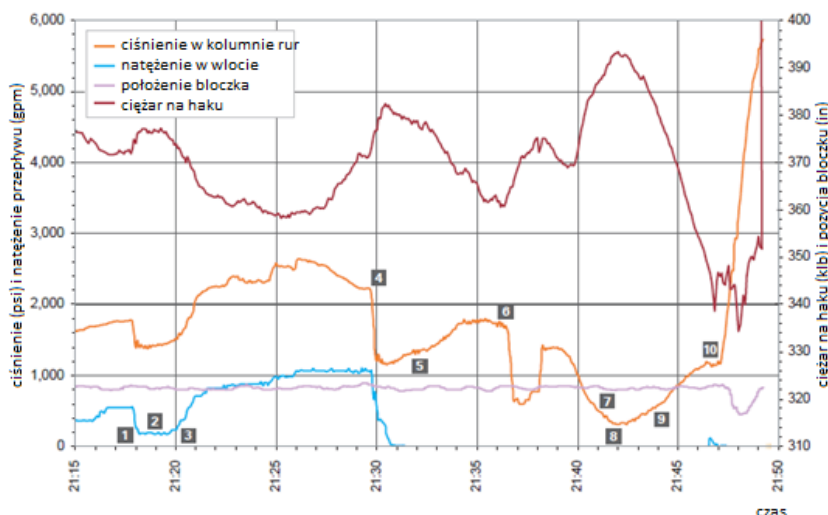
ścinających po 33 godzinach od eksplozji, jednak nie spowodowało to zamknięcia i uszczelnienia odwiertu. Była to ostatnia zapora bezpieczeństwa.

Pomimo faktu, że odwiert ten został zakwalifikowany do kategorii wysokiego zagrożenia i zawierał elementy eksperymentalne (np. stosowaną mieszankę cementową w danych warunkach), monitorowanie pracy było niewystarczające co można zaobserwować na Rysunkach 22 i 23. Zarejestrowane dane wyraźnie wskazują na obecność bajpasu w płaszczu cementowym, jak również na migrację płynów złożowych i wzrost ciśnienia w kolumnie wydobywczej. Co warto podkreślić, sytuacja ta dobrze oddaje poziom nadzoru nad bezpieczeństwem prac na odwiertach wydobywczych.



Rysunek 22 Wykresy rejestrowanych pomiarów ciśnienia, natężenia przepływu i zapełnienia zbiornika na platformie Deepwater Horizon [34]

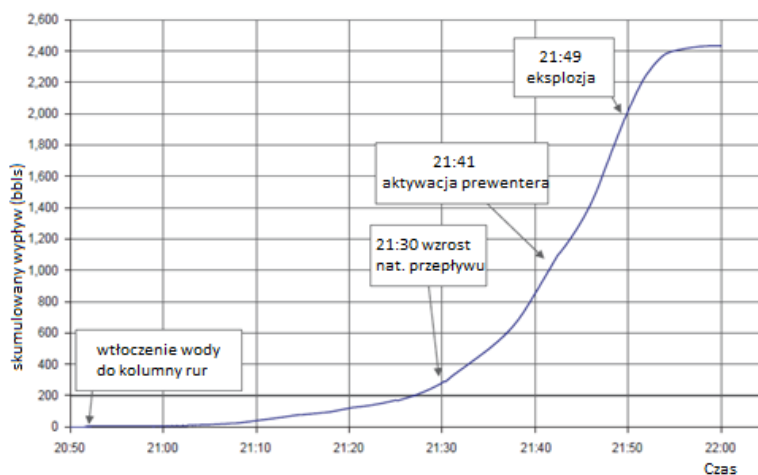
Na podstawie zgromadzonych danych, w tym zeznań świadków, zespół badawczy był w stanie ustalić, że przepływ płuczki na powierzchnię platformy został po raz pierwszy zaobserwowany o 21:40. Dopiero wtedy podjęto pierwsze działania w tym aktywowano prewenter o 20:41. Co warto odnotować, zgodnie z modelem przepływu ALGA, gdyby prewenter nie został zamknięty (normalna procedura), zgromadzone ciśnienie spadłoby do zera do godziny 21:43.



Rysunek 23 Wydarzenia poprzedzające zatonięcie platformy - oś czasu [34]

1 – otwiera się zawór bezpieczeństwa na pompie #2, 2 – wyłączenie pomp głównych, 3 – operator wiertni wezwany do agregatu cementacyjnego, 4 – wyłączenie wszystkich pomp, 5 – początek dyskusji na temat różnicy ciśnień, 6 – otwarcie zaworu spustowego w celu redukcji ciśnienia, 7 płuczka zaczyna wyciekać na powierzchnię platformy, 8- prewenter zostaje aktywowany, 9- próba zamknięcia prewentera, 10- włączenie BOP

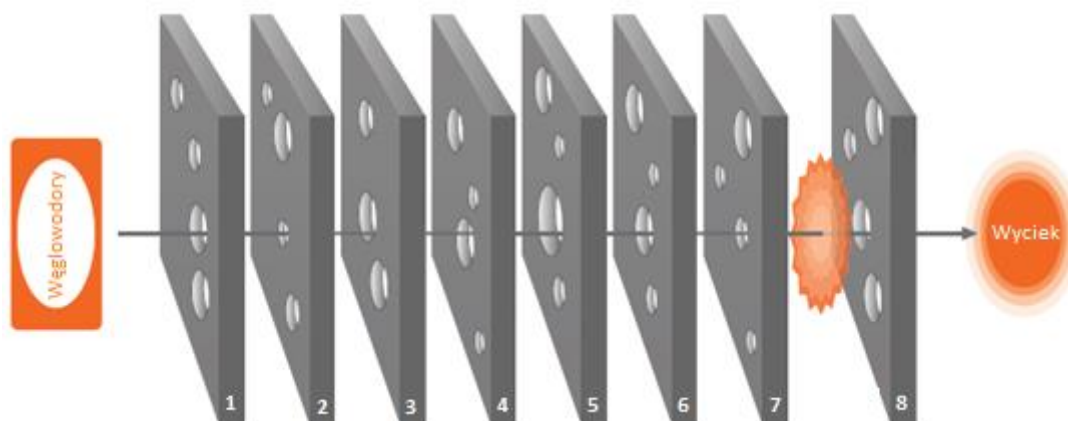
Jak można zauważyć na powyższych rysunkach pierwsze oznaki nieudanego procesu cementowania były widoczne już o 20:58 (wzrost ciśnienia pomimo wyłączenia pomp, eksplozja wystąpiła ponad 2 godziny później). Przy tego typu operacjach symptomy te powinny być zanotowane wcześniej, co dałoby załodze więcej czasu na reakcję.



Rysunek 24 Wyptyw z odwiertu na podstawie analizy danych [34]

W oparciu o model przepływu OLGA w czasie wybuchu na platformę wydostało się 2 000 baryłek węglowodorów. Do czasu aktywacji prewentera liczba ta przekroczyła 1000 baryłek. W

tym samym czasie ciśnienie w kolumnie rur wzrosło z 338 psi do 1200 psi o 21:46 i do 5730 psi o 21:49.



Rysunek 25 Analiza sforsowanych barier poprzedzających wyciek [34]

1 - zaczyn cementowy, 2 - bariery mechaniczne, 3 - testy ciśnieniowe, 4 - monitorowanie odwiertu, 5 - akcje ratunkowe, 6 - izolacja węglowodorów na powierzchni, 7 - systemy przeciwpożarowe i gaśnicze, 8 - procedura awaryjnego aktywowania BOP

Jak wynika z analizy wydarzeń w czasie, wyciek Macondo był konsekwencją wielu zaniedbań i błędów, z których pierwszym była niewłaściwie przeprowadzona operacja cementowania. Ta katastrofa pokazała, że nawet system bezpieczeństwa stosowany przez jedną z największych i najbardziej doświadczonych firm wydobywczych może zawieść, dlatego ważne jest, aby wyeliminować podstawową przyczynę, a nie polegać na barierach bezpieczeństwa czy procedurach ratowniczych.

## Rozdział 2 Analiza stanu wiedzy

### 2.1. Kroki milowe w zrozumieniu procesu wypierania się cieczy w przestrzeni pierścieniowej

Przy stale rosnącej trudności wydobycia węglowodorów wynikającej z konieczności poszukiwania nowych, mniej dostępnych złóż, inżynierowie na całym świecie muszą mierzyć się z problemami związanymi z:

- głębokością nowo odkrytych złóż,
- wąskim marginesem błędu podczas wierceń, ze względu na bariery tektoniczne czy charakter złóż niekonwencjonalnych,
- wierceniem wysokociśnieniowym i wysokotemperaturowym HPHT (ang. high-pressure and high-temperature),

- nowymi rodzajami złożeń itp.

To wymusza potrzebę wdrożenia nowych mechanizmów bezpieczeństwa i optymalizacji prowadzonych operacji. Ponieważ etapy cementowania są kluczowe dla całego projektu, szczególną uwagę poświęca się rozwojowi technologii w powiązanych obszarach. Jak stwierdzono w poprzednim rozdziale, wynik procesu cementowania może być determinowany jako wydajność akcji wyparcia płuczki. Optymalizacja tego procesu wymaga zrozumienia wzajemnych oddziaływań płynów i praw definiujących ruchy cząsteczek. Badania dotyczące przepływu jednofazowego w przestrzeni pierścieniowej przeprowadzono już w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku [37 - 39]. Na uwagę zasługuje fakt, że próby stworzenia modelu obliczeniowego zostały przeprowadzone już w czasach, gdy moc obliczeniowa komputerów nie pozwalała mieć nadziei na ich komercyjne wykorzystanie jeszcze za życia autora (Tabela 1).

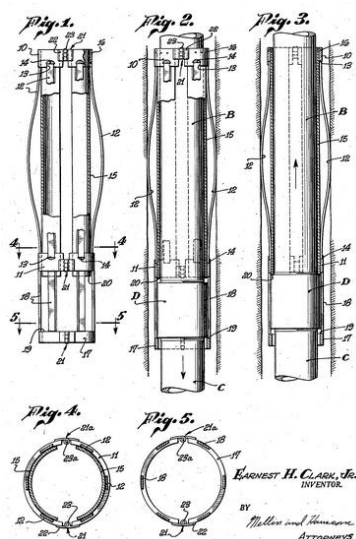
Tabela 1 Kroki milowe w zrozumieniu przepływu jednofazowego w przestrzeni pierścieniowej

Autor	Rok	Krok milowy
Rivlin R.	1956	Wprowadzenie tensora naprężeń [37]
Frederickson A.	1958	Wyrażenie analityczne pochodzące od równania Naviera-Stokesa dla opisu płynów nienewtonowskich w koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej [38]
Coleman B.	1959	Podejście „prostego płynu”, korelacja między profilami prędkości, a tensorem naprężeń w koncentrycznej domenie płynu [39]
Frederickson A.	1960	Przepływ spiralny cieczy lepkosprężystych w przestrzeni pierścieniowej [40]
Kozicki W.	1966	Równanie przepływu w koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej [41]
Hanks R.	1979	Model Power Law [42]
Hanks R.	1979	Model Herschel-Bulkley [43]
Iyoho A.	1981	Podejście szerokości szczeliny ecentrycznej w przestrzeni pierścieniowej [44]
Uner D.	1989	Wolumetryczne natężenie przepływu w domenie ecentrycznej [45]
Riberio P.	1994	Model płynu nienewtonowskiego w ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej [46]

W oparciu o rozwój wiedzy dotyczącej przepływu jednofazowego możliwe było rozpoczęcie pracy nad zagadnieniem wypierania się cieczy w przestrzeni pierścieniowej. Najwcześniejsze prace w tym temacie zostały wykonane przez McLean w 1967 roku [47]. Jego podejście opierało się na założeniu, że geometria pierścienia może być podzielona na elementy promieniowe z identycznym gradientem ciśnienia. W rezultacie przepływ kanałów został po raz pierwszy opisany w ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej. Dzięki tej analizie zobrazowano znaczenie właściwości reologicznych płuczki wiertniczej na skuteczność procesu wypierania. Tę pracę kontynuowano w kolejnych latach w celu eksperymentalnej analizy wpływu gradientu ciśnienia i roli różnicy gęstości cieczy w procesie ze względu na efekt wyporu [48].

Inne podejście zaprezentowali Beirute i Flumerfelt w 1977 r. [49]. W tym podejściu oddzielnie sformułowano równania dla płynu wypieranego i wypierającego w domenie czasu. Co więcej, interfejs był traktowany jako całkowicie rozmyty, a napięcie powierzchniowe zostało pominięte. Położenie poszczególnych faz w danym czasie można określić na podstawie prędkości cząstek, dlatego też ta metoda dała zadowalające wyniki w stabilnych warunkach przepływu. Jednak zaniedbanie aspektu napięcia powierzchniowego skutkowało „wątpliwymi wynikami” podczas szerszej analizy przypadków wypierania np. dla domeny ecentrycznej. Warto podkreślić, że wnioski z tych prac doprowadziły do wdrożenia nowych rozwiązań i procedur branżowych. Dobrym przykładem może być umieszczanie centralizatorów na zapuszczanej kolumnie rur. Zwiększenie świadomości negatywnego wpływu ecentryczności na skuteczność wyparcia płuczki przyczyniło się do zmniejszenia odległości między instalowanymi centralizatorami (Rysunek 26) [50].

Pozytywny wpływ tej zmiany dla środowiska jest niemożliwy do ustalenia, gdyż badania stanu zacementowania w czasach kiedy się ona dokonała były niezwykle ograniczone. Analizując jednak współczesne wyniki, zaprezentowane w dalszej części rozprawy, można stwierdzić, iż były to zmiany konieczne podobnie jak dalsza optymalizacja procesu. Bez wątplenia pozwoliło to na redukcję sytuacji w przemyśle, w których w momencie cementowania występowały wyraźne ecentryczności lokalne w przestrzeni pierścieniowej co mogło prowadzić do powstania kanałów typu V.



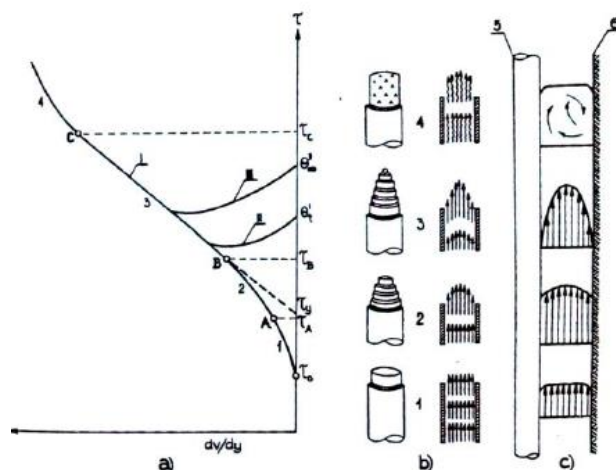
Rysunek 26 Schemat centralizatora zamieszczony w zgłoszeniu patentowym US [51]



Innym pozytywnym następstwem rozwoju badań nad procesem wypierania cieczy w przestrzeni pierścieniowej odwiertów było wprowadzenie zasady, iż płyn wypierający powinien mieć przynajmniej 20% wyższą gęstość od płynu wypieranego. Z całą pewnością pozwoliło to na ograniczenie przepływu palcowego w odwiercie. Jest on szczególnie istotnym zagrożeniem, gdyż prowadzi do braku wytworzenia płaszcza cementacyjnego na niemal całym obwodzie kolumny rur. Pojawienie się cementu na wypływie odwiertu może być wtedy odebrane przez obsługę jako uzyskanie wyparcia płuczki, podczas gdy proces ten właściwie się nie dokonał. O wystąpieniu takiego zdarzenia może świadczyć wyraźna różnica między planowaną objętością zaczynu cementowego, a tą wtłoczoną do odwiertu do momentu pojawiania się czoła zaczynu na wypływie. Jednak dopiero badania otworowe przeprowadzone po związaniu zaczynu mogą dać jednoznaczne potwierdzenie. Na tym etapie opcje, które pozostają to: zaakceptowanie uzyskanego wyniku związania cementu z kolumną rur lub zdecydować się na przeprowadzenie kosztownych operacji naprawczych, w tym kolejnego cementowania wykonywanego np. od góry zabezpieczonego odcinka. Oczywiście skuteczność takich akcji jest ograniczona, a jakość zacementowania w decydującym stopniu jest determinowana przez pierwsze cementowanie.

Wreszcie we wczesnych latach 90-tych przeprowadzono pierwsze próby symulowania zjawiska wypierania cieczy za pomocą oprogramowania komputerowego [52-54]. W wyniku prac i zastosowanych modeli obliczeniowych stwierdzono, że podczas przepływu turbulentnego można osiągnąć wyższą wydajność procesu wypierania, jednak taki tryb przepływu nie powinien być utrzymywany przez całą operację cementowania. Dla różnego składu płuczek i płynów buforowych, skuteczność wyparcia może się różnić w zależności od natężenia przepływu. Na podstawie badań przeprowadzonych w 2009 r. przez Savino [55], podczas wypierania płynu newtonowskiego przez płyn nienewtonowski skuteczność wyparcia zmniejsza się wraz ze wzrostem natężenia przepływu. Co więcej, zaobserwowano tak zwany przepływ palcowy dla najwyższych analizowanych wartości natężenia przepływu.





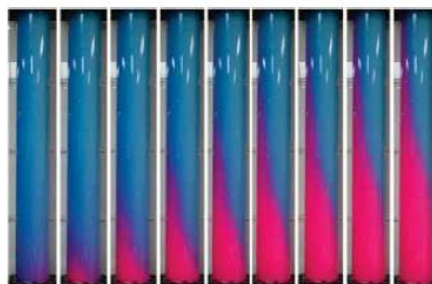
Rysunek 27 Charakter przepływu w przestrzeni pierścieniowej [56]

- a) zależność naprężeń ścinających od prędkości ścinania, b) zmiany w profilu prędkości, c) lokalne wektory prędkości, 1 - przepływ tłokowy, 2 - przepływ laminarny, 3 - przepływ warstwowy, 4 - przepływ turbulentny, 5 - kolumna rur, 6 - ściana odwiertu

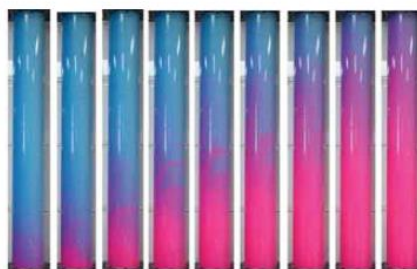
Zwiększenie zrozumienia zjawisk towarzyszących procesowi wypierania pozwoliło na analizę innych czynników takich jak ruch kolumny rur w odwiercie. Z użyciem powszechnie wykorzystywanego sprzętu w branży wiertniczej możliwe jest zastosowanie dwóch rodzajów ruchów:

- obrotowego,
- posuwisto-zwrotnego.

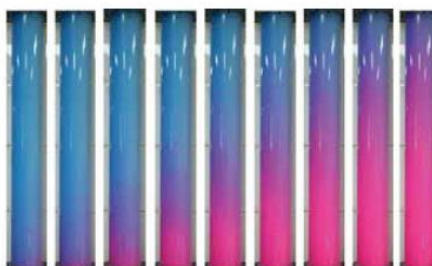
Wpływ ruchu obrotowego został dokładnie zbadany i udowodniono jego pozytywny wpływ na wzrost wydajności procesu wypierania [28,57]. Pomimo intensywnego rozmycia granicy faz, ruch obrotowy zmniejsza występowanie kieszeni osadowych w wąskich obszarach ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej (Rysunek 28). Na rysunku 28 a) oraz 29 b) widać wyraźnie kanał niewypartego płynu (płuczki - kolor niebieski), przez płyn koloru różowego reprezentującego płyny buforowe (kolory płynów zostały uzyskane z wykorzystaniem barwników, dobranych tak aby uzyskać wyraźny kontrast).



(a)



(b)



(c)

Rysunek 28 Proces wypierania cieczy w ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej a) bez rotacji wewnętrznej rury, b) z rotacją wewnętrznej rury wynoszącą 10 obrotów na minutę, c) z rotacją wewnętrznej rury wynoszącą 20 obrotów na minutę [57]

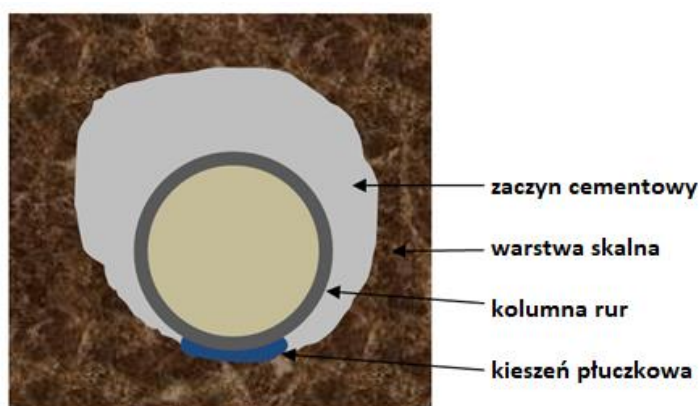
Widoczna jest eliminacja zastygłej płuczki w wąskim rejonie przestrzeni pierścieniowej przy wykorzystaniu ruchu obrotowego. Ze względu na zwiększenie szybkości ścinania dzięki ruchowi kolumny rur, możliwe stało się rozbitcie stacjonarnej poduszki płynu nienewtonowskiego. Analogiczny proces ma miejsce w większości wiertni na świecie podczas procesu cementowania choć należy zaznaczyć, iż urządzenie wiertnicze pozwalające na obrót podwieszanej kolumny rur nie jest standardowym wyposażeniem każdej z wiertni wydobywczych.

Analogiczny efekt rozbitcia zastałej masy płuczkowej uzyskać można dzięki ruchowi posuwisto-zwrotnemu, jednak z jego implementacją związane jest ryzyko omówione w dalszej części rozdziału.



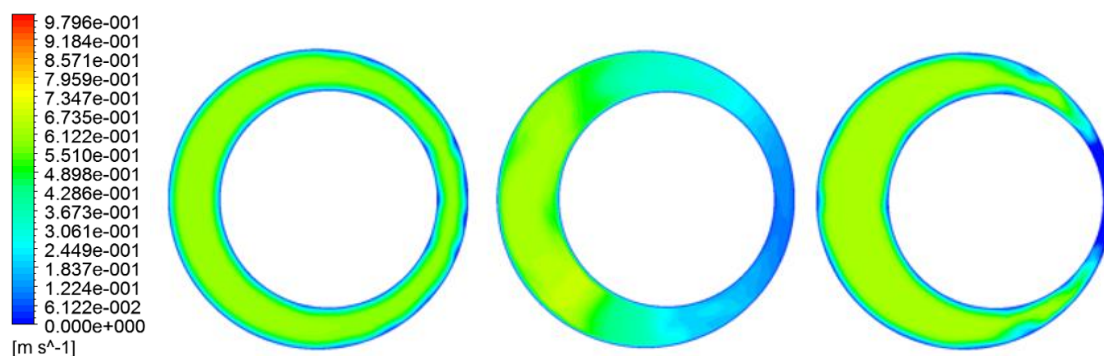
Rysunek 29 Efekt rotacji wewnętrznej rury na proces wypierania  
 a) przed rozpoczęciem tłoczenia cieczy wypierającej, b) wypieranie bez włączenia obrotów wewnętrznej kolumny rur, c) wypieranie z obrotem wewnętrznej kolumny rur [28]

Takie kieszenie osadowe mogą tworzyć kanały w powłoce cementowej, co umożliwia migrację płynów złożowych (kanał typu V). Co więcej, jest to potencjalny obszar uszkodzeń korozyjnych. Jak wcześniej wskazano, poziom ecentryczności można zmniejszyć przez wzrost liczby i redukcji rozstawu centralizatorów, jednak w wielu sytuacjach, np. w przypadku występowania miękkich, niestabilnych formacji skalnych, nie można go całkowicie wyeliminować (Rysunek 30). Problem ten jest szczególnie istotny w sekcjach kierunkowych czy szczególnie horyzontalnych, gdzie centralizatory i sekcje ściany odwiertu muszą utrzymać ciężar kolumny rur.



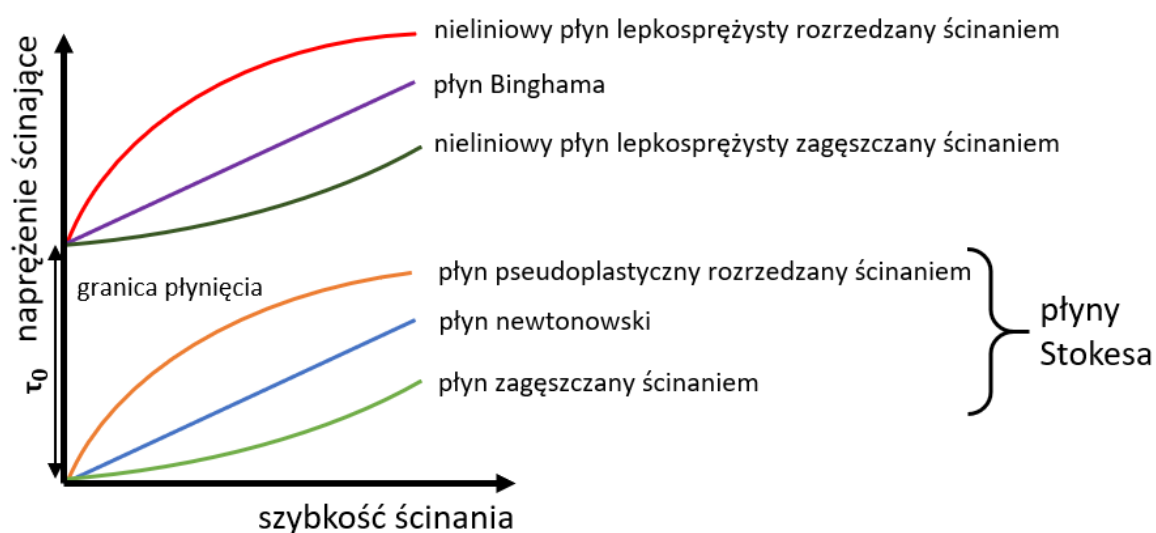
Rysunek 30 Tworzenie się kieszeni płuczkowych w wąskich rejonach ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej

W efekcie powstaje domena płynu o obszarze znacznie mniejszej prędkości przepływu. To z kolei skutkuje mniejszym naprężeniem ścinającym działającym na płuczkę, zmniejszając w ten sposób wydajność wypierania (Rysunek 31).



Rysunek 31 Wizualizacja przykładowego rozkładu prędkości w ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej, począwszy od lewej 25%, 50% i 75% [58]

Problem ten jest szczególnie widoczny w przypadku płynów wiertniczych nienewtonowskich posiadających granicę płynięcia (Rysunek 32). Warto zaznaczyć, że ze względu na swoje właściwości takie płuczki są powszechnie wykorzystywane w przemyśle. W przypadku konieczności przerywania prac wiercenia, są w stanie utrzymać stabilność w odwiercie i nie dopuścić do sedimentacji rozdrobnionych zwiercin na dnie otworu.



Rysunek 32 Ogólna klasyfikacja płynów nienewtonowskich

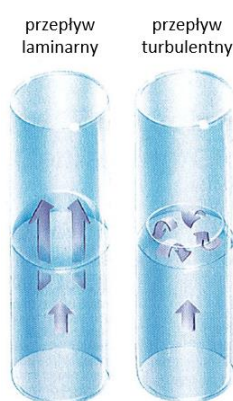
Na podstawie badań przeprowadzonych przez Moroni w 2009 r. [59] rotacja wewnętrznego cylindra podczas procesu cementowania zwiększa wartość naprężenia ścinającego

w wąskim obszarze pierścieniowej przestrzeni, zwiększając w ten sposób poziom wyparcia. Ponadto, w tym samym badaniu zweryfikowano poprawę usuwania zwiercin z wykorzystaniem ruchu obrotowego. Jest to szczególnie istotne, gdyż niewyflukane zwierciny osadzając się na powierzchni odwiertu, prowadzą do zmian geometrii przestrzeni pierścieniowej wpływając negatywnie na proces wypierania. Zagadnienie to jest szczerzej omówione w dalszej części rozprawy.

Co istotne z punktu widzenia tej rozprawy, pozytywny wpływ obrotu kolumny rur podczas procesu cementowania został opisany w wielu publikacjach na przestrzeni ostatnich trzech dekad [60], natomiast wpływ ruchu posuwisto-zwrotnego był przedmiotem analizy tylko w jednym przypadku [61]. Co więcej, badanie to zostało oparte tylko na symulacjach komputerowych.

Jest to szczególnie interesujące ze względu na fakt, że informacje o pozytywnym wpływie tego ruchu na skuteczność wyparcia, można znaleźć w wielu źródłach [48, 62-64]. Ruch posuwisto-zwrotny oprócz pozytywnego efektu związanego ze wzrostem miejscowej prędkości ścinania w wąskim regionie przestrzeni pierścieniowej (wytworzenie się lokalnego przepływu turbulenty; Rysunek 33), łączy się z negatywnymi następstwami. Przede wszystkim:

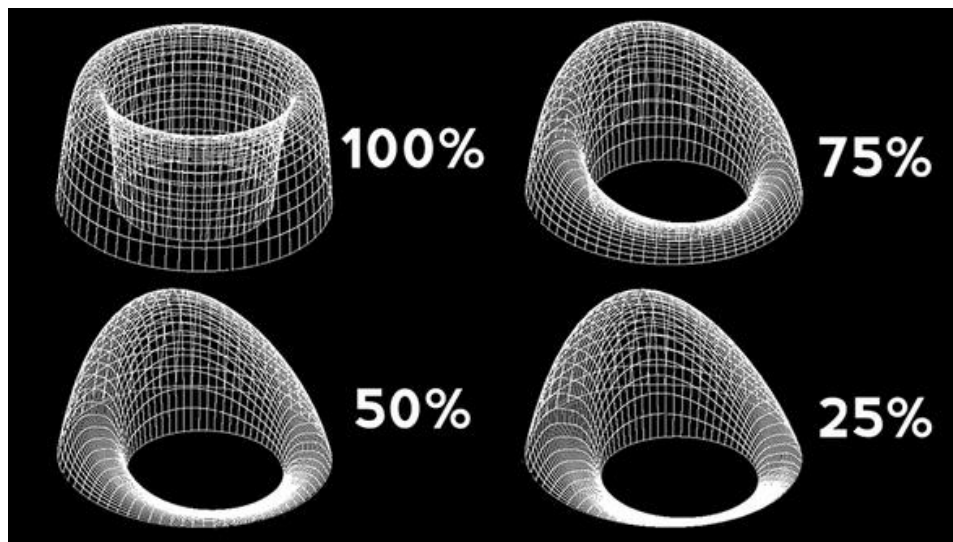
- powoduje powstawanie efektu tłokowego, mogącego prowadzić do szczelinowania ściany odwiertu,
- tworzy ryzyko tzw. przechwycenia rur (zaklinowania się ich w odwiercie) na nie docelowej głębokości [60],
- rozmywa granicę między fazami.



Rysunek 33 Zobrazowanie przepływu laminarnego i turbulentnego w przestrzeni pierścieniowej [62]

Zwiększanie szybkości ścinania w wąskich regionach przestrzeni pierścieniowej na skutek ruchu posuwisto-zwrotnego jest zjawiskiem pożądanym. Jak podkreślono wcześniej, umożliwia

rozbicie nieruchomych kieszeni płuczkowych, gdzie prędkość przepływu jest bliska lub równa zero (Rysunek 34).



Rysunek 34 Wizualizacja profilu prędkości cieczy wypierającej w przestrzeni pierścieniowej dla różnych stopni ecentryczności [65]

Nie mniej jednak, dynamiczny ruch posuwisto-zwrotny może prowadzić do tak zwanego tłokowego pęknięcia ściany otworu wiertniczego (Rysunek 35). Podobny efekt, lecz o zdecydowanie większej skali, uzyskuje się podczas szczelinowania hydraulicznego, które jest jedną z operacji pozyskiwania gazu łupkowego. Różnica polega na źródle wzrostu ciśnienia i na objętości wystąpienia zmian. W przypadku wydobywania węglowodorów niekonwencjonalnych izolowany jest poziom studni, a cała operacja jest starannie planowana. Szczelinowanie w wyniku ruchu posuwisto-zwrotnego może prowadzić do zmian geometrii przestrzeni pierścieniowej, częściowego zaważenia się ściany odwiertu czy nawet utraty cyrkulacji.



Rysunek 35 Schemat występowania szczelinowania tłokowego w wyniku ruchu kolumny rur

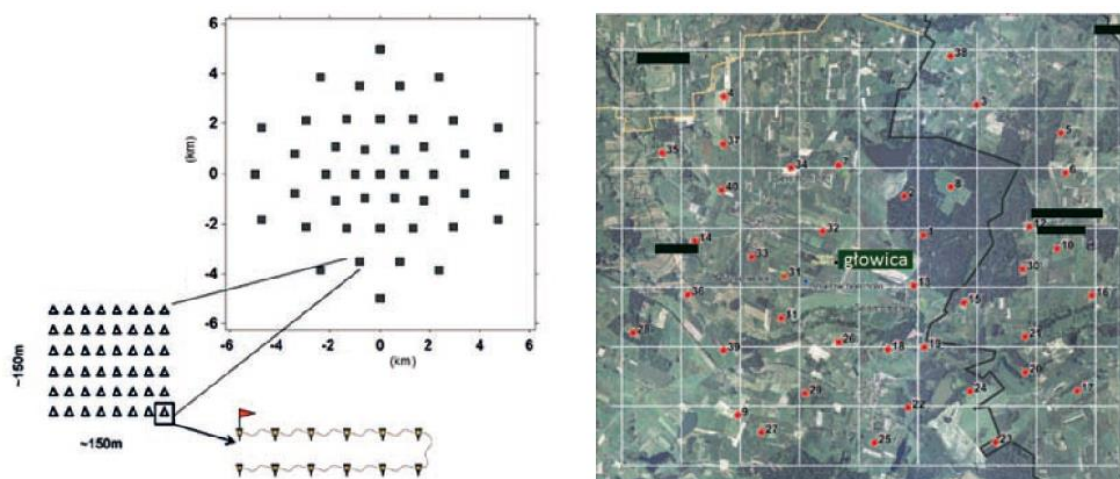


Różnicą jest również dynamika wzrostu ciśnienia. Podczas przygotowania odwiertu niekonwencjonalnego pod produkcję węglowodorów, wzrost ciśnienia uzyskuje się stopniowo z wykorzystaniem kilkunastu agregatów szczelinujących (Rysunek 36), a propagacja szczelin jest monitorowana poprzez wykorzystanie sieci czujników drgań rozstawionych nad szczelinowanym obszarem.



Rysunek 36 Agregaty szczelinujące [66]

Pomimo, iż obecnie monitorowanie w czasie rzeczywistym propagacji szczelin z wykorzystaniem interpretacji czasu wzbudzeń uzyskanych z wykorzystaniem tysięcy czujników (Rysunek 37, trójkąt na lewym rysunku oznacza pojedynczy czujnik drgań) jest w fazie rozwojowej, potencjał tej techniki jest oczywisty dla poprawy bezpieczeństwa prac na odwiertach niekonwencjonalnych.

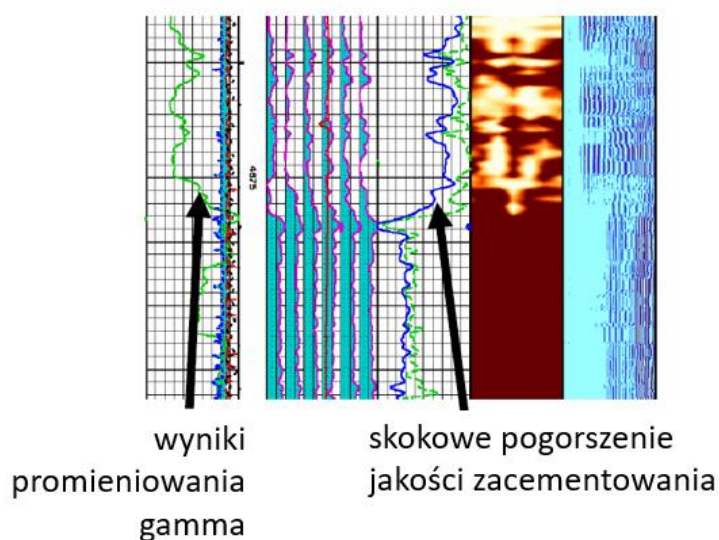


Rysunek 37 Dwa przykładowe rozstawy czujników typu patch array podczas operacji szczelinowania hydraulicznego [67]

W przypadku szczelinowania uzyskanego za sprawą efektu tłokowego, obszar zmian jest zdecydowanie bardziej lokalny. Nie mniej jednak ze względu na nieprzewidywalność propagacji szczelin może on doprowadzić do nieplanowanego połączenia się odwiertu ze złożem lub warstwą chłonną i w konsekwencji do tzw. ucieczki płuczki, czy zaczynu cementowego. Dlatego też zastosowanie ruchu posuwisto-zwrotnego podczas operacji cementowania nie jest tak oczywistą decyzją, jak w przypadku ruchu obrotowego.

Jednym z ostatnich czynników, które badano pod kątem ich wpływu na wyniki procesu cementowania, była jakość ścian odwiertu. Mimo dostępności artykułów opisujących tę kwestię (ich podsumowanie zostało wykonane przez Enayatpour w 2017 r. [60]), prawie wszystkie z nich koncentrują się na analizie makroskali (wpływ litologii regionu na jakość zacementowania). Zazwyczaj są one związane z optymalizacją technologii wiercenia w niestabilnych formacjach skalnych (Rysunek 38). Żaden z nich nie analizował wpływu lokalnej zmiany geometrii, spowodowanej na przykład obecnością nadbudowanych zwiercin tzw. mud cake'ów, na proces wypierania.

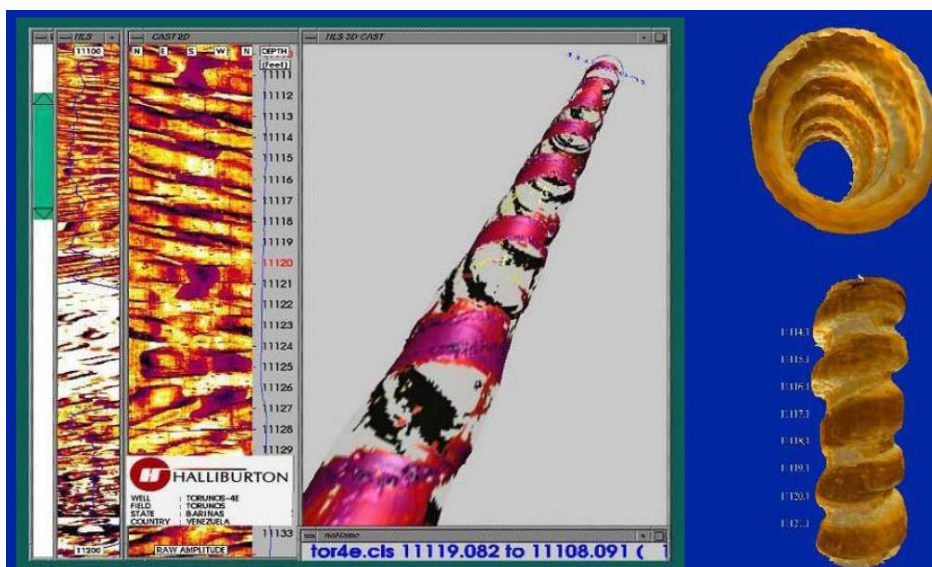
Rysunek 38 przedstawia zestawienie pomiarów litologii (lewa strona rysunku) z wynikami związania cementu z kolumną rur (prawa strona rysunku), w zależności od głębokości odwiertu (oś pionowa). Na rysunkach widoczna jest skokowa zmiana wartości wskazań związana z przejściem odwiertu ze stosunkowo miękkiej formacji skalnej w formację stabilną (połowa wysokości analizowanego odcinka). Na pomiarach związania cementu widoczne jest, iż w formacji mniej stabilnej jakość płaszczki cementacyjnej jest wyraźnie gorsza niż w dolnej warstwie skalnej.



Rysunek 38 Wyniki pomiarów otworowych: litologia – lewa strona, jakość zacementowania - prawa strona [68]



Jedną z przyczyn niższej jakości zacementowania w miękkich, niestabilnych warstwach skalnych jest tendencja do helikalnego ruchu wiertła. Powstała w ten sposób helisowata przestrzeń pierścieniowa może prowadzić do kanałowego/palcowego przepływu zaczynu cementowego, obniżając tym samym skuteczność wyparcia płuczki. Efekt taki jest szczególnie widoczny na granicy warstw skalnych, gdzie operator wiertni reaguje na zmieniające się warunki otworowe.



Rysunek 39 Nieregularna przestrzeń pierścieniowa wywołana spiralnym ruchem wiertła w miękkiej formacji skalnej [68]

Na podstawie zebranych wyników badań i wiedzy w przemyśle wydobywczym ustalono zestaw parametrów o kluczowym znaczeniu dla procesu cementowania. Obejmują one:

- natężenia przepływu,
- objętości płynów,
- optymalne kontrasty gęstości,
- kontrasty lepkości,
- stabilność interfejsu między płuczką, cieczami buforowymi i przemywającymi oraz zaczynem cementowym,
- geometrię odwiertu i jego stabilność
- integralność odwiertu,
- ruch kolumny rur (obrotowy i posuwisto-zwrotny),
- ciśnienie złożowe oraz ciśnienie w odwiercie.

Wpływ większości został dokładnie zbadany, ale nie wszystkich. Rozprawa ma na celu analizę wpływu kolejnych czynników na proces cementowania.

## 2.2. Model matematyczny

Prędkość cząstek płynu w koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej może być określona w cylindrycznym układzie współrzędnych jako:

$$\mathbf{u} = [u_r, u_\theta, u_z] = [0, r\omega(r), u(r)] \quad (2.1)$$

gdzie:

$u$  - prędkość wypadkowa, m/s;

$u_r$  - prędkość w kierunku promieniowym, m/s;

$u_\theta$  - prędkość w kierunku stycznym, m/s;

$u_z$  - prędkość w kierunku osiowym, m/s;

$\omega$  - prędkość styczna, 1/s;

$r$  - promień, m;

Przyjmując, że nie ma gradientu ciśnienia w kierunku promieniowym

$$\frac{dp}{dr} = 0 \quad (2.2)$$

gdzie:

$p$  - ciśnienie

prędkość w tym kierunku może być zaniedbana. Jednak to założenie jest poprawne tylko w przypadku domen koncentrycznych.

Zaczynając od równań Naviera-Stokesa i przyjmując, że przepływ w pierścieniowej przestrzeni jest stacjonarny, a układ uznajemy za izotermiczny [28, 69, 70], przepływ jednofazowy można zdefiniować równaniem:

### Równanie ciągłości

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho u_r r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho u_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z) = 0 \quad (2.3)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość cieczy

### Równania momentu

$$r: \rho \left[ \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial u_r}{r \partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right] = F_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \tau_{\theta\theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \quad (2.4)$$

$$\theta: \rho \left[ \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial u_\theta}{r \partial \theta} - u_r \frac{u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right] = F_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial r^2 \tau_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta \theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \quad (2.5)$$

$$z: \rho \left[ \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial u_z}{r \partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] = F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (2.6)$$

gdzie:

t – czas, s;

r (indeks) - kierunek promieniowy, współrzędne cylindryczne

$\theta$  (indeks) - kierunek styczny, współrzędne cylindryczne

z (indeks) – kierunek osiowy, współrzędne cylindryczne

$\tau_{\theta\theta}, \tau_{\theta z}, \tau_{\theta r}$  itp. - składowe kierunkowe naprężenia ścinającego, N/m<sup>2</sup>;

$F_r, F_\theta, F_z$  - składowe kierunkowe siły ciężkości, N;

### Naprężenie ścinające

Na podstawie Deawwanich [28] trzy główne (niezerowe) komponenty w każdym kierunku (r,  $\theta$ , z) można opisać jako:

$$r: \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \tau_{rr} = \left[ -\frac{\partial p}{\partial r} - \rho g \right] + \frac{1}{r} \tau_{\theta\theta} - \rho r \omega^2 \quad (2.7)$$

$$\theta: \frac{d}{dr} r^2 \tau_{r\theta} = 0 \quad (2.8)$$

$$z: \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \tau_{rz} = \left[ -\frac{\partial p}{\partial r} - \rho g \right] = c \quad (2.9)$$

gdzie:

g - przyspieszenie ziemskie, m<sup>2</sup>/s;

$\tau_{rr}, \tau_{\theta\theta}, \tau_{\theta r}, \tau_{rz}$  - składowe kierunkowe naprężenia ścinającego, N/m<sup>2</sup>;

$\omega$  – prędkość styczna, m/s;

c – wprowadzona zmienna

Dodatkowo można wprowadzić zmienną „a” (Równanie 2.10) oraz parametr „b” (Równanie 2.11) zdefiniowane jako:

$$\tau_{r\theta} = \frac{a}{r^2} \quad (2.10)$$

$$\tau_{rz} = \frac{cr}{2} - \frac{b}{2} \quad (2.11)$$

Gdzie

a, b - wprowadzone zmienne

Na podstawie [28,71] naprężenie ścinające może być zapisane jako:

$$\tau = \sqrt{\tau_{rz}^2 + \tau_{r\theta}^2} = \left[ \left( \frac{cr}{2} - \frac{b}{2} \right)^2 + \left( \frac{a}{r^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

gdzie:

$\tau$  - naprężenie ścinające, N/m<sup>2</sup>;  
 $\tau_{rz}$  - element osiowy naprężenia ścinającego, N/m<sup>2</sup>;  
 $\tau_{r\theta}$  - element rotacyjny naprężenia ścinającego, N/m<sup>2</sup>;

### Prędkość ścinania

Podobnie jak w przypadku naprężeń ścinających, szybkość ścinania można opisać jako wynik dwóch składników (komponentu osiowego i obrotowego).

$$\dot{y} = \sqrt{\dot{y}_{rz}^2 + \dot{y}_{r\theta}^2} = \sqrt{\left[-\left(\frac{du}{dr}\right)^2 + \left(\frac{d\omega}{dr}\right)^2\right]} \quad (2.12)$$

$$\dot{y}_{rz} = -\frac{du}{dr} \quad (2.13)$$

$$\dot{y}_{r\theta} = -\frac{d\omega}{dr} \quad (2.14)$$

gdzie:

$\dot{y}$  - szybkość ścinania, 1/s;  
 $\dot{y}_{rz}$  - element osiowy prędkości ścinania, 1/s;  
 $\dot{y}_{r\theta}$  - element rotacyjny prędkości ścinania, 1/s;

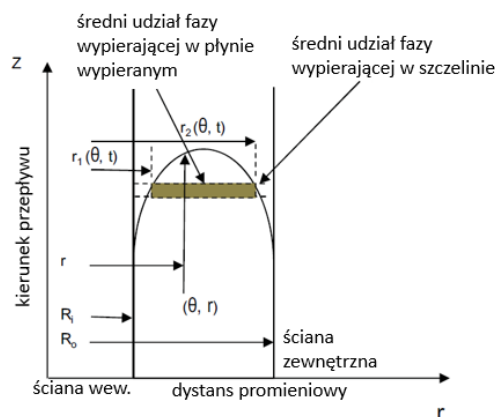
### Wypieranie się faz

Na podstawie Lockyear [53] należy przyjąć, iż do wyparcia cieczy wypieranej z analizowanego obszaru suma miejscowego spadku ciśnienia spowodowanego tarciem wewnętrznym i hydrostatycznego spadku ciśnienia musi przeważać granicę płynięcia cieczy wypieranej podzielonej przez połowę dystansu między ścianą odwiertu i powierzchnią kolumny rur, co można zapisać następująco:

$$|\Delta\rho + (\rho_B - \rho_A)g| = \frac{\tau_{yA}}{i/2} \quad (2.15)$$

gdzie:

$\Delta\rho$  – miejscowy spadek ciśnienia spowodowany tarciem wewnętrznym płynu, N/m<sup>2</sup>;  
 $\rho_A$  - gęstość cieczy wypieranej, kg/m<sup>3</sup>;  
 $\rho_B$  - gęstość cieczy wypierającej, kg/m<sup>3</sup>;  
 $\tau_{yA}$  – granica płynięcia cieczy wypieranej, N/m<sup>2</sup>;  
 $i$  - szerokość szczeliny pierścieniowej w analizowanym obszarze, m;



Rysunek 40 Schemat procesu wypierania cieczy [28]

### Rozdział 3 Postawione tezy i cel pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury nie można jednoznacznie określić w jaki sposób ruch posuwisto-zwrotny wpływa na proces wypierania się płynów w przestrzeni pierścieniowej. Opisanie opracowanie poświęcone temu zagadnieniu oparto na symulacjach obliczeniowych, których wyniki zależą od warunków brzegowych, przyjętych uproszczeń i poprawności wprowadzonych parametrów.

W przemyśle naftowym istnieje przekonanie o pozytywnym wpływie ruchu posuwisto-zwrotnego na jakość płaszcza cementowego. Wynika to jednak z subiektywnej oceny, a nie z danych empirycznych. Co więcej, wysoce niewiarygodne jest porównywanie wyników procesu cementowania z różnych odwiertów gdyż te różnią się pod względem warunków otworowych i czynników mających wpływ na operację cementowania.

Sprawa ta jest tym bardziej istotna ze względu na fakt, iż ruch posuwisto-zwrotny wiąże się z wieloma zagrożeniami i negatywnymi konsekwencjami. Z tych powodów celowe jest określenie wpływu tego ruchu na proces wypierania, a zatem na jakość wyniku procesu cementowania.

W tym celu przeprowadzono szereg testów eksperymentalnych, które opisano w kolejnych rozdziałach. W oparciu o najnowszą wiedzę można sformułować tezę, że **ruch posuwisto-zwrotny kolumny rur zwiększa wydajność wypierania cieczy z przestrzeni pierścieniowej.**

Podobna sytuacja dotyczy wpływu geometrii pierścieniowej na wynik operacji cementowania. Niektóre aspekty tej kwestii zostały dokładnie przeanalizowane. Doskonały przykład stanowi poziom ecentryczności, poruszany na przestrzeni lat w wielu artykułach analizujących kolejne aspekty i zmienne. W otwartej literaturze jednak, do niedawna nie było nawet jednego artykułu opisującego wpływ lokalnej zmiany geometrii na skuteczność wypierania cieczy, a opisana w nim analiza skupia się na wpływie litologii na proces wiercenia oraz na jakość powstałego płaszcza cementowego w ujęciu całego zabezpieczonego odcinka. Równolegle poruszana jest kwestia negatywnego efektu obecności mud cake'ów, bez empirycznego wskazania, w jaki sposób ich obecność wpływa na proces.

Na podstawie zmniejszenia szybkości ścinania w sąsiedztwie zwężeń przestrzeni pierścieniowej wywołanych obecnością mud cake'ów, można postawić tezę o **negatywnym wpływie takich przeszkód przepływu na skuteczność wypierania cieczy z przestrzeni pierścieniowej.**

Dodatkowo, stworzone stanowisko badawcze umożliwiło jako pierwsze w otwartej literaturze przeprowadzenie badań dotyczących zjawiska wypierania się cieczy w przestrzeni pierścieniowej przy natężeniach przepływu porównywalnych do tych stosowanych komercyjnie i przy implementacji ruchu obrotowego kolumny rur, co pozwoliło na weryfikację **tezy mówiącej o pozytywnym wpływie ruchu obrotowego na skuteczność wypierania cieczy z przestrzeni pierścieniowej.**

**Co więcej, należy założyć, iż połączenie ruchu obrotowego i posuwisto-zwrotnego zwiększa skuteczność wyparcia cieczy z przestrzeni pierścieniowej w porównaniu do sytuacji, w której implementuje się tylko ruch obrotowy lub tylko ruch posuwisto-zwrotny.**

Głównym celem pracy jest potwierdzenie lub odrzucenie tych tez.

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki eksperymentów prowadzonych na stanowisku badawczym, w których wydajność wyparcia cieczy w stworzonej przestrzeni pierścieniowej została zmierzona za pomocą czujników przewodności. **Jest to pierwsze badanie eksperymentalne w otwartej literaturze, które pozwoliło empirycznie zweryfikować wpływ ruchu posuwisto-zwrotnego na proces wypierania cieczy w przestrzeni pierścieniowej.**

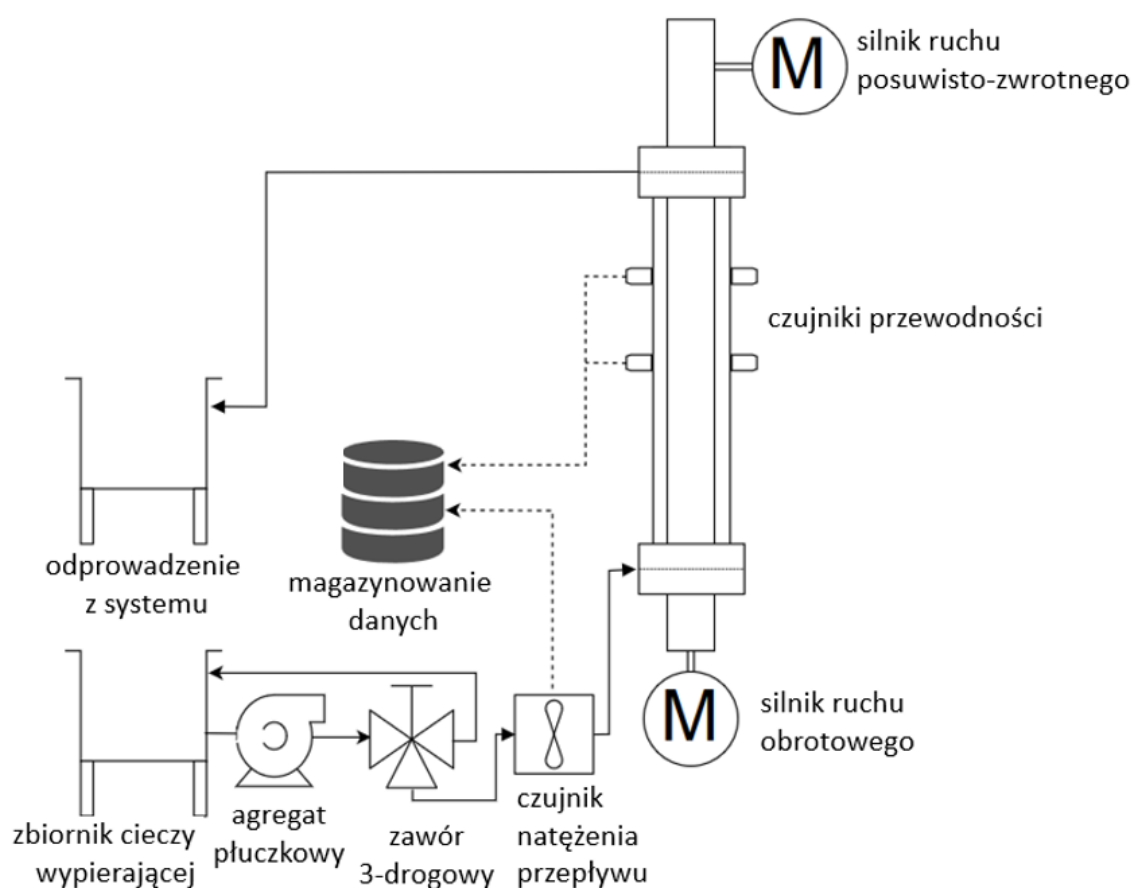
Rozdział 5 analizuje wyniki komercyjnych pomiarów otworowych pod kątem potwierdzenia zależności między geometrią otworu, a jakością cementowania. Analiza ta została oparta na pomiarach otworowych uzyskanych z przemysłu, a także na wynikach uzyskanych z

wykorzystaniem płytkiego odwiertu badawczego wykonanego na potrzeby grantu badawczo-rozwojowego prowadzonego przez Politechnikę Gdańską.

## Rozdział 4 Wpływ geometrii przestrzeni pierścieniowej i ruchu wewnętrznej rury na proces wypierania – badania eksperymentalne na stanowisku badawczym

### 4.1. Stanowisko badawcze

W ramach prac stworzone zostało stanowisko badawcze, którego kluczową częścią była przestrzeń pierścieniowa widoczna po prawej stronie Rysunku 41. Podczas eksperymentu, ciecz wypierająca była tłoczona za pomocą agregatu płuczkowego przez czujnik natężenia przepływu do przestrzeni pierścieniowej, a następnie była odprowadzana na zewnątrz układu.



Rysunek 41 Schemat stanowiska badawczego



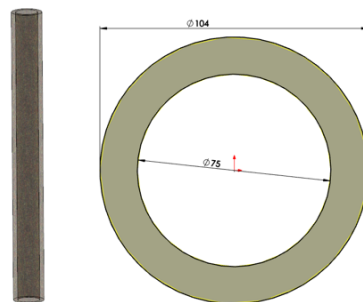
Aby ocenić wpływ zmian geometrii przestrzeni pierścieniowej, zaprojektowano dziesięć geometrii. Każda z nich reprezentuje wyidealizowany stan, który można znaleźć w otworze wiertniczym. Stany te można podzielić na 4 grupy:

- koncentryczny - jako punkt odniesienia do dalszej dyskusji (optymalny stan)
- ecentryczny z trzema stopniami intensywności - jako odniesienie do wcześniej prowadzonych badań [28, 57]
- lokalne zwężenie prześwitu z trzema stopniami intensywności – odwzorowujące stan równomiernej redukcji prześwitu odwiertu za sprawą osadzającego się, niewypłukanego materiału skalnego lub pęcznienia formacji skalnych
- lokalne zamknięcie prześwitu o trzech stopniach intensywności - przedstawiające zapadnięcie się ściany otworu wiertniczego lub powstałe w wyniku nierównomiernego osadzania się materiału skalnego w postaci mud cake'ów na przykład w rejonach lokalnego spadku prędkości przepływu.

Badania skupiły się na sytuacjach redukcji prześwitu ze względu na brak widocznego, negatywnego wpływu występowania lokalnych kawern, powstałych w wyniku osypywania się ścian odwiertu, na jakość powłoki cementowej, co zostało omówione w rozdziale 5.

### **Geometria koncentryczna**

W celu uwydatnienia tworzących się negatywnych efektów podczas procesu wypierania oraz wykorzystania możliwości zastosowanego agregatu płuczkowego i czujnika natężenia przepływu, konieczne było skalowanie średnic reprezentujących ścianę odwiertu oraz zewnętrzną ścianę kolumny rur. W przemyśle stosunek wartości średnicy wiertła wykorzystanego do wywiercenia odcinka odwiertu i średnicy kolumny rur w nim cementowanej zawiera się zazwyczaj w przedziale 1:1,2 do 1:1,3 [72]. Należy pamiętać jednak, że faktyczna średnica odwiertu jest większa niż wiertło wykorzystane do jego wywiercenia szczególnie w miękkich formacjach skalnych. Jako ostateczną wartość przyjęto 104mm – dla średnicy reprezentującej ścianę odwiertu oraz 75mm – dla zewnętrznej średnicy kolumny rur (Rysunek 42). Na stanowisku analizowany odcinek miał długość 1000mm. W tym celu wykorzystano metrowej długości odcinek rury wykonanej z PMMA o średnicy zewnętrznej 108mm i grubości ścianki 2mm, oraz dwumetrowy odcinek rury aluminiowej o średnicy 75mm i grubości ścianki 1mm. Różnica w wysokościach rur wynika z zaimplementowanego ruchu posuwisto-zwrotnego wewnętrznej kolumny.



Rysunek 42 Koncentryczna przestrzeń pierścieniowa

Taka przestrzeń pierścieniowa jest wyidealizowanym i pożądanym stanem sytuacji w odwiercie. Brak lokalnych zmian oraz ecentryczności pozwala na równomierne wypieranie w całym jej zakresie kątowym. Można przyjąć, iż szybkość ścinania jak i naprężenia ścinające w całym przekroju poprzecznym są jednakowe.

### Ecentryczna przestrzeń pierścieniowa

W celu opisanego warunków geometrycznych tej grupy, zaproponowany został parametr stopnia ecentryczności „ $e$ ” opisany równaniem:

$$e = \frac{o}{R_o - R_i} 100\% \quad (4.1)$$

gdzie:

$o$  – przesunięcie promieniowe między osiami odwiertu i kolumny rur, m;

$R_o$  – zewnętrzny promień (ściana odwiertu), m;

$R_i$  – wewnętrzny promień (zewnątrzna ściana kolumny rur), m;

Stworzone geometrie odzwierciedlają stan 25%, 50% i 75% ecentryczności. Takie położenie obudowy w odniesieniu do ściany otworowej może być efektem:

- niewystarczającej ilości zastosowanych centralizatorów,
- niewłaściwego ich osiowego rozłożenia,
- lokalnego skrzywienia odwiertu (planowanego lub będącego wynikiem błędu operatora wiertni),
- obecności niestabilnych formacji skalnych.



Rysunek 43 Wizualizacja przekrojów poprzecznych przestrzeni pierścieniowych o ecentryczności odpowiednio od lewej strony 25%, 50% i 75%

Jak zaznaczono wcześniej geometria taka była przedmiotem wielu analiz w przeszłości. Jej ponowne uwzględnienie w tych badaniach dało możliwość porównania stopnia wpływu tego typu niedoskonałości przestrzeni pierścieniowej z wpływem innych niedoskonałości przedstawionych w dalszej części rozdziału. Zastosowany stosunek natężenia przepływu do powierzchni przekroju poprzecznego, jako pierwszy w otwartej literaturze, w eksperymentalny sposób bada wpływ ecentryczności na proces wypierania się cieczy dla warunków przepływu zbliżonych do tych stosowanych w przemyśle. Jako, że wzrost świadomości negatywnych następstw ecentryczności wpłynął na zmianę procedury rozstawu centralizatorów na kolumnie rur (Rysunek 44), jest możliwe, iż analiza wpływu innych niedoskonałości przestrzeni pierścieniowej będzie miała realny wpływ na praktykę stosowaną w przemyśle.



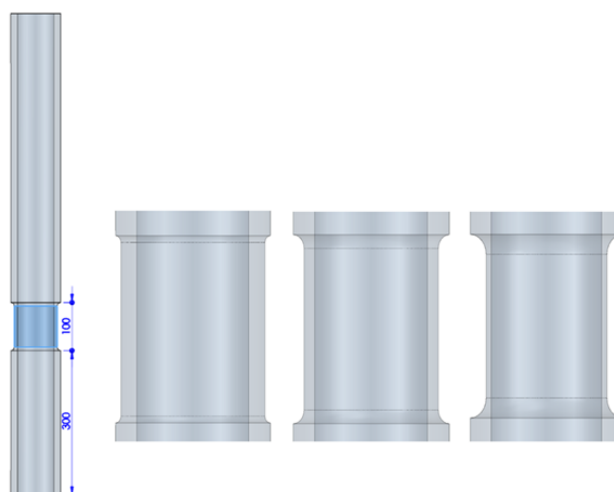
Rysunek 44 Wizualizacja budowy i umieszczenia jednego z typów centralizatorów obecnie stosowanego w przemyśle wydobywczym [73]

Co więcej, ze względu na zastosowane natężenie przepływu również i ta część badawcza może przyczynić się do wzrostu świadomości o konsekwencjach braku koncentryczności rury i odwiertu, a co za tym idzie wpłynąć pozytywnie na zmianę procedury umieszczania centralizatorów w przemyśle.

### Lokalne zwężenie

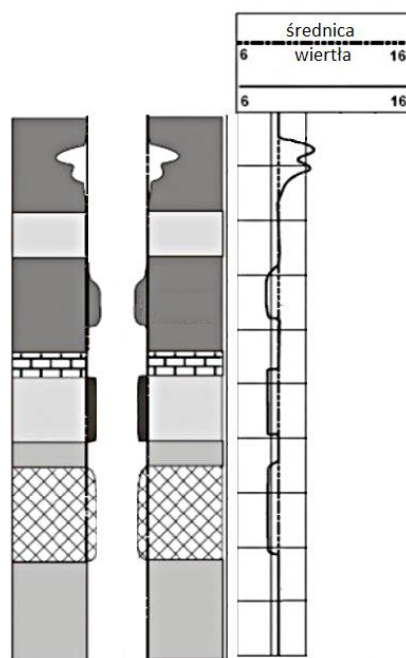
Kolejne trzy przypadki reprezentują sytuację, w której prześwit został zredukowany równomiernie w pełnym zakresie kątowym. W tych przypadkach prześwit został zmniejszony o 25%, 50% i 75% dla przypadku charakteryzującego się największymi zmianami. Wartości procentowe odpowiadają redukcji różnicy między promieniami. Wysokość i położenie zwężenia

pokazano na Rysunku 45. Krawędź została wygładzona przez dodanie maksymalnego symetrycznego zaokrąglenia w celu lepszego odzwierciedlenia warunków odwiertu. Wizualizację prezentują geometrie powstałe w wyniku odjęcia od przestrzeni koncentrycznej przeszkód uzyskanych dzięki metodzie wydruku FDM (ang. Fused Deposition Modeling). Przeszkody przepływu zostały wydrukowane przy użyciu terpolimeru akrylonitrylo-butadieno-styrenu (ABS). Dopuszczalny przez producenta drukarki 3D błąd wymiarowy wynosi poniżej 0,2%.



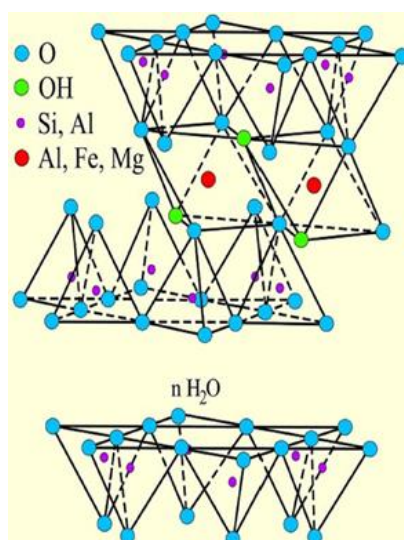
Rysunek 45 Przestrzenie pierścieniowe ze zwężeniem, począwszy od lewej strony 25%, 50% i 75%

Geometrie tego typu reprezentują sytuację otworową, w której doszło do spęczenia formacji iłowych lub równomiernego osunięcia się ściany odwiertu w przypadku sypkich, niestabilnych formacji skalnych. Może być także wynikiem równomiernego osadzania się nieodprowadzonych zwiercin na powierzchni ściany odwiertu. Zmiany te są łatwe do wychwycenia z użyciem standardowego pomiaru kawernomierzem (Rysunek 46).



Rysunek 46 Obrazowanie wyniku badania kawernomierzem (prawa strona) z zestawieniem warstw skalnych (lewa strona) [74]

Jak już wspomniano, taka sytuacja jest zwykle wynikiem obecności niestabilnych formacji skalnych, zwłaszcza efektu pęcznienia iłłów. Problem ten dotyczy głównie trójwarstwowych formacji ilastych, gdzie warstwa oktaedryczna występuje pomiędzy dwiema warstwami tetraedrycznymi (Rysunek 47). Między pakietami smektytu występują siły van der Waals, które nie są w stanie zapobiec wymianie kationów. Taka struktura pozwala na absorpcję cząsteczek wody, które prowadzą do ekspansji kierunkowej. W wyniku tego objętość formacji ilastych z grupy montmorylonitowej może ulec podwojeniu [75].

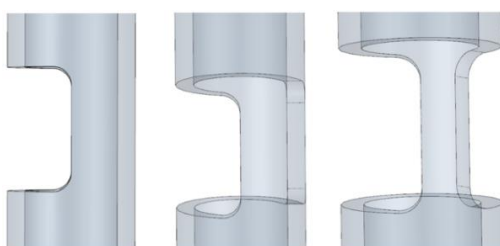


Rysunek 47 Struktura montmorylonitu [76]

Innym mechanizmem powodującym efekt miejscowego zwężenia odwiertu jest proces przewiercania naprzemiennie ułożonych twardych i miękkich formacji skalnych. Przechodzące przez miękki materiał skalny wiertło ma tendencję do powiększania średnicy otworu. Efekt ten jest również pochodną parametrów wiercenia, które muszą stale dostosowywać się do ciągle zmieniających się warunków litologicznych.

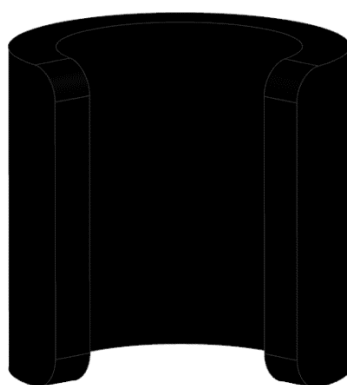
### Częściowe zamknięcie przestrzeni pierścieniowej

Ostatnie trzy geometrie odzwierciedlają sytuację, w której prześwit został częściowo zamknięty (Rysunek 48).



Rysunek 48 Częściowe zamknięcie przestrzeni pierścieniowej, począwszy od lewej strony 50%, 75% i 90%

Podobnie jak miało to miejsce w przypadku przestrzeni pierścieniowych z lokalnym zwężeniem, przeszkody przepływu potrzebne do analizy tych niedoskonałości w odwiercie, zostały wydrukowane z użyciem drukarki 3D typu FDM. Ich wysokość ponownie wyniosła 100mm, co stanowi 1/10 analizowanego odcinka. Rogi blokad przepływu zostały zaokrąglone promieniem 10mm w celu lepszego odwzorowania rzeczywistych warunków otworowych.

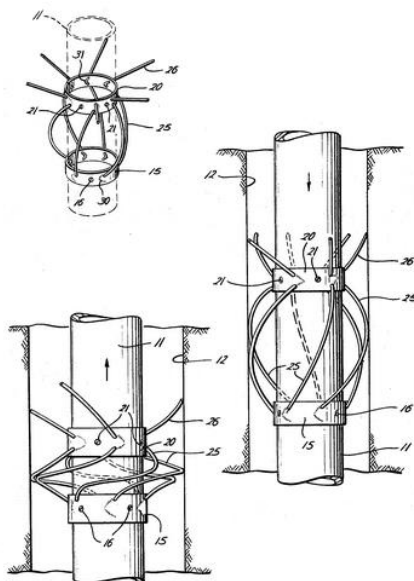


Rysunek 49 Wizualizacja modelu przeszkody przepływu zamykającej prześwit w 75%

Podobna geometria może wystąpić w warunkach rzeczywistych w wyniku nierównomiernego osadzania się zwiercin skalnych zamykając w ten sposób przepływ w części

zakresu kąтового. Innym scenariuszem, w wyniku którego może powstać podobna struktura, jest wytworzenie się kanału dla przepływającej płuczki po osunięciu się ściany odwiertu. W rezultacie może powstać stosunkowo wąski kanał pozwalający na kontynuację cyrkulacji w odwiercie. Powstanie takiej sytuacji jest widoczne w postaci wzrostu ciśnienia tłoczenia agregatu płuczkowego. Warto podkreślić, iż lokalna utrata koncentryczności odwiertu z kolumną rur, w której stopień ecentryczności jest bardzo wysoki lub dochodzi już do kontaktu ściany odwiertu z kolumną, może być uznana za taki typ niedoskonałości w przestrzeni pierścieniowej. O ile w wertykalnych częściach odwiertu jest to mało prawdopodobne, to w przypadku odcinków kierunkowych czy horyzontalnych, gdzie wiertło przechodzi przez różne typy formacji skalnych, wystąpienie takiego scenariusza jest bardzo prawdopodobne.

W celu eliminacji sytuacji częściowego zamknięcia przestrzeni pierścieniowej w wyniku osypywania się ścian odwiertu lub osadzania się niewypłukanych zwiercin skalnych, na kolumnie rur montuje się sprzęt mający na celu rozbicie tych struktur (Rysunek 50). Badania przedstawione w tej rozprawie mogą zatem wpływać na zmianę procedur branżowych dotyczących korzystania z tego typu urządzeń.



Rysunek 50 Urządzenie do oczyszczania ścian odwiertu z amerykańskiego zgłoszenia patentowego z 1969 [77]

### Czujniki przewodności

Budowa stanowiska pozwoliła na zmianę stopnia ecentryczności, jak również implementację różnego typu przeszkód przepływu z wykorzystaniem tej samej przezroczystej rury zewnętrznej i aluminiowej rury wewnętrznej. W tak przygotowanej przestrzeni pierścieniowej na

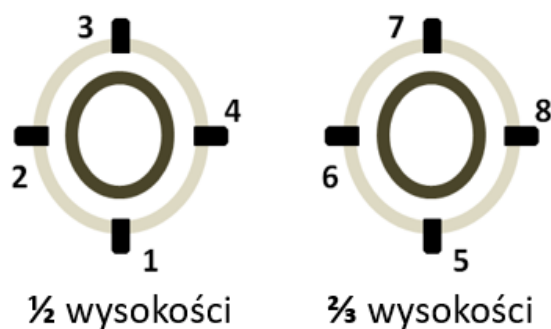


dwóch poziomach (1/2 i 2/3 wysokości) wywiercono 8 otworów co 90 stopni, w których umieszczono konduktometry (Rysunek 51). Ta metoda pozwoliła na pośrednie określenie skuteczności wyparcia cieczy wypieranej poprzez pomiar przewodnictwa elektrycznego będącego w pobliżu płynu. Należy zaznaczyć, iż jest to najbardziej dokładna metoda pomiarowa wykorzystywana w tego typu badaniach. Prace oparte na analizie obrazu zarejestrowanego podczas procesu wypierania są w oczywisty sposób obarczone dużą niepewnością wyników. Pomiar przewodności cieczy w jednym punkcie na wylocie z układu niesie ze sobą ryzyko, iż mieszanina na tym etapie nie będzie homogeniczna, a co za tym idzie, odczyty czujnika będą zależały od jego położenia w przekroju poprzecznym wylotu. Co więcej, wykorzystanie ośmiu czujników na dwóch poziomach niesie za sobą możliwość analizy, gdzie ciecz wypierająca wyparła ciecz wypieraną. Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia pomiarów w ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej, czy wykorzystaniu hamulców przepływu zamykających ich prześwit w części zakresu kąтового.



Rysunek 51 Zdjęcie stanowiska badawczego obrazujące rozstaw konduktometrów (sond SI 3013) na stanowisku badawczym

Sondom i odpowiadającym im czujnikom zostały przypisane numery przedstawione na Rysunku 52. Warto zaznaczyć, że równomierne rozłożenie czujników było podyktowane możliwością analizy procesu wypierania również podczas implementacji ruchu obrotowego wewnętrznej kolumny. Inne, nierównomierne rozłożenie oznaczałoby brak informacji o wpływie prędkości ruchu obrotowego na skuteczność wyparcia.



Rysunek 52 Przypisane numery dla kanałów czujników przewodności

Jedną z głównych zalet użytych sond SI 3013 była ich geometria, która w minimalnym stopniu wpłynęła na kształt przestrzeni pierścieniowej. Jest to typ sondy z dwoma płaskimi elektrodami. Maksymalne uzyskane odstępstwo promieniowe od obrysu wewnętrznej ściany kolumny rur spowodowane przez obudowę sondy wynosiło poniżej 1mm. Jest to szczególnie istotna kwestia, gdyż sama sonda mogłaby stanowić przeszkodę przepływu zaburzając otrzymywane wskazania.



Rysunek 53 Widok boczny sondy SI 3013 [78]

Sygnal z sond przekazywany był do przetworników przewodności c3630 firmy B&C. Ich wykorzystanie umożliwiało precyzyjną kalibrację układu, a co za tym idzie minimalizację błędów wskazań.



Rysunek 54 Przetwornik przewodności c3630 firmy B&C [78]

Wyjście sygnałowe: 4/20 mA  
Zakres: 0/1999  $\mu$ S  
Współczynnik kompensacji temperatury: 0/4.0 %/°C  
Dokładność: 1  $\mu$ S [78]

Punkt zerowy czujników ustawiono dla odczytu czystej wody w temperaturze 20 stopni Celsjusza, a czułość skalibrowano z wykorzystaniem alkoholu izopropylowego o czystości 99,9%. Poprawność wskazań systemu została zwalidowana za pomocą 0,1% roztworu NaCl w wodzie. Maksymalna różnica wskazań była mniejsza niż 0,2%. Następnie dokonano pomiarów wskazań przewodności dla przygotowanych mieszanek płynów, gdzie do cieczy wypieranej dodawano zawsze 0,1% masy NaCl w celu uzyskania wyraźnego kontrastu przewodności elektrycznej. Wskazania przewodników były wyświetlane na stanowisku badawczym, jak również były przekazywane i magazynowane na przygotowanej jednostce centralnej (Rysunek 55).



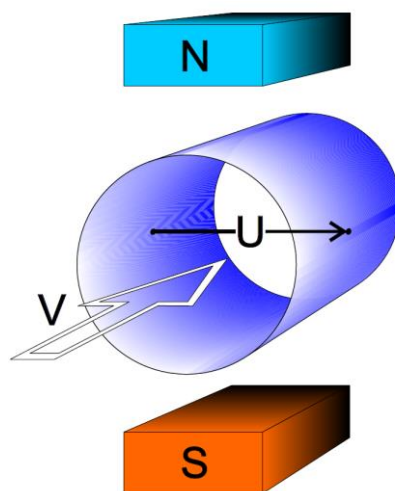
Rysunek 55 Skalibrowane przetworniki przewodności elektrycznej

### Czujnik natężenia przepływu

Analogiczną procedurę walidacji przeprowadzono dla wykorzystanego czujnika natężenia przepływu (Techmag, FMP300). Odbyła się ona na podstawie porównania wskazań czujnika z czasem potrzebnym do napełnienia zbiornika 50 l. Ustawione prędkości przepływu były identyczne do tych stosowanych podczas eksperymentów. Błąd wskazania w tym przypadku był mniejszy niż 0,5% (0,476% najwyższa wartość uzyskanej różnicy między wskazaniem czujnika, a wynikiem pomiaru).

Wykorzystany czujnik natężenia przepływu zaliczał się do grona przepływomierzy elektromagnetycznych wykorzystujących zjawisko indukcji elektromagnetycznej opisanej prawem Faradaya. Przepływająca ciecz, pełniąc rolę przewodnika, indukuje siłę elektromotoryczną w polu

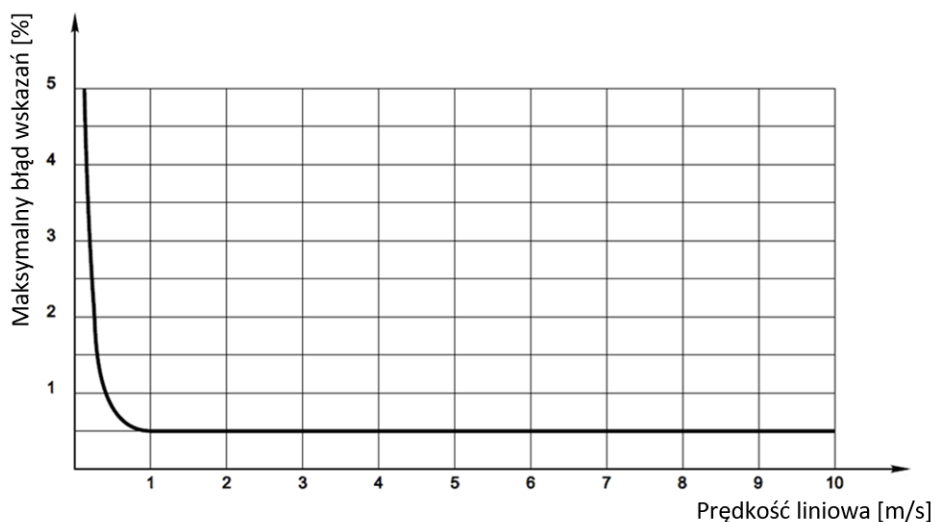
magnetycznym zależną od natężenia tego pola oraz prędkości ruchu cieczy. Uzyskany w ten sposób sygnał elektryczny przekazywany był do transmitera, który na tej podstawie wyznaczał aktualne natężenie przepływu. Rozwiązanie to pozwalało na wykorzystanie zawiesin wodnych, jak również uzyskanie wysokiej dokładności pomiarów. Dodatkową zaletą pomiaru natężenia przepływu z użyciem wykorzystanego czujnika była odporność pomiarów na zmiany gęstości, ciśnienia, lepkości czy temperatury cieczy.



Rysunek 56 Schemat działania przepływomierza elektromagnetycznego [79]

Ze względu na zakres pomiarowy czujnika (Rysunek 57) wynikający z ograniczeń zastosowanej technologii, minimalne natężenie tłoczenia musiało być wyższe niż 1,257l/s. Podczas testów niemal wszystkie scenariusze zakładały natężenia na poziomie 2l/s lub 4 l/s. W przypadku uzyskania różnicy natężenia przepływu na poziomie wyższym niż 2% test danego scenariusza był powtarzany.

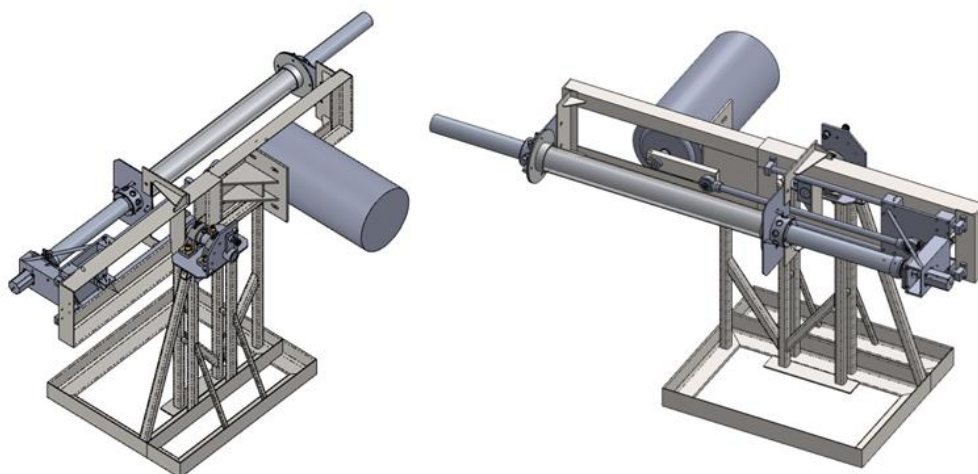
Warto zaznaczyć, iż producent wskazuje jako minimalne natężenie przepływu wartość 0,5l/s [79].



Rysunek 57 Wartość maksymalnego błędu wskazań przepływomierza w zależności od prędkości liniowej [79]

### Złożenie stanowiska

W wyniku prac zbudowane zostało stanowisko badawcze, którego wizualizację głównej części przedstawiono na Rysunku 58. Ze względu na przejrzystość grafiki, nie uwzględniono na niej czujników przewodności jak i przewodów hydraulicznych widocznych na kolejnych zdjęciach.



Rysunek 58 Wizualizacja stanowiska badawczego do pomiaru stopnia wyparcia cieczy wypieranej

Agregat płuczkowy widoczny w tle na Rysunku 59 (kolor żółty) pompował ciecz wypieraną w komorze mieszalnika w układzie zamkniętym. Po przesterowaniu zaworu trójdrogowego na wyjściu, ciecz trafiała do czujnika natężenia przepływu (na zdjęciu znajdującego się za wózkiem), a stamtąd do rozdzielacza przepływu widocznego na dole rysunku. Warto zaznaczyć, że wykorzystane wzmacniane przewody hydrauliczne, jak również ich połączenia zostały dobrane

tak, aby zapewnić maksymalnie zbliżone natężenie przepływu w każdym z nich. Ścianka przewodów z dwoma oplotami umożliwiała wytrzymanie ciśnienia 330 barów. Taka wartość była zbędna na stanowisku, jednak tak sztywne przewody zapewniały zachowanie przekroju poprzecznego wewnętrznych kanałów w przypadku lokalnych zagięć wynikających z drogi ich przeprowadzenia, których nie udało się całkowicie wyeliminować.

Rozdzielony przepływ trafiał przez złącza kątowe 90° umiejscowione w ośmiu punktach do komory widocznej na rysunku poniżej przestrzeni pierścieniowej omówionej w dalszej części rozdziału. Celem tak dużej inwestycji czasu i środków w tę część stanowiska, było uzyskanie maksymalnie równomiernego natężenia przepływu w przestrzeni pierścieniowej w pełnym jej zakresie kątowym (dla przypadku koncentrycznego). Przewodność przepływającego w pobliżu sond płynu była przez cały czas monitorowana, a sygnał przekazywany najpierw do przetworników, a następnie do jednostki centralnej. Płyn następnie trafiał do drugiej komory znajdującej się nad przestrzenią pierścieniową, gdzie ponownie położono nacisk na jego równomierne odprowadzanie, aby nie zakłócać wyników, szczególnie w górnej części stanowiska. Przewody wyjściowe połączone zostały do kolektora i stamtąd ciecz była odprowadzana z układu.



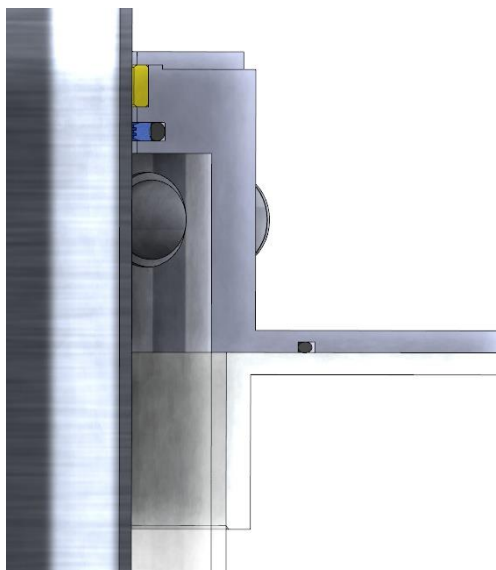
Rysunek 59 Zbudowane stanowisko badawcze

Uzyskanie najważniejszej innowacji w budowie stanowiska - ruchu posuwisto-zwrotnego wewnętrznej rury, nie byłoby możliwe bez opracowania geometrii komór na wejściu i wyjściu z przestrzeni pierścieniowej. Wymagało to rozwiązania problemu, który został wskazany w pracy

Deawwanich [28] jako ważny kierunek rozwoju badań, czyli stworzenie systemu uszczelnień umożliwiających ruch posuwisto-zwrotny i obrotowy kolumny.

Kolejnym wyzwaniem podnoszącym stopień złożoności komór było umożliwienie zmiany położenia osi wewnętrznej kolumny względem zewnętrznej, przezroczystej rury. Spełnienie tego wymagania umożliwiało analizę przypadków wpływu ecentryczności na proces wypierania.

Dodatkowo, komora musiała być łatwo demontowalna, umożliwiając w ten sposób wprowadzanie do przestrzeni pierścieniowej zaprojektowanych i wydrukowanych przeszkód przepływu. Ostatecznie zaprojektowana komora odprowadzająca jest przedstawiona na Rysunku 60. Jak podkreślono, istotną jej składową jest system uszczelnień. Elementy te musiały działać poprawnie również w przypadku zawiesin wodnych. Kolorem czarnym oznaczono pierścienie uszczelniające typu o-ring, kolorem niebieskim – uszczelnienie osiowo-promieniowe o podwyższonej wytrzymałości, a kolorem żółtym - rękaw prowadzący. Ostatecznie wewnątrz komory zostało dodatkowo wytoczone w kierunku promieniowym, aby zredukować zmiany geometrii przy ustawieniu niekoncentrycznym. Widoczna w środkowej części rysunku rurka to wyprowadzenie do podłączenia złącza kąтового 90°.

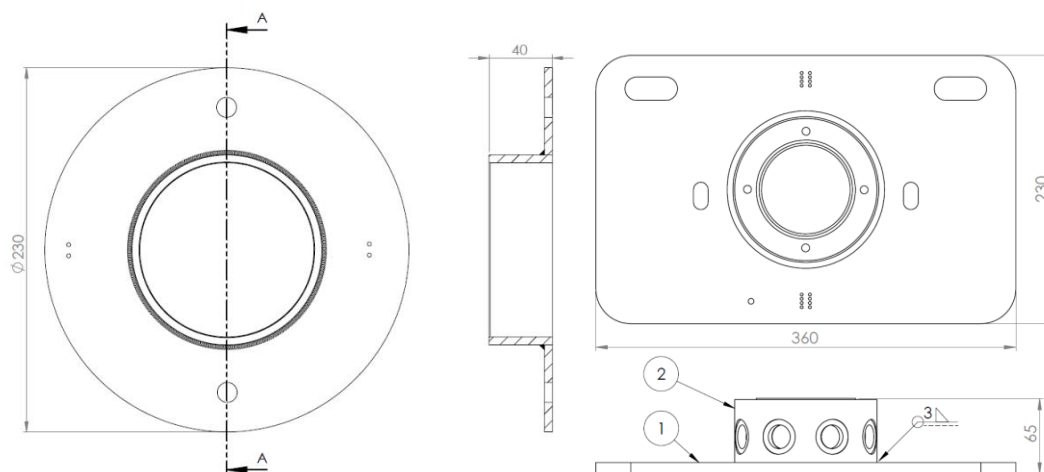


Rysunek 60 Wizualizacja przekroju poprzecznego komory wylotowej

Część widoczna po lewej stronie Rysunku 61 była trwale zamocowana do przezroczystej rury zewnętrznej, podczas gdy element widoczny po prawej stronie, stanowiący główny komponent komory, był mocowany do stelaża stanowiska badawczego. Otwory przelotowe tzw. „fasolki” położone przy wewnętrznym otworze umożliwiały przesunięcie wewnętrznej rury w kierunku promieniowym, podczas gdy dwie grupy 8 otworów widoczne na górze i dole elementu,



służyły do ustawiania dokładnego położenia. W te otwory wsuwane były piny ustalające wykonane z pasowaniem h7.



Rysunek 61 Rysunki złożeniowe wybranych elementów ze stanowiska badawczego

Każdy z elementów stanowiska był następnie wykonany w wewnętrznym warsztacie Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej. Zdecydowana większość z frezowanych elementów została wykonana z aluminium gatunku PA38, poza stelażem stanowiska (widocznym na Rysunku 59 w kolorze niebieskim), który został wykonany ze stali konstrukcyjnej ogólnego przeznaczenia S235 JR. Kluczowe wymiary, a także położenie otworów ustalających, zostały zmierzone za pomocą obrabiarki numerycznej o dokładności pozycjonowania  $5\mu\text{m}$  i sondy Renishaw OMP40-2 o powtarzalności  $1\mu\text{m}$ . Zsumowany maksymalny błąd dla łańcucha wymiarów wynosił poniżej  $0,07\text{mm}$ , co stanowi poniżej 1,95% odległości przesunięcia między stanem koncentrycznym, a najmniejszym analizowanym stopniem ecentryczności wynoszącym 25%.



Rysunek 62 Wyfrezowany główny element komory odprowadzającej

Ważną cechą stanowiska jest możliwość pochylenia głównej osi przestrzeni pierścieniowej w zakresie od 0 do 90° (Rysunek 63). Dzięki temu możliwym było przeprowadzenie pomiarów w scenariuszu symulującym odcinek odwiertu kierunkowego lub nawet horyzontalnego. Jednak ze względu na problemy związane z brakiem możliwości wytworzenia granicy faz w przestrzeni pierścieniowej dla ustawień bliskich horyzontalnym, badania skupiły się na analizie przypadków charakteryzujących się pochyleniem osi od 0° do 45°. Możliwością eliminacji tego ograniczenia byłaby implementacja 8 elektrozaworów podłączonych pomiędzy złączami kątowymi 90°, a komorą wlotową do przestrzeni pierścieniowej. Takie rozwiązanie jednak, oznaczałoby intensywną akcję mieszania i rozmycie się granicy faz już w komorze, co w istotny sposób wypłynęłoby na wyniki. Z tego względu zrezygnowano z wprowadzenia tego rozwiązania.

Co istotne, pochylenie stanowiska nie eliminowało możliwości implementacji ruchu posuwisto-zwrotnego czy obrotowego wewnętrznej rury.



Rysunek 63 Pochylenie osi stanowiska o 30°

Kluczową wartością pracy była możliwość badania wpływu ruchu posuwisto-zwrotnego na proces wypierania. Eksperymentalna analiza procesu wypierania w przestrzeni pierścieniowej przy implementacji tego ruchu nie była do tej pory opisana w żadnej publikacji dostępnej w otwartej literaturze.

Rozbicie systemów ruchu posuwisto-zwrotnego i obrotowego umożliwiło przeprowadzanie testów przy scenariuszach niezależnej implementacji tych ruchów jak i wykorzystania ich jednocześnie. Na dole Rysunku 64 widoczne jest mocowanie silnika obrotowego połączone z wagonem osadzonym na wałkach prowadzących. Jako silnik do realizacji ruchu

obrotowego wykorzystano silnik krokowy o maksymalnym momencie obrotowym 4Nm. Dodatkowo do systemu wprowadzono regulator obrotów umożliwiając płynną zmianę prędkości obrotowej. Podczas testów maksymalna zastosowana prędkość obrotowa aluminiowej rury wynosiła 120 obrotów na minutę.

W górnej prawej części Rysunku 64 widoczny jest trójfazowy silnik z hamulcem i wbudowaną przekładnią, wykorzystany jako silnik ruchu posuwisto-zwrotnego. Do wału silnika przymocowane zostało ramię, które z kolei zostało połączone niebieską liną polipropylenową z wagonem. Uzyskany zakres ruchu rur wynosił połowę wysokości przestrzeni pierścieniowej czyli 0,5m. Ciężar tej części układu był na tyle duży, iż ruch kolumny w dół był płynny i nie dochodziło do chwilowych zatrzymań spowodowanych oporami ruchu na uszczelnieniu przestrzeni pierścieniowej.



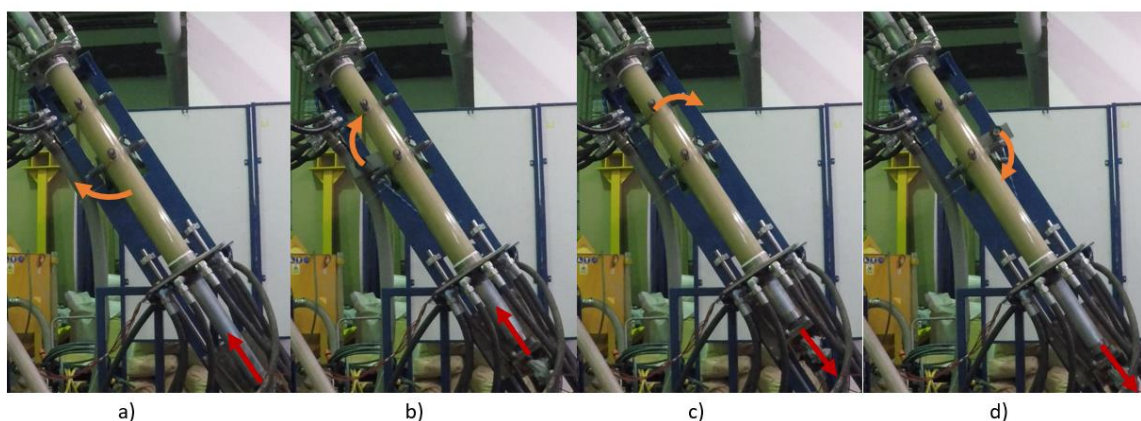
Rysunek 64 Zdjęcie stanowiska badawczego z widocznymi systemami ruchu obrotowego i posuwisto-zwrotnego

Brak sztywnego połączenia silnika ruchu posuwisto-zwrotnego z rurą symuluje rzeczywiste warunki, w których kolumna rur jest zawieszona na przewodach (Rysunek 65).



Rysunek 65 Wiertnia z widocznym systemem bloczkowym umożliwiającym zapuszczanie i wyciąganie kolumny rur

Jako prędkość ruchu posuwisto-zwrotnego wykorzystano dwie nastawy silnika z przekładnią dające pełny obrót wału w czasie 5 sekund i 2,5 sekundy. Jako, iż w tym czasie punkt na rurze aluminiowej pokonywał w sumie dystans jednego metra (0,5 ruch w górę + 0,5 metra ruch powrotny), dawało to zbliżoną prędkość liniową do warunków na wiertni i zrezygnowano z implementacji falownika. Oczywiście w warunkach rzeczywistych droga takiego ruchu przekracza często 10m i trwa kilkanaście sekund, co w warunkach laboratoryjnych nie było możliwe do uzyskania. Mimo to, uzyskane warunki zadowalająco symulowały rzeczywistą sytuację otworową.



Rysunek 66 Uzyskany ruch posuwisto-zwrotny na stanowisku

- a) rura aluminiowa w skrajnym, dolnym położeniu, wał silnika w położeniu bliskim  $0^\circ$ ; b) rura aluminiowa w położeniu pośrednim, wał silnika w położeniu bliskim  $90^\circ$ ; c) rura aluminiowa w skrajnym, górnym położeniu, wał silnika w położeniu bliskim  $180^\circ$ ; d) rura aluminiowa w położeniu pośrednim, wał silnika w położeniu bliskim  $270^\circ$

## Wykorzystane ciecze

Aby prowadzone doświadczenia w możliwie maksymalny sposób odzwierciedlały sytuację otworową, w oparciu o literaturę branżową przygotowany został zestaw 7 cieczy, których skład jest zbliżony do tych wykorzystywanych w przemyśle [80]. Skład cieczy dobrany został tak aby umożliwić analizę wpływu gęstości i lepkości na proces wypierania. Analiza została ograniczona do składu odpowiadającego wykorzystywanym płuczkom, cieczom przemysłowym i buforowym bez uwzględniania zaczynu cementowego z dwóch względów:

- niepełne wyparcie płuczki przez ciecze buforowe/przemysłowe i jej kontakt z zaczynem cementowym, jak zaznaczono wcześniej, jest niepożądaną sytuacją i może prowadzić do poważnych komplikacji, w tym do porzucenia odwiertu,
- pomimo, iż zastosowany agregat przystosowany jest do tłoczenia zaczynu cementowego, niewypłukane jego pozostałości w innych częściach stanowiska mogłyby zakłócać wyniki kolejnych testów, a nawet uniemożliwić kontynuację prac.

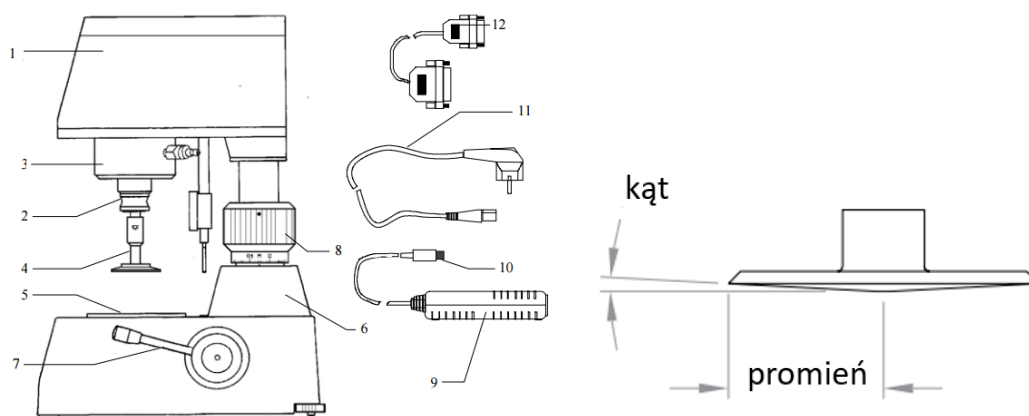
W Tabeli 2 przedstawiony został udział masowy poszczególnych składników wykorzystanych w badaniach cieczy, gdzie udział wody uzupełniał zawsze 100%.

Tabela 2 Skład analizowanych cieczy

Numer cieczy	Skład (udział wagowy)
I	woda
II	woda + bentonit 30%
III	woda + bentonit 1% + guamol 1%
IV	woda + bentonit 1% + guamol 1% + baryt 20%
V	woda + bentonit 5% + guamol 1%
VI	woda + bentonit 5% + guamol 5%
VII	woda + bentonit 5% + guamol 5% + baryt 20%

W oczywisty sposób większy dodatek masowy polimeru guamol będzie prowadził do wyraźnego wzrostu lepkości, podczas gdy baryt za sprawą swojej gęstości przekraczającej  $4,3\text{g}/\text{cm}^3$  stosowany jest w sytuacjach kiedy niezbędne jest podniesienie gęstości płuczki. W celu ustalenia dokładnych wartości reologicznych, zlecono wykonanie tych pomiarów na Wydziale Chemicznym Politechniki Gdańskiej.

Pomiary przeprowadzono na reometrze rotacyjnym Brookfield R / S-CPS +, typu stożkowo-płytkowego (Rysunek 67). Wyniki zostały przetworzone przy użyciu oprogramowania Rheo3000.

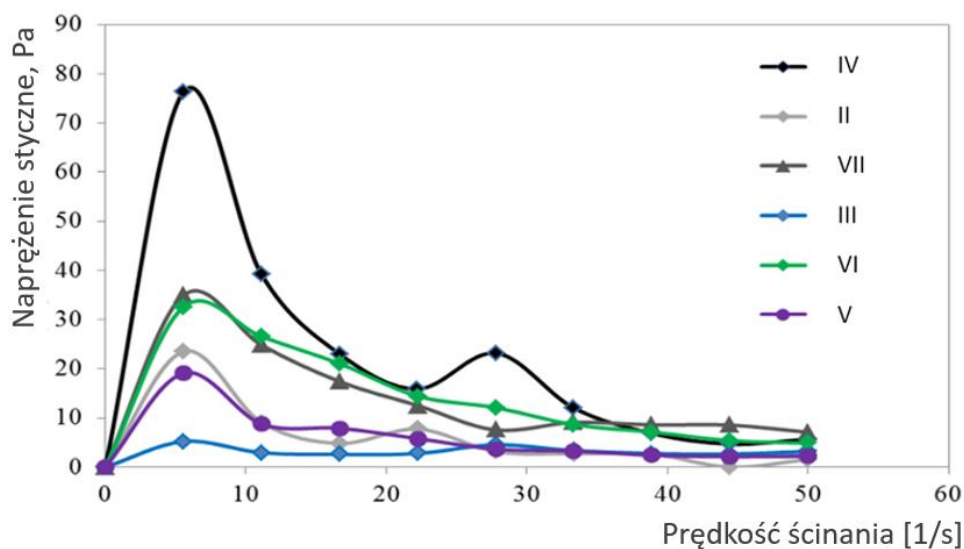


Rysunek 67 Schemat budowy reometru Brookfield R/S-CPS+ [81]

Badanie przeprowadzono przy kontrolowanym zwiększaniu prędkości ścinania od 1 do 50  $s^{-1}$  przez 30 sekund i stałej szybkości ścinania 50  $s^{-1}$  w tym samym okresie. Bezpośrednio przed rozpoczęciem pomiarów płyny homogenizowano przez 120 sekund w celu zapewnienia jednorodności cieczy osiąganey w warunkach rzeczywistych podczas akcji mieszania w agregacie płuczkowym.

Zgodnie z oczekiwaniami naprężenie styczne w analizowanych cieczach malało wraz ze wzrostem prędkości ścinania (zakres od 5-50 $s^{-1}$ ). Na przebiegu części krzywych, szczególnie krzywej przedstawiającej wynik cieczy numer IV, widoczne są nieliniowe zaburzenia, które mogą być efektem niejednorodności układu ciecz-ciało stałe. Jest to bardzo prawdopodobne ze względu na wysoki udział masowy barytu (20%) w składzie tej cieczy. Przebieg krzywej dla cieczy IV należy traktować jako błąd wynikający z niedoskonałości metody pomiarowej nieprzystosowanej do badania zawiesin o udziale cząsteczek o relatywnie dużym ziarnie. Na podstawie pozostałych pomiarów i składu cieczy można założyć, iż prawdziwa lepkość tej cieczy jest mniejsza niż cieczy VII, co pokazują krzywe w ich końcowej fazie.





Rysunek 68 Zależność szybkości ścinania od napężenia stycznego w  $T=25^{\circ}\text{C}$  [81]

Potwierdzają to również obserwacje cieczy po przeprowadzonym pomiarze, gdzie widoczne były aglomeraty materiału stałego (Rysunek 69). Zjawisko to mogło doprowadzić do zniekształcenia części wyników szczególnie dla próbek charakteryzujących się wysokim udziałem barytu (IV i VII)



Rysunek 69 Zdjęcie aglomeratów cząsteczek stałych po przeprowadzonym pomiarze [81]

Zgodnie z oczekiwaniami, ciecze charakteryzujące się wyższym udziałem polimeru naturalnego guamol, charakteryzują się wyższą lepkością. Widać jednocześnie, iż dodatek barytu ma znikomy wpływ na lepkość cieczy (VI i VII). Co więcej, uzyskane niewielkie różnice mogą wynikać z ograniczeń metody pomiarowej dla zawiesin.

Początkowo planowano do każdej cieczy dodawać niewielką ilość pigmentu celem uzyskania wyraźnego kontrastu między płynem wypieranym i wypierającym, jak również aby

możliwa była obserwacja optyczna rozmycia i migracji granicy faz. Jednak, osadzający się na powierzchni elektrod pigment zakłócał odczyty przewodności, a próby jego usunięcia długotrwałym płukaniem nie przyniosły zadowalającego efektu. Jego całkowite usunięcie oznaczało konieczność rozłożenia stanowiska po każdym teście, co narażało sondy pomiarowe na uszkodzenie. Pomimo prób z różnego rodzaju pigmentami konieczne było zrezygnowanie z tego rozwiązania.

#### **4.2. Przebieg testów**

Przed każdym testem układ płukany był czystą wodą tłoczoną przez agregat płuczkowy, aż czujniki przewodności wskazywały zero. Ruchy siłowników, jak również pozostałe parametry były ustawiane na wcześniej zdefiniowane wartości. Następnie przygotowywano zarówno ciecz wypieraną jak i wypierającą. Ciecz wypierająca była przez cały czas mieszana w obiegu zamkniętym agregatu. W tym czasie ciecz wypierana była mieszana w oddzielnym zbiorniku, przy użyciu mieszadła elektrycznego. Zawór na wyjściu z agregatu był przesterowany tak, aby ciecz wypierająca wypełniła układ aż do podstawy przestrzeni pierścieniowej. Gdy do tego dochodziło, zawór agregatu był przełączany w pierwotną pozycję.

Bezpośrednio potem, od góry przestrzeni pierścieniowej wprowadzany był przewód podłączony do pompy odśrodkowej tłoczącej ciecz wypieraną z natężeniem 10l/min. Przewód był ustawiany na poziomie cieczy wypieranej przy podstawie przestrzeni pierścieniowej, a jego koniec wyposażony był w specjalny koszyczek redukujący prędkość wypływającej cieczy. Wszystko miało na celu redukcję mieszania się cieczy przed rozpoczęciem testu. Równolegle włączana była aparatura pomiarowa.

Po napełnieniu całej przestrzeni pierścieniowej, przewód był wyjmowany, a górna część stanowiska zabezpieczana. Natychmiast po tym ciecz wypierająca, która do tej pory przez cały czas była mieszana w agregacie, kierowana była do stanowiska. Dodatkowo następowało włączenie silników. Badanie przerywano po przetłoczeniu 5 objętości przestrzeni pierścieniowej. Zarejestrowane dane były zapisywane i katalogowane, a układ był przygotowywany do kolejnego testu.

Przygotowanie pojedynczego scenariusza trwało od 30 minut do 2 godzin (w przypadku zmiany geometrii przestrzeni pierścieniowej). Łącznie przeprowadzono 104 pomiary, z których 66 zostało opisanych w rozprawie. Głównym powodem odrzucenia pozostałych wyników było niespełnienie założonego natężenia tłoczenia.

Próbkowanie natężenia przepływu i przewodności zostało ustawione na 1000Hz.



### 4.3. Analiza wyników

#### Obróbka danych

Rysunek 70 pokazuje nieprzetworzone dane z testowych pomiarów dla sond o numerach 1, 2, 3 i 4 dla koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej. Odczyty konduktywności zostały zmienione przez używane oprogramowanie dla wartości proporcjonalnych. Każdy wiersz reprezentuje zarejestrowany pomiar w odstępach czasu wynoszących 1ms. Im wyższy wiersz tym wcześniej został zarejestrowany. Przedstawiony wycinek zapisu został wybrany ze względu na wyraźne zmiany wartości, co wynika z faktu przechodzenia granicy faz przez pierwszy poziom sond. Fakt stopniowej zmiany wartości wskazuje na wystąpienie akcji mieszania się cieczy wypieranej i wypierającej. Intensywność tej akcji może być ustalona na podstawie dynamiki zmian wartości w każdej kolumnie. Im większa zmiana w analizowanym okresie czasu tym mniej rozmyta jest granica faz cieczy.

Jak zaznaczono wcześniej, do cieczy wypieranej dodawano NaCl w celu podniesienia jej przewodności, co oznacza, że im większy udział cieczy wypieranej znajdującej się w bezpośredniej bliskości sond pomiarowych tym wyższa jest przewodność i wyższe są wskazania czujników. O ile kolumny odpowiadające czujnikom 2,3 i 4 przedstawiają zbliżone wartości dla każdego z wierszy, to wskazania czujnika numer 1 są nieznacznie wyższe. Wskazuje to na niewielką fluktuację rozmytej granicy faz dla przekroju poprzecznego na wysokości pierwszych czterech sond. Zjawisko takie jest jak najbardziej naturalne i spodziewane, co więcej, można było je obserwować również w wynikach badań Deawwanich z 2013 [28].

2,3979187012	2,2917175293	2,2734069824	2,2798156738
2,3936462402	2,2839355469	2,2644042969	2,2764587402
2,3760986328	2,3202514648	2,2683715820	2,2958374023
2,3675537109	2,2988891602	2,2752380371	2,2669982910
2,3846435547	2,2779846191	2,2599792480	2,2917175293
2,3751831055	2,2753906250	2,2805786133	2,3107910156
2,3747253418	2,2834777832	2,2760009766	2,2755432129
2,3692321777	2,2808837891	2,2828674316	2,2692871094
2,3594665527	2,3060607910	2,2566223145	2,2732543945
2,3802185059	2,2744750977	2,2747802734	2,2651672363
2,3541259766	2,2987365723	2,2442626953	2,2679138184
2,3501586914	2,2804260254	2,2663879395	2,2691345215
2,3503112793	2,2731018066	2,2517395020	2,2801208496
2,3699951172	2,2669982910	2,2645568848	2,2520446777
2,3481750488	2,2521972656	2,2506713867	2,2850036621
2,3374938965	2,2543334961	2,2555541992	2,2618103027
2,3521423340	2,2592163086	2,2386169434	2,2576904297
2,3400878906	2,2953796387	2,2482299805	2,2686767578
2,3078918457	2,2476196289	2,2402954102	2,2367858887
2,3451232910	2,2744750977	2,2329711914	2,2662353516
2,3348999023	2,2572326660	2,2329711914	2,2541809082
2,3281860352	2,2384643555	2,2264099121	2,2436523438
2,3196411133	2,2500610352	2,2103881836	2,2805786133
2,3393249512	2,2715759277	2,2235107422	2,2302246094
2,3219299316	2,2862243652	2,2293090820	2,2470092773
2,3202514648	2,2453308105	2,2261047363	2,2233581543
2,2853088379	2,2485351563	2,2183227539	2,2329711914
2,3258972168	2,24380049316	2,2178649902	2,2369384766
2,3245239258	2,2456359863	2,2004699707	2,2601318359
2,3107910156	2,2352600098	2,2062683105	2,2665405273
2,3004150391	2,2497558594	2,2093200684	2,2257995605
2,3275756836	2,2341918945	2,2105407715	2,2544860840
2,3173522949	2,2227478027	2,2090148926	2,2282409668
2,2927856445	2,24380049316	2,2143554688	2,2293090820
2,2830200195	2,2190856934	2,2207641602	2,2398376465
2,2830200195	2,2308349609	2,2067260742	2,2462463379
2,3088073730	2,2187805176	2,2018432617	2,2109985352
2,2766113281	2,2460937500	2,1983337402	2,2305297852
2,2819519043	2,2192382813	2,1960449219	2,2261047363
2,3011779785	2,2100830078	2,1829223633	2,2126770020
2,2833251953	2,2459411621	2,1980285645	2,2419738770
2,2738647461	2,2254943848	2,1975708008	2,2135925293

1

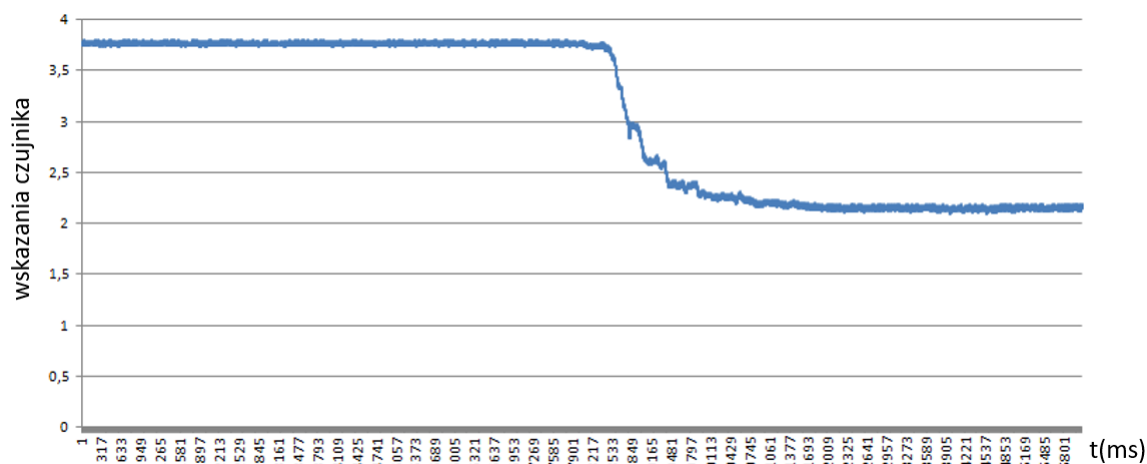
2

3

4

Rysunek 70 Zarejestrowany sygnał czterech pierwszych czujników przewodności podczas testów stanowiska

Po wyciągnięciu wartości średniej zapisu czterech czujników można przedstawić następujący wykres (Rysunek 71). Prezentuje on wskazania czujników od momentu włączenia aparatury badawczej na około 8 sekund przed rozpoczęciem tłoczenia, aż do jej wyłączenia po niemal 16 sekundach. Oczywiście z punktu widzenia analizy znaczenie ma jego środkowa część, czyli fragment od momentu rozpoczęcia tłoczenia do przetłoczenia pięciokrotności objętości przestrzeni pierścieniowej. Co jest jednak istotne, to stosunkowo niewielki czas potrzebny do osiągnięcia stanu równowagi na przebiegu wykresu, który po niespełna 4 sekundach od rozpoczęcia tłoczenia (~12 sekunda zapisu) osiąga już w przybliżeniu docelową wartość, podlegającą dalej już tylko niewielkim fluktuacjom. Taki *stan ustalony* jak został nazwany w badaniach Deawwanich z 2013 [28] jest charakterystyczną cechą każdego wykresu wypierania, również dla sytuacji, w których skuteczność wyparcia była wyraźnie mniejsza niż 100%. Mówi to dużo na temat znikomego wpływu czasu wypierania na skuteczność wyparcia w warunkach otworowych. Innymi słowy, wtłoczenie do odwiertu dodatkowej objętości zaczynu, jego odebranie na wypływie, a następnie utylizacja nie poprawi w widoczny sposób jakości wytworzonego płaszcza cementacyjnego. Dlatego krytyczne jest zapewnienie suboptymalnych procesów do wyparcia. W dalszej części rozdziału udowodnione zostało jak wyraźny wpływ ma na to geometria przestrzeni pierścieniowej i ruch kolumny rur.



Rysunek 71 Uśredniony zapis wskazań czujników przewodności w domenie czasu

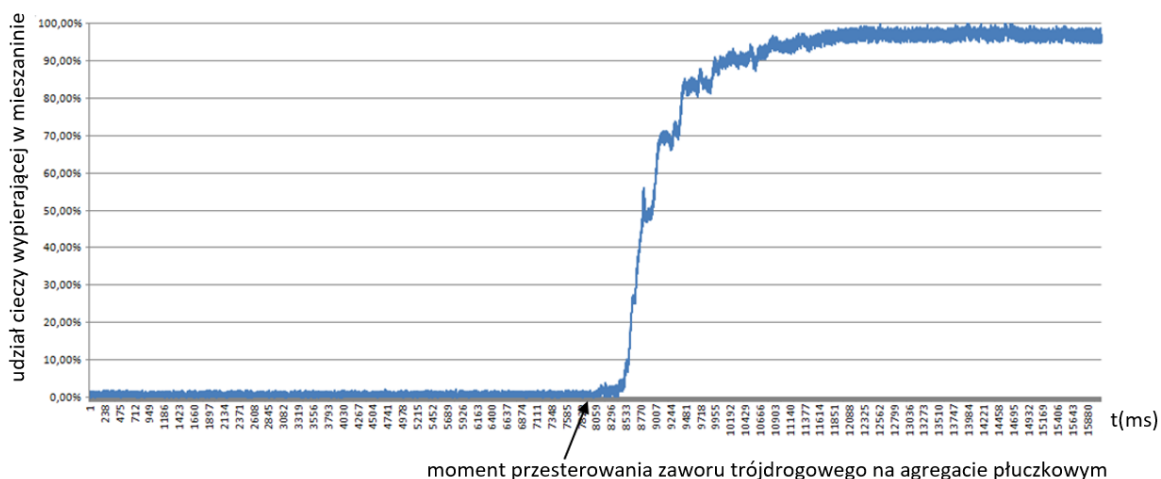
Jako skuteczność procesu wypierania można przyjąć stosunek objętości cieczy niewypartej do objętości przestrzeni pierścieniowej. Jako, że wykorzystana metoda pomiaru pośredniego oparta jest na przewodności, chwilowa skuteczność wyparcia określona może być na podstawie procentowego udziału cieczy przepływającej w sąsiedztwie elektrod sond, a ta z kolei może być wyznaczona z użyciem poniższego wzoru:

$$d = \frac{C - C_1}{C_0 - C_1} 100\% \quad (4.1)$$

gdzie: d - procentowa skuteczność wyparcia cieczy wypieranej  
 C - zarejestrowany sygnał przewodności mieszaniny obu cieczy  
 C<sub>0</sub> - zarejestrowany sygnał przewodności dla cieczy wypieranej  
 C<sub>1</sub> - zarejestrowany sygnał przewodności dla cieczy wypierającej

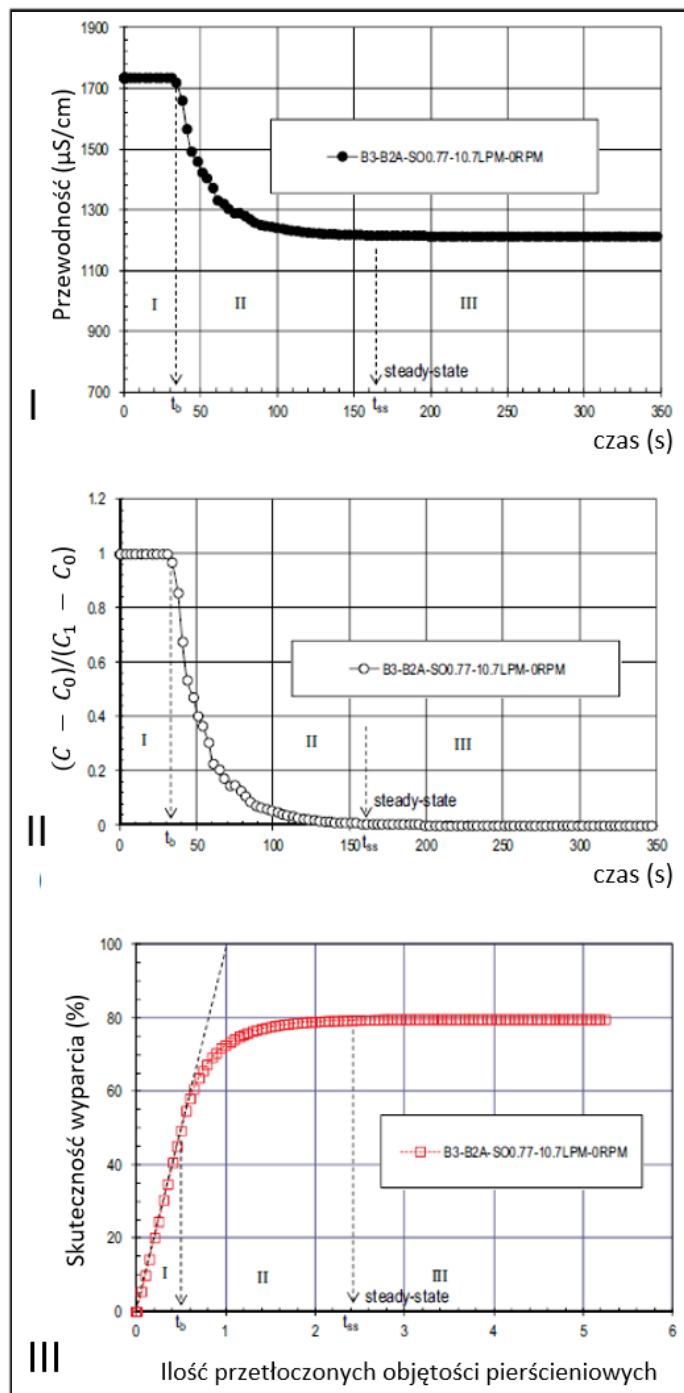
Równoległe do odczytów przewodności, monitorowana była chwilowa wartość natężenia przepływu. W rezultacie teoretycznie możliwe było określenie momentu otwarcia zaworu z dokładnością do 1ms (Rysunek 72). Dzięki tym danym możliwe było również określenie ilości przetłoczonych objętości pierścieniowych.

Rysunek 72 powstał na skutek podstawienia do wzoru 4.1 zmierzonych wartości czujników dla cieczy wypieranej, wypierającej oraz aktualnie przepływającej mieszaniny w bezpośrednim sąsiedztwie sond pomiarowych.



Rysunek 72 Przetworzony uśredniony zapis z 4 czujników przewodności

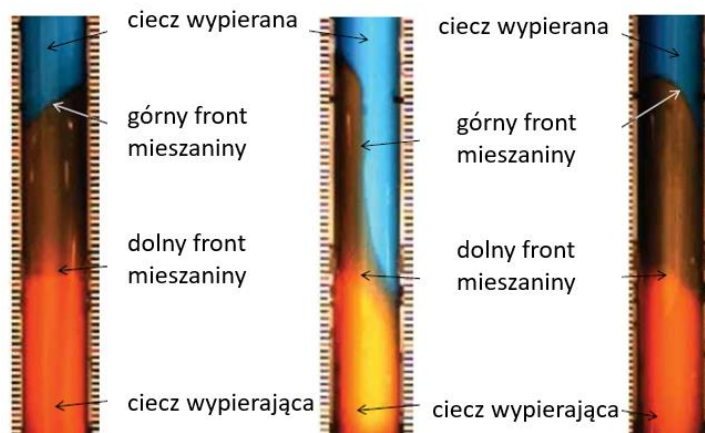
Przetworzone dane z sond zostały zsumowane dla każdego poziomu i uśrednione w celu wyeliminowania szumu sygnałowego i umożliwienia przeprowadzenia porównania między scenariuszami. Do celów prezentacji graficznej konieczne okazało się uśrednienie wyników poszczególnych kroków czasowych. Przeprowadzona została zatem analogiczna procedura, jak w badaniach Deawwanich z 2013 r. [28] (Rysunek 73). Przy analizie poszczególnych poziomów czujników, czas rozpoczęcia tłoczenia na wykresie został dopasowany do drogi potrzebnej na przebycie czoła cieczy wypieranej.



Rysunek 73 Procedura obróbki danych z badań Deawwanich z 2013, I - zapis przewodności, II – bezwzględna zmiana przewodności, III – skuteczność wyparcia [28]

W wielu przypadkach jednak, wyniki skuteczności procesu wyparcia uzyskane dla poszczególnych czujników będą miały większe znaczenie niż wynik uśredniony dla poziomu lub dla wszystkich czujników. Jak wcześniej wskazano, brak wyparcia płuczki z nawet niewielkiej części przestrzeni pierścieniowej może prowadzić do rozpoczęcia procesu korozji rury okładzinowej bądź wydobywczej. Można więc przyjąć, iż jakość płaszczka cementowego reprezentuje nie wynik

uśredniony, który często w otwartej literaturze jest podkreślany, a najniższy stopień wyparcia wskazywany przez dowolny czujnik. Jest to o tyle istotne, iż w przypadku ecentrycznych przestrzeni pierścieniowych, lub w przypadku wystąpienia częściowego zamknięcia przestrzeni pierścieniowej, wyniki te są wyraźnie różne (Rysunek 74)

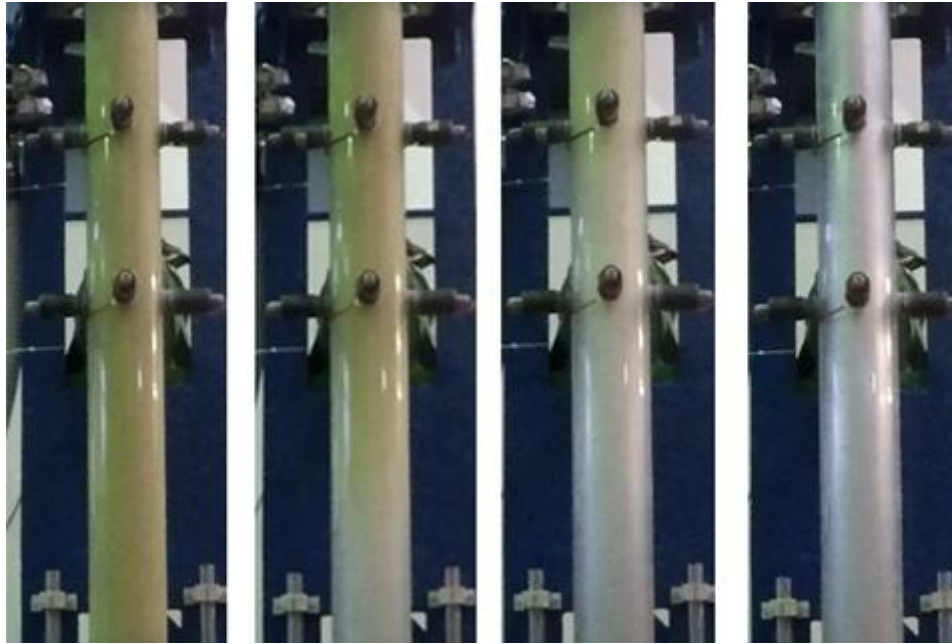


Rysunek 74 Wizualizacja procesu wypierania cieczy dla koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej (lewa kolumna), a przestrzeni pierścieniowej charakteryzującej się 50% stopniem ecentryczności [28]

### Koncentryczna przestrzeń pierścieniowa

Testy rozpoczęto od koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej celem uzyskania punktu odniesienia do dalszej dyskusji. Ze względu na ryzyko sedymentacji użytych cieczy, do porównania opracowanych geometrii w rozdziale wykorzystana została najbardziej stabilna para cieczy, a więc numer I i III odpowiednio jako ciecz wypierająca i wypierana. Para ta została również wykorzystana do analizy wpływu szeregu czynników takich jak: implementacja ruchu obrotowego czy posuwisto-zwrotnego, a także pochyleń głównej osi stanowiska.

Zgodnie z oczekiwaniami, na podstawie analizy literatury, interfejs był stosunkowo wyraźny i prostopadły do osi głównej. Pomimo wystąpienia akcji mieszania się cieczy na ich granicach, możliwe jest wskazanie jakie obszary zajmowane są głównie przez ciecz wypierającą, a jakie przez ciecz wypieraną (Rysunek 75). Widoczne jest również, że po przetłoczeniu około 1,5 objętości przestrzeni pierścieniowej nie są widoczne, żadne kieszenie cieczy wypieranej.



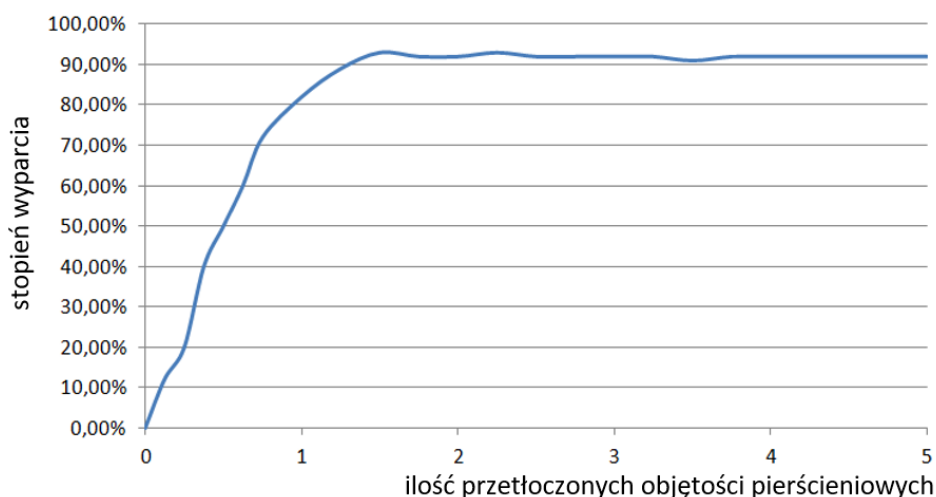
Rysunek 75 Proces wypierania cieczy w przestrzeni koncentrycznej, ciecz I wypiera ciecz numer III, 2l/s

począwszy od lewej – początek tłoczenia, przetłoczenie około 1/4 objętości przestrzeni pierścieniowej, przetłoczenie około 3/4 objętości przestrzeni pierścieniowej, przetłoczenie około 1,5 objętości przestrzeni pierścieniowej

Potwierdzają to wskazania czujników przewodności (Rysunek 76). Przebieg wykresu prezentuje intensywną zmianę wskazań czujników, a co za tym idzie zmianę stopnia wyparcia cieczy, do momentu przetłoczenia ok. 1,5 objętości przestrzeni pierścieniowej. Pomimo, iż obserwować można niewielkie fluktuacje przebiegu wykresu po tej granicy to jednak mają one czasowy charakter. Można je tłumaczyć chwilowym osadzaniem się cząstek na powierzchni elektrod sondy, lub odrywaniem się części kieszeni płynu wypieranego. Należy jednak założyć, że te nieznaczne odchylenia, wynikające z przyjętej metody pomiarowej, wpływają na wszystkie wyniki w podobnym stopniu. Innym zakłóceniem, mającym wpływ na wyniki jest tworzenie się cienkiego filmu na powierzchni elektrod i ścian kolumny. W warunkach naturalnych występowanie tego zjawiska nie rodzi negatywnych konsekwencji na jakość płaszcza cementowego. W warunkach eksperymentu można założyć, iż redukuje ono wskazania stopnia wyparcia. Ponownie jednak, należy przyjąć, iż przesunięcie wyników jest porównywalne dla wszystkich badanych przypadków, a co za tym idzie, możliwe jest ich porównanie.

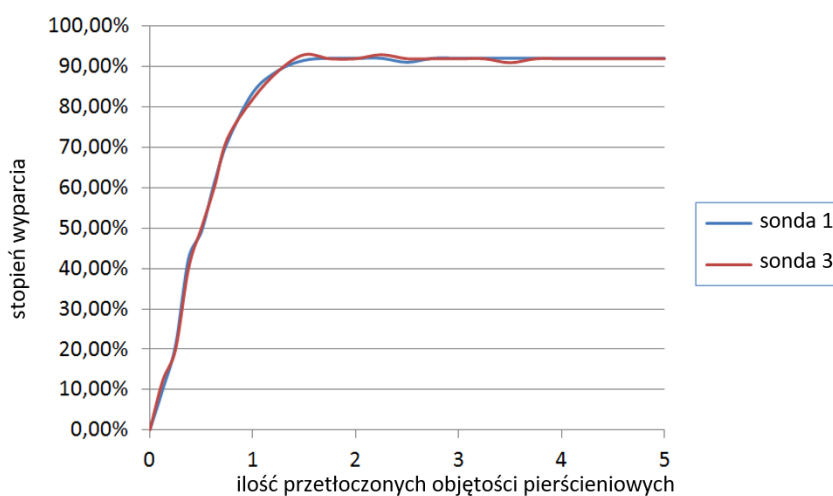
Uśredniając wynik zarejestrowany dla ostatniej tłoczonej objętości przestrzeni pierścieniowej można przyjąć, iż stopień wyparcia dla tego scenariusza wyniósł 92,6%. Jest to wynik wyższy niż w przypadku badan Deawwanich z 2013 [28] jednak w tamtych badaniach zastosowano zdecydowanie mniejsze natężenie przepływu, co może tłumaczyć uzyskane różnice.





Rysunek 76 Skuteczność wyparcia względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – przestrzeń koncentryczna, III/I, bez obrotu wewnętrznej kolumny, bez pochylenia osi, uśrednione wskazanie czujników dolnego poziomu

Co istotne, analizując zapis dla przeciwległych sond (numer I i III) krzywe stopnia wyparcia wyglądają prawie identycznie. Różnica stopnia wyparcia wynosiła poniżej 0.3% (Rysunek 77). W takich przypadkach występowanie kanału typu V jest wysoce nieprawdopodobne. Porównanie uśrednionego wyniku dla poziomów (wskazania czujników od 1 do 4 względem czujników 5-8) pokazało podobną różnicą na poziomie 0,32%, gdzie wyższe wartości wskazywały czujniki zlokalizowane na wyższym poziomie. Może wynikać to z większej prędkości ścinania w górnej części stanowiska, a co za tym idzie lepszym oczyszczeniu powierzchni elektrod z osadzonego materiału wchodzącego w skład cieczy numer III.



Rysunek 77 Skuteczność wyparcia cieczy względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – przestrzeń koncentryczna, III/I, bez obrotu wewnętrznej kolumny, bez pochylenia osi, sondy o numerach 1 i 3

Dla tej wyidealizowanej geometrii przestrzeni pierścieniowej przeprowadzono w sumie 66 scenariuszy testów mających za zadanie umożliwienie analizy wpływu pojedynczych czynników na skuteczność procesu wypierania. Większość przeprowadzonych testów potwierdza dobrze znane zależności opisane w otwartej literaturze jak Deawwanich z 2013 r. [28].

Wyniki testów potwierdzają, iż skuteczność wyparcia jest większa w przypadku gdy ciecz bardziej lepka wypiera ciecz mniej lepka - porównanie wyników testów (Tabela 3):

- 1 i 2,
- 5 i 6 (Rysunek 78),
- 16 i 17,
- 18 i 19,
- 20 i 21.

Tabela 3 Wyniki stopnia wyparcia cieczy dla koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej

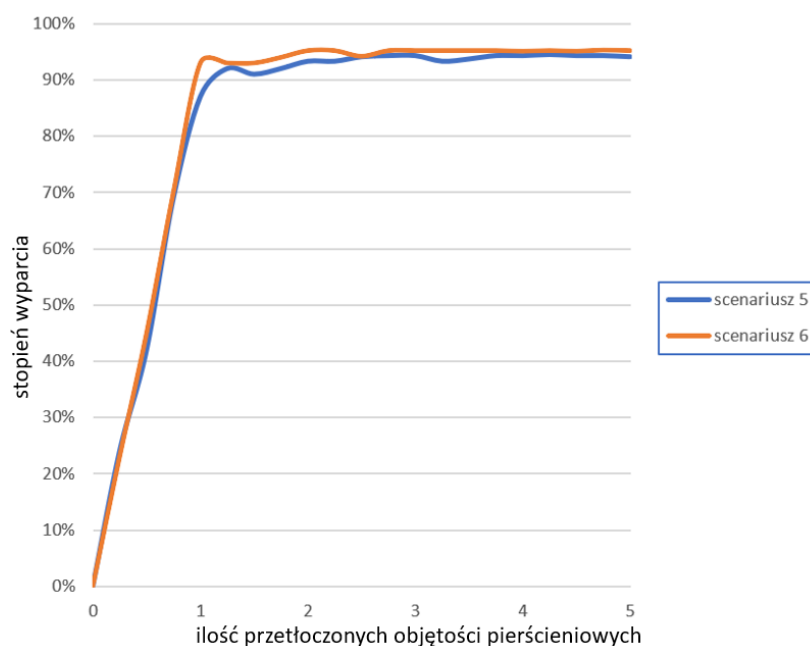
Numer scenariusza testu	Nat. przep. [l/s]	Ecentryczność [%]	Pochylenie osi [°]	Ruch obr. [r/min]	Ruch $\updownarrow$ [Hz]	Zastosowana przeszkoda	Para cieczy	Skuteczność wyparcia [%]	Najniższe wskazanie [%]
1	2	0	0	-	-	-	III/I	92,6	91,1
2	2	0	0	-	-	-	I/III	96,2	95,5
3	2	0	0	-	-	-	VI/V	94,1	91,2
4	2	0	0	-	-	-	V/VI	95,7	95,4
5	4	0	0	-	-	-	III/I	94,3	92,1
6	4	0	0	-	-	-	I/III	95,2	93,3
7	2	0	30	-	-	-	III/I	86,8	80,6
8	2	0	45	-	-	-	III/I	82,3	71,9
9	2	0	0	60	-	-	III/I	93,0	92,1
10	2	0	30	60	-	-	III/I	88,2	83,3
11	2	0	0	120	-	-	III/I	93,9	91,2*
12	2	0	30	120	-	-	III/I	89,1	81,7*
13	2	0	0	-	0.2	-	III/I	92,2	92,0
14	2	0	0	-	0.4	-	III/I	93,4	92,4
15	2	0	0	60	0.2	-	III/I	95,1	94,2
16	2	0	30	60	-	-	VI/V	82,0	70,8
17	2	0	30	60	-	-	V/VI	85,3	77,6
18	2	0	30	60	0.2	-	VI/V	85,6	74,7
19	2	0	30	60	0.2	-	V/VI	87,0	80,7
20**	2	0	-	-	-	-	IV/VII	93,7	92,4
21**	2	0	-	-	-	-	VII/IV	89,8	83,6
22**	2	0	30	-	-	-	VII/II	79,1	58,2
23**	2	0	30	-	-	-	II/VII	86,9	82,1
24**	2	0	30	60	-	-	VII/II	84,4	70,6
25**	2	0	30	-	0.2	-	VII/II	85,7	68,9

\* - wyraźne zaburzenia w rejestrowanym sygnale mogące być efektem nieszczelności i dostawania się powietrza do przestrzeni pierścieniowej

\*\* - wystąpiła częściowa sedimentacja cząsteczek stałych (baryt), która mogła mieć wpływ na wyniki pomiarów

Na Rysunku 78 widać, iż dla obu testów osiągnięty został wyższy poziom wyparcia cieczy wypieranej niż w przypadku wyniku scenariusza testu nr 1 (Tabela 3; natężenie przepływu 2l/s, brak przesunięcia osiowego, brak pochylenia, para cieczy III/I). Kiedy płyn bardziej lepki wypychał płyn mniej lepki (scenariusz testu nr 6) osiągnięta została wyższa skuteczność wyparcia niż gdy

płyny zostały zamienione (scenariusz testu nr 5). Pomimo, iż różnica ta była minimalna 0,9% (Tabela 3) to wynik ten jest zgodny z analogicznymi sytuacjami wyszczególnionymi powyżej.



Rysunek 78 Skuteczność wyparcia względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – przestrzeń koncentryczna, bez obrotu wewnętrznej kolumny, bez pochylenia osi porównanie wyników dla scenariuszy testów nr 5 i 6

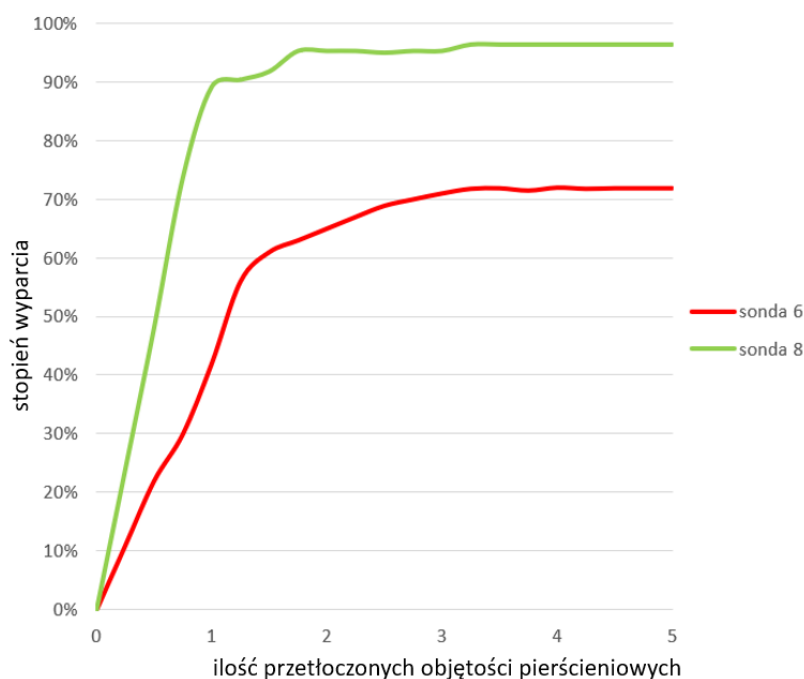
Warto zaznaczyć, że niewielka różnica pomiędzy wskazaniem czujnika przewodności o najniższej wartości, a wskazaniem uśrednionym dla wszystkich czujników widoczna jest dla wszystkich scenariuszy testów, gdy oś stanowiska jest w pozycji wertykalnej (Tabela 3). Istotne jest również to, iż niemal dla wszystkich testów tych skuteczność wyparcia wynosiła powyżej 90%. Jest to potwierdzenie, iż taka przestrzeń pierścieniowa jest sytuacją pożądaną w odwiercie. Należy zaznaczyć, iż wyniki te powstały na podstawie procesu wypierania przeprowadzonego w wyidealizowanej przestrzeni pierścieniowej i są nieosiągalne w warunkach otworowych dla tak niewielkiej objętości przetłoczonej cieczy.

Wartość skuteczności wyparcia jest zdecydowanie mniejsza dla wyników scenariuszy testów charakteryzujących się pochyleniem osi stanowiska. Widoczny jest negatywny wpływ tego czynnika na skuteczność wyparcia cieczy - porównanie wyników par testów (Tabela 3):

- 1 i 7,
- 1 i 8,
- 9 i 10,
- 11 i 12.

Co więcej, porównanie wyników testów nr 7 i 8 (Tabela 3), zgodnie z oczekiwaniami potwierdza, iż skuteczność wyparcia maleje wraz ze wzrostem pochylenia osi.

Rysunek 79 pokazuje wyraźną różnicę między wskazaniami naprzeciwległych sond przy pochyleniu osi stanowiska o 45°. Sonda 8 jest w górnym położeniu w stosunku do sondy 6. Tak istotna różnica może wskazywać, iż nawet przy koncentryczności kolumny rur z osią odwiertu, podczas cementowania prędkość ścinania nie jest zbliżona w całym przekroju poprzecznym, co może prowadzić do powstania kieszeni w zaczynie cementowym.



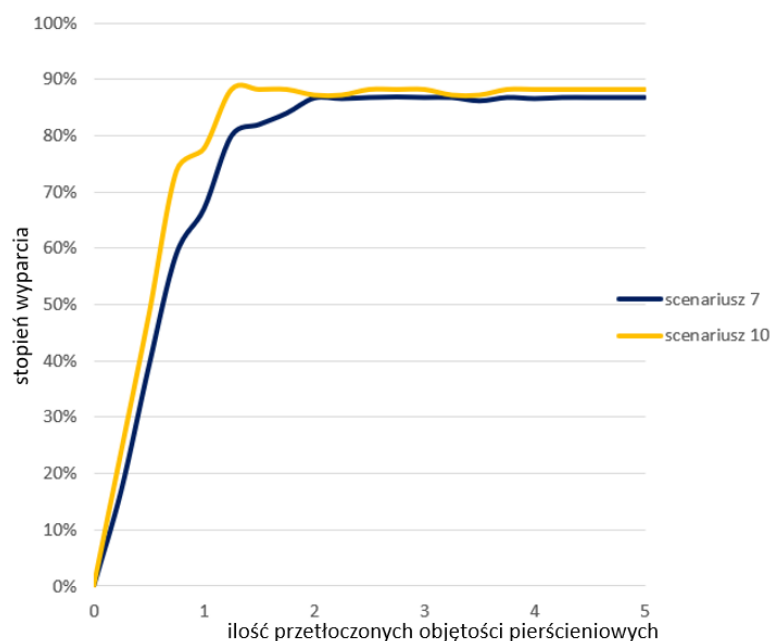
Rysunek 79 Skuteczność wyparcia cieczy względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – przestrzeń koncentryczna, III/I, bez obrotu wewnętrznej kolumny, pochylenie osi 45°, sondy o numerach 6 i 8

Jednym ze sposobów zwiększenia prędkości ścinania, a co za tym idzie naprężenia ścinającego w cementowanej przestrzeni pierścieniowej jest wykorzystanie ruchu obrotowego kolumny. Uzyskane wyniki potwierdzają, iż implementacja ruchu obrotowego poprawia skuteczność wyparcia cieczy wypieranej - porównanie wyników dla przeprowadzonych scenariuszy testów (Tabela 3):

- 1 i 9,
- 7 i 10 (Rysunek 80),
- 22 i 24.

Co więcej, porównanie wyników scenariuszy testów nr 9 i 11 wskazuje, iż skuteczność wyparcia rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej kolumny. Uzyskane wyniki są zgodne z oczekiwaniami. Potwierdzają one zasadność ruchu obrotowego podczas operacji cementowania w celu rozbicia kieszeni płuczkowych.

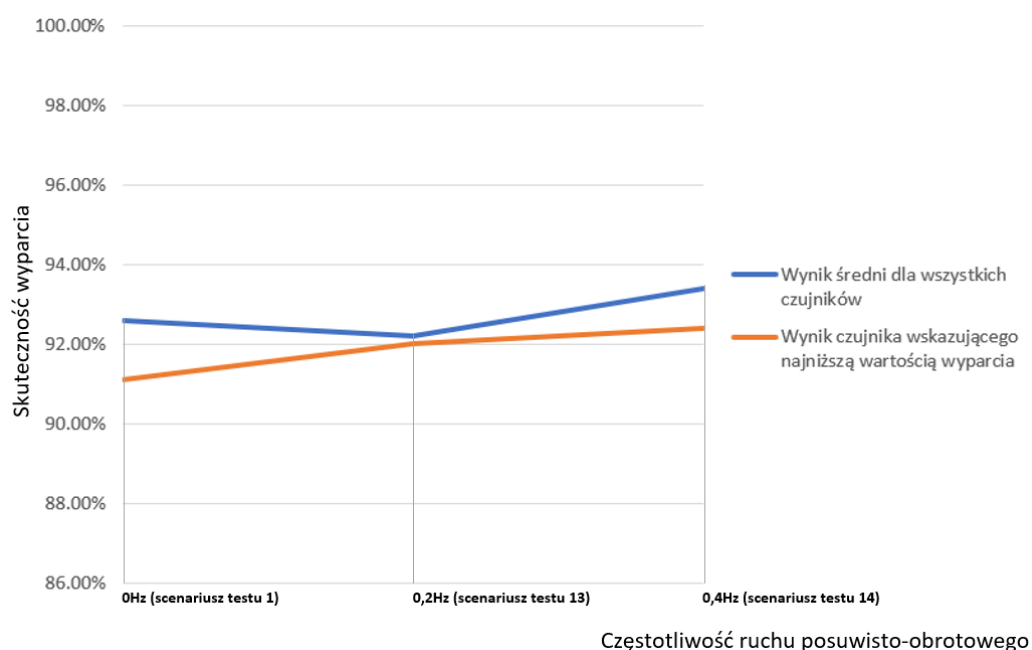
Na Rysunku 80 widoczne jest, iż przy implementacji ruchu wewnętrznej kolumny z prędkością 60 obrotów na minutę (scenariusz testu nr 10) uzyskano wyższy stopień wyparcia, mierzony jako uśrednione wskazanie wszystkich czujników, niż w przypadku gdy kolumna była nieruchoma (scenariusz testu nr 7). Co więcej, odczyty czujników wskazujące najniższy stopień wyparcia, również wskazują na poprawę sytuacji przy implementacji ruchu obrotowego. Ponownie należy zaznaczyć, iż oba wyniki wskazują bardzo wysoką skuteczność wyparcia. Dla scenariusza testu nr 10 jest to niemal 90% co oznacza, iż ryzyko wytworzenia się kanału w takiej sytuacji jest znikome.



Rysunek 80 Skuteczność wyparcia cieczy względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – przestrzeń koncentryczna, pochylenie osi 30°, porównanie wyników dla scenariuszy testów 7 i 10

Kolejną możliwością rozbicia kieszeni płuczkowych w przestrzeni pierścieniowej jest zastosowanie ruchu posuwisto-zwrotnego kolumny rur. Jak znaczone wcześniej wzrost prędkości ścinania prowadzi do wzrostu naprężeń ścinających działających na ciecz w danym rejonie. Jest to pierwsze badanie w otwartej literaturze, które doświadczalnie analizuje wpływ tego ruchu na proces wyparcia.

Wyniki testów nr 13, 14, 15, 18, 19 i 25 przedstawiają stopień wyparcia przy implementacji ruchu posuwisto-zwrotnego. Porównanie wyników numer 1 (brak ruchu posuwisto-zwrotnego), 13 (ruch o częstotliwości 0,2Hz) i 14 (ruch o częstotliwości 0,4Hz), wskazuje iż skuteczność wyparcia dla uśrednionego sygnału z czujników jest na porównywalnie wysokim poziomie. Rozrzut wyników dla tych trzech testów wynosi 1.2%. Podobnie sytuacja wygląda przy porównaniu wyników czujników z najniższym wskazaniem. Tutaj różnica wyniosła 1.3% i widoczna jest tendencja wzrostowa (Rysunek 81). W obu przypadkach najwyższy stopień wyparcia uzyskano dla scenariusza numer 14, czyli przy implementacji ruchu posuwisto-zwrotnego, gdzie średnia prędkość liniowa wewnętrznej rury była najwyższa i wynosiła 0,4m/s.

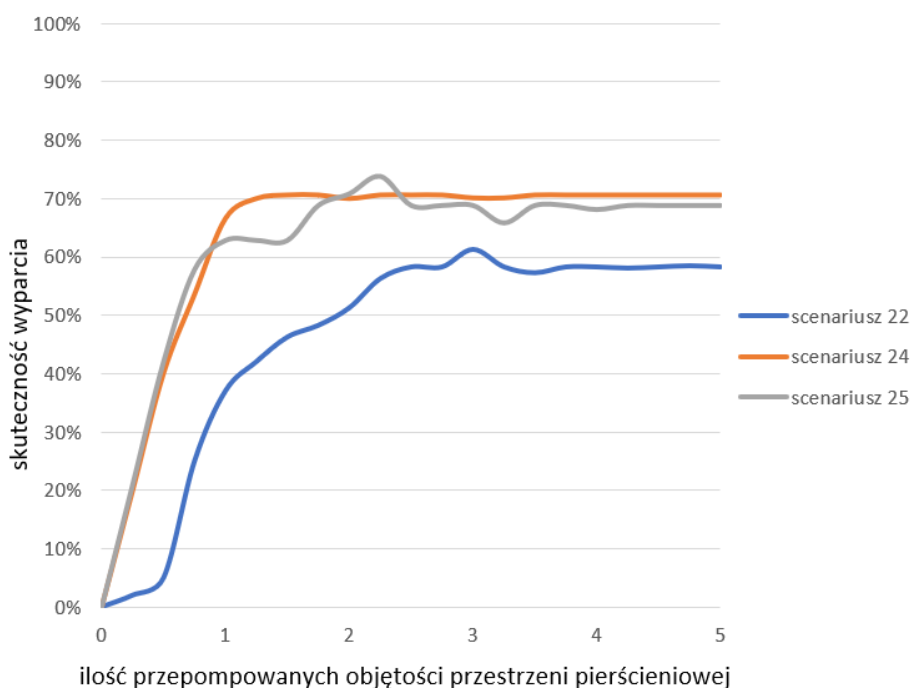


Rysunek 81 Porównanie wyników uśrednionych i wskazań czujników o najniższej wartości dla scenariusza testu numer 1 (brak ruchu posuwisto-zwrotnego), 13 (ruch o częstotliwości 0,2Hz) i 14 (ruch o częstotliwości 0,4Hz)

Tak małe różnice nie pozwalają jednak na wyciągnięcie wniosków potwierdzających lub zaprzeczających postawionej tezie o pozytywnym wpływie tego ruchu na skuteczność procesu wyparcia. Powodem występowania tak małych różnic pomiędzy scenariuszami testów może być fakt bardzo wysokiego poziomu wyparcia cieczy dla przestrzeni koncentrycznej. Podkreśla to ponownie jak poprawna geometria ma wpływ na wynik procesu cementowania. Wyniki scenariuszy testów nr 18 i 19 (ruch posuwisto-zwrotny i obrotowy) wskazują poprawę stopnia wyparcia w stosunku do analogicznych przypadków nr 16 i 17, gdzie użyto jedynie ruchu obrotowego. Te cztery przypadki łączy wykorzystana para cieczy o numerach V i VI, gdzie różnica w lepkości nie jest tak znaczna jak w przypadku pary cieczy o numerach I i III. Zarówno wynik

średni jak i wskazania czujnika o najniższej wartości są wyższe w przypadku implementacji zarówno ruchu obrotowego, jak i ruchu posuwisto-zwrotnego. Średnia poprawa ogólnego wyniku to 2,5%, oraz 3,5% wzrostu wskazań czujników rejestrujących najniższą wartość.

Bardziej wyraźna poprawa stanu wyparcia widoczna jest przy porównaniu wyników scenariuszy testów nr 22 i 25. W tych scenariuszach ciecz o niższej gęstości i lepkości (II) wypierała ciecz numer VII, zawierającą aż 5% udział polimeru guamol i która w swoim składzie posiadała, aż 20% dociążającego ją barytu (Tabela 2). Jest to sytuacja niepożądana, gdyż jak zaznaczono wcześniej, w warunkach otworowych ciecz bardziej lepka powinna wypierać ciecz o mniejszej lepkości. Dodatkowo różnica gęstości w tym przypadku działała na niekorzyść skuteczności procesu wypierania (analogicznie do siły wyporu działającej na zanurzone w cieczy ciało stałe). Porównanie wyników scenariuszy testów nr 22 i 23 pokazuje jaki wpływ mają te dwa czynniki na powodzenie operacji cementowania (niemal 24% różnica w wynikach czujników o najniższych wskazaniach). Dodatkowo, w tych testach (22-25) pochylono oś stanowiska o 30°. Wyniki scenariuszy testów nr 22 i 25 wskazują jednoznacznie na pozytywny wpływ implementacji ruchu posuwisto-zwrotnego na skuteczność procesu wypierania. Osiągnięte wartości są na porównywalnym poziomie jak dla scenariusza testu nr 24, gdzie zamiast ruchu posuwisto-zwrotnego wykorzystany został ruch obrotowy (Rysunek 82).



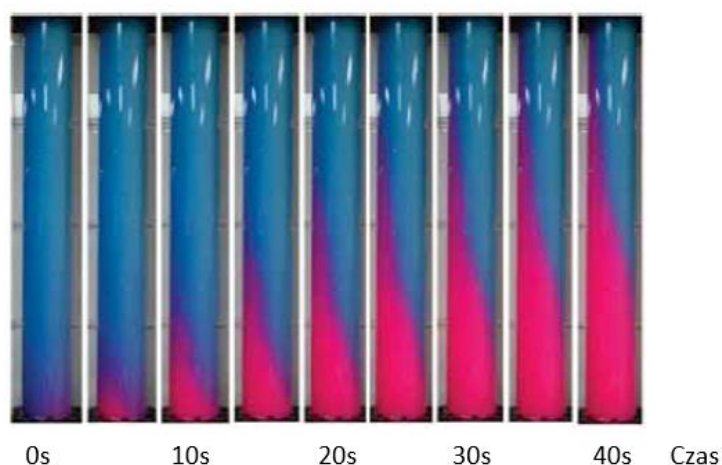
Rysunek 82 Porównanie najniższych wskazań czujników dla scenariuszy testów nr 22, 24 i 25



Ze względu na to, że wykorzystany system pomiarowy wyznacza stopień wyparcia na podstawie przewodności cieczy, która przepływa w sąsiedztwie elektrod, wskazanie czujników na poziomie 50% nie musi oznaczać, iż na linii łączącej analogiczne sondy na dwóch poziomach (na przykład 1 i 5) doszło do choćby częściowego wyparcia cieczy wypieranej. Przeprowadzone testy wstępne pokazały, iż czułość aparatury pozwalała na zarejestrowanie zmiany przewodności dokonanej w odległości nawet kilku centymetrów od sondy. Oznacza to, iż już dla takich poziomów wyparcia, można mówić o wysokim ryzyku wytworzenia się niewyflukanej kieszeni cieczy wypieranej, która w warunkach otworowych prowadziłaby do powstania kanału w zaczynie cementowym.

### Ecentryczna przestrzeń pierścieniowa

Analiza procesu wypierania w ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej realizowana była już wielokrotnie w badaniach na przestrzeni ostatnich dekad w otwartej literaturze. Wartością dodaną przeprowadzonych badań w ramach tej tezy jest stosunkowo wysokie natężenie przepływu, które po uwzględnieniu skali przekroju poprzecznego, jest porównywalne do warunków podczas operacji cementowania otworu wiertniczego. Większość przeprowadzonych prac opierała się na znacznie niższych natężeniach przepływu, gdzie wypełnienie objętości przestrzeni pierścieniowej zajmowało kilkadziesiąt sekund (Rysunek 83). W przypadku badań opisanych w tezie było to około 2 sekund (w zależności od zastosowanej przeszkody przestrzeni pierścieniowej).



Rysunek 83 Proces wypierania cieczy w przestrzeni pierścieniowej o stopniu ecentryczności 50% [28]

kolor niebieski – ciecz wypierana, kolor różowy – ciecz wypierająca

W przypadku stopnia ecentryczności wynoszącym 25% uzyskana skuteczność wyparcia jest podobna do wyników dla przestrzeni koncentrycznej. Zgodnie z oczekiwaniami, przy

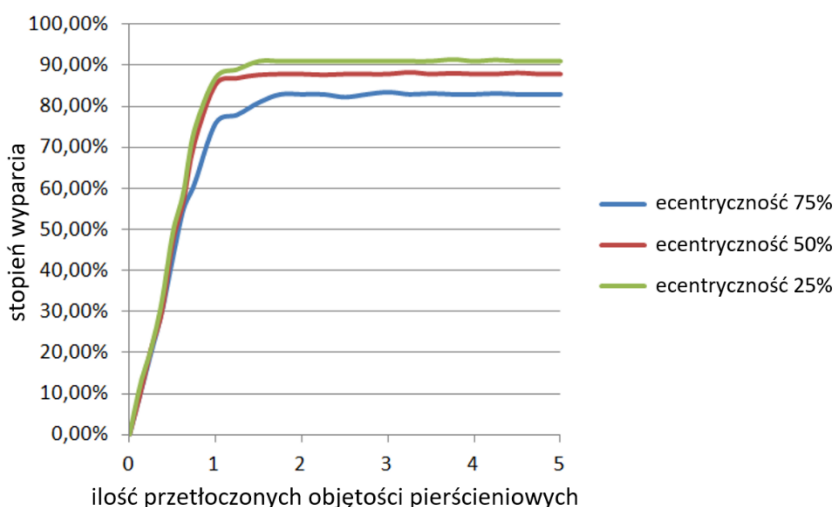
zwiększeniu poziomu ecentryczności zmniejsza się skuteczność wyparcia (wyniki testów nr 26-28, 29-31, 40-42 – Tabela 4). Niską wydajność wypierania dla przestrzeni charakteryzującej się największym przesunięciem promieniowym między osią kolumny, a osią przezroczystej rury zewnętrznej, można tłumaczyć spadkiem szybkości ścinania w pobliżu dwóch sond (III i VII) czyli w wąskim obszarze przestrzeni pierścieniowej.

Tabela 4 Wyniki stopnia wyparcia cieczy dla ecentrycznej przestrzeni pierścieniowej

Numer scenariusza testu	Nat. przep. [l/s]	Ecentryczność [%]	Pochylenie osi [°]	Ruch obr. [r/min]	Ruch ↑ [Hz]	Zastosowana przeszkoda	Para cieczy	Skuteczność wyparcia [%]	Najniższe wskazanie [%]
26	2	25	0	-	-	-	III/I	91,7	89,1
27	2	50	0	-	-	-	III/I	88,3	83,7
28	2	75	0	-	-	-	III/I	84,5	72,3
29	2	25	30	-	-	-	III/I	82,2	72,7
30	2	50	30	-	-	-	III/I	83,5	68,7
31	2	75	30	-	-	-	III/I	71,3	58,6
32	4	75	0	-	-	-	III/I	87,9	72,9
33	4	75	30	-	-	-	III/I	86,0	81,5
34	2	75	30	60	-	-	III/I	74,3	67,4
35	2	75	30	-	0.2	-	III/I	71,0	65,7
36	2	75	30	-	0.4	-	III/I	72,4	63,8*
37	2	75	30	60	0.2	-	III/I	76,9	72,4
38	2	75	30	-	-	-	VI/V	84,6	78,2
39	2	75	30	-	-	-	V/VI	87,8	82,4
40**	2	25	0	-	-	-	VII/II	74,9	60,1
41**	2	50	0	-	-	-	VII/II	66,4	58,3
42**	2	75	0	-	-	-	VII/II	63,6	28,9
43**	2	75	0	60	-	-	VII/II	73,1	65,2
44**	2	75	0	-	0.2	-	VII/II	71,5	63,3
45**	2	75	0	60	0.2	-	VII/II	82,9	70,7

\* - wyraźne zaburzenia w rejestrowanym sygnale mogące być efektem nieszczelności i dostawania się powietrza do przestrzeni pierścieniowej

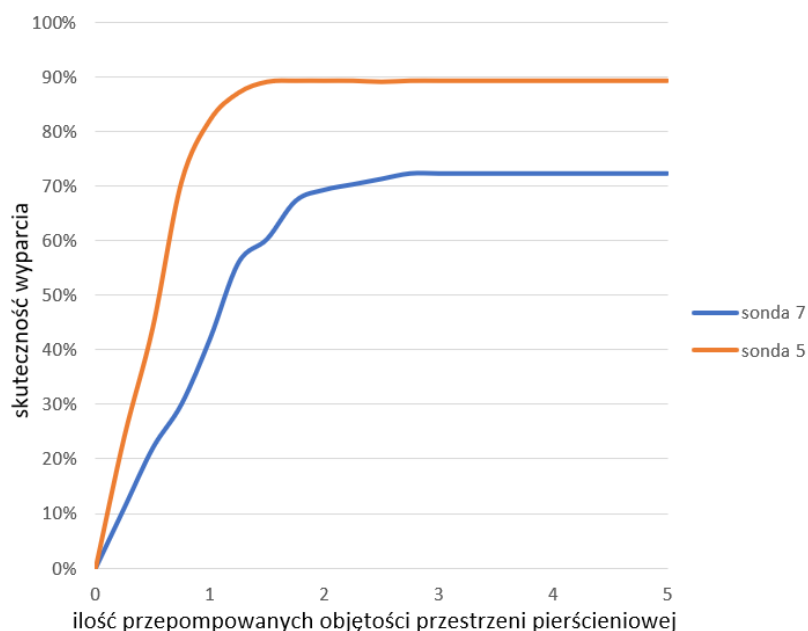
\*\* - wystąpiła częściowa sedimentacja cząsteczek stałych (baryt), która mogła mieć wpływ na wyniki pomiarów



Rysunek 84 Skuteczność wyparcia cieczy względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – bez obrotu wewnętrznej kolumny, bez pochylenia osi, porównanie wyników dla scenariuszy testów nr 26, 27 i 28

Pomimo niekorzystnej geometrii wyniki dla zastosowanej pary cieczy pokazują skuteczność wyparcia na poziomie ponad 80% dla wszystkich przypadków, a wskazania czujnika o najniższej wartości były powyżej 70% nawet dla geometrii o skrajnym położeniu rury wewnętrznej (Rysunek 85). Podkreśla to rolę poprawnie dobranych parametrów reologicznych w cementowaniu otworu wiertniczego. Oczywiście sam proces doboru konkretnej mieszanki cieczy jest wypadkową dziesiątków czynników, a w otworze wypiera się nawet kilka cieczy jednocześnie. Nie mniej jednak widać, że zachowanie proporcji lepkości ma decydujące znaczenia na powodzenie operacji cementowania.

Widoczne jest dłuższe dochodzenie wskazań do stanu równowagi dla czujnika znajdującego się w wąskim rejonie przestrzeni pierścieniowej, gdzie przebieg wykresu dla przeciwległej sondy jest zbliżony do tych z koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej.



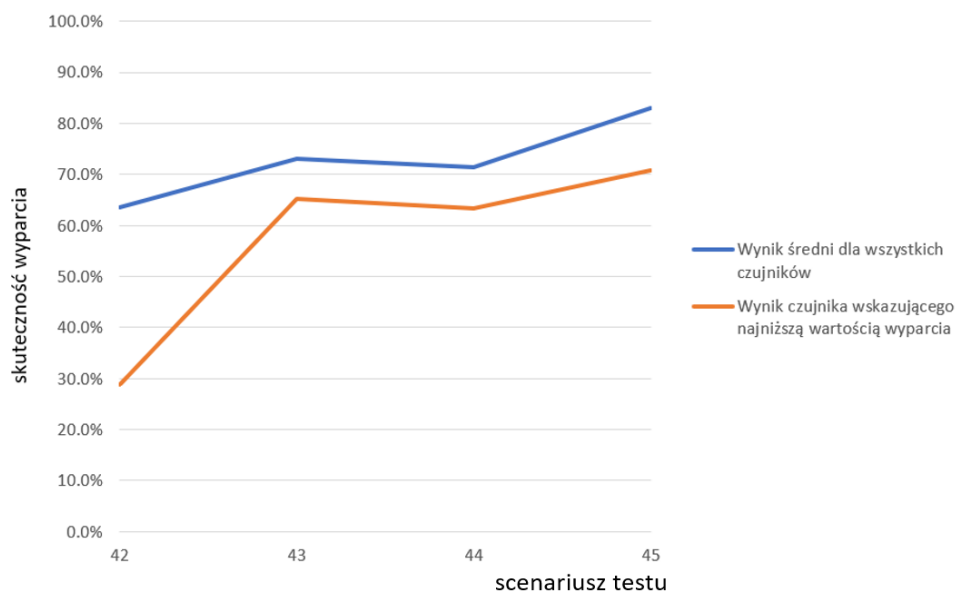
Rysunek 85 Skuteczność wyparcia względem ilości przepompowanych objętości przestrzeni pierścieniowej – para cieczy III/I, bez obrotu wewnętrznej kolumny, bez pochylenia osi, sondy o numerach 5 i 7, scenariusz testu nr 28

Na podstawie porównania wyników scenariuszy testów nr 38 i 39 ponownie zauważyć można, że lepsze wyniki wyparcia uzyskuje się w sytuacji gdzie ciecz wypierająca ma większą lepkość niż ciecz wypierana.

Tabela 4 przedstawia wynik wyparcia dla wszystkich scenariuszy testów opartych na ecentrycznych przestrzeniach pierścieniowych. Jak można zauważyć, wydajność przemieszczenia zmniejsza się, gdy wzrasta poziom mimośrodowości. Jest to potwierdzenie znanej zależności, lecz

były to pierwsze badanie eksperymentalne, w których ze względu na uzyskane natężenie przepływu cieczy wypierającej, odwzorowano porównywalną szybkość ścinania działającą na ciecz wypieraną. Interesującym kierunkiem rozwoju badań byłoby wykorzystanie oprócz czujników przewodności, również regularnie rozmieszczonych czujników ciśnienia i czujników miejscowej prędkości cieczy. Te ostatnie mogłyby działać na przykład na zasadzie pomiaru wychylenia blaszki przez przepływającą ciecz. W ten sposób na stanowisku badawczym można by uzyskać kluczowe informacje na temat rozkładu prędkości w przestrzeni pierścieniowej i momentu przekroczenia granicy płynięcia przy zwiększaniu natężenia przepływu.

Wyniki testów nr 34-37 i 43-45 pokazują, że ruch kolumny rur może znacznie zwiększyć skuteczność wyparcia. Co warto odnotować, dla pary zastosowanych cieczy o numerach I i III połączenie ruchu obrotowego i ruchu posuwisto-zwrotnego doprowadziło do wzrostu wskazania czujnika o najniższym stopniu wyparcia aż o 23,5% (wartość z testu nr 31 względem wartości z testu nr 37). Jest to efekt zwiększenia szybkości ścinania w wąskim obszarze przestrzeni pierścieniowej. Taka zmiana w procesie cementowania może decydować o powstaniu kanału w płaszczu cementowym. Jeszcze bardziej wyraźną poprawę wyników uzyskano dla sytuacji gdzie ciecz VII była wypierana przez ciecz numer II (Rysunek 86). Tutaj wzrost wskazań dla skrajnego czujnika był ponad dwukrotny (wzrost z 28.9% - scenariusz testu nr 42 do 70.7% - scenariusz testu nr 45). Wykorzystane ciecze celowo zostały dobrane w tych przypadkach w celu pogłębienia wad procesowych, nie mniej jednak takie sytuacje w przemyśle często są koniecznością. Implementacja samego ruchu posuwisto-zwrotnego daje porównywalną poprawę jak w przypadku zastosowania samego ruchu obrotowego. Wyniki te mają istotne znaczenie dla praktyk otworowych, nie mniej jednak jak zaznaczono wcześniej, nie mogą być analizowane niezależnie, gdyż z ruchem posuwisto-zwrotnym związane są ryzyka mogące doprowadzić do niepowodzenia całej operacji cementowania odcinka odwiertu.



Rysunek 86 Porównanie wyników uśrednionych i wskazań czujników o najniższej wartości dla scenariuszy testów nr 42, 43, 44 i 45

Innym sposobem na zwiększenie szybkości ścinania w wąskich rejonach przestrzeni pierścieniowych jest zwiększenie natężenia tłoczenia cieczy wypierającej. Potwierdzają to pary wyników testów:

- 31 i 33,
- 28 i 32.

O ile poprawa w pierwszej parze wyników jest minimalna, to dla pochylenia osi stanowiska już o 30° doprowadziła do różnicy wskazań powyżej 20% dla najniższych wskazań czujników. Nie mniej jednak, ze względu na ograniczenia sprzętu lub ryzyko szczelinowania ścian odwiertu, zwiększanie natężenia tłoczenia nie zawsze jest możliwe.

W części analizowanych przypadków (scenariusze testów nr 32, 33, 35 i 37 - Tabela 4) uwzględniono pochylenie osi stanowiska. Budowa przestrzeni pierścieniowej umożliwiała jedynie pochylenie jej w płaszczyźnie sond 2, 4, 6, 8, gdzie przesunięcie promieniowe odbywało się w płaszczyźnie prostopadłej. Można założyć, iż gdyby płaszczyzna pochylenia osi stanowiska pokrywała się z płaszczyzną przesunięcia promieniowego to uzyskane najniższe wskazania czujnika byłyby zdecydowanie niższe. Sytuacja taka ma miejsce w otworach kierunkowych lub horyzontalnych, gdzie dochodzi do nagłej zmiany pochylenia odwiertu lub gdy taki odcinek przechodzi przez niestabilne formacje skalne. Jest to interesujący kierunek kontynuacji badań.

## Lokalne zwężenie

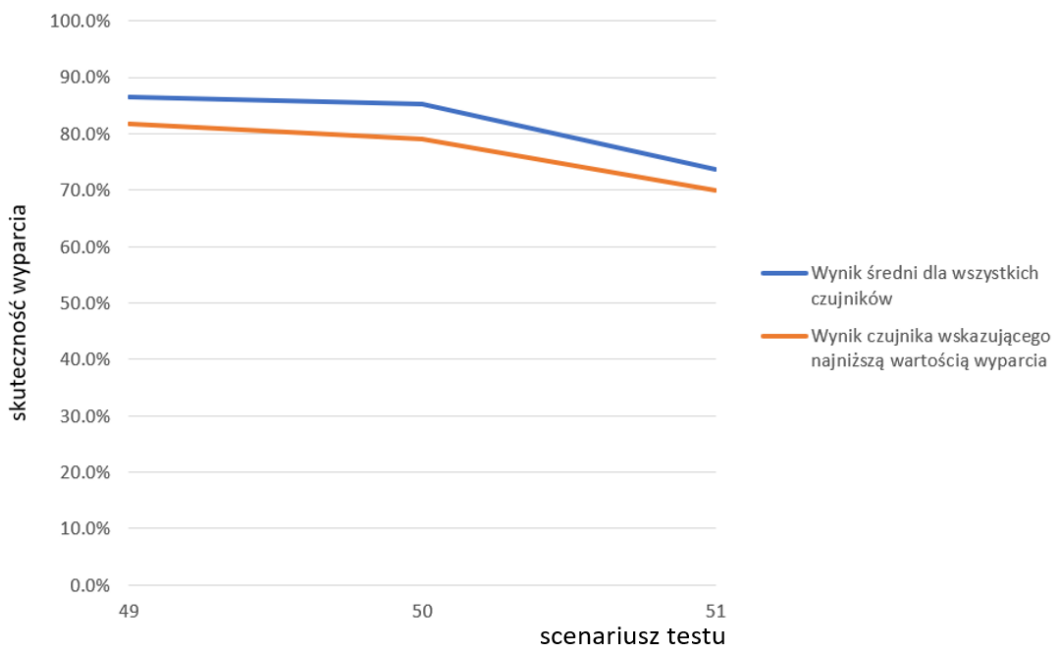
Wprowadzenie do koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej przeszkód w postaci miejscowego zwężenia spowodowało zmniejszenie skuteczności wypierania (Tabela 5). Na podstawie zestawienia wyników testów nr 46-48 i 49-51 (Rysunek 87) widoczne jest, iż wraz ze wzrostem intensywności zaciśnięcia prześwitu, skuteczność wyparcia maleje. Podobnie jak w przypadku stopnia ecentryczności, najniższa zmiana nie wpływała na wynik w istotny sposób. Dopiero 75% zaciśnięcia i pochylenie osi stanowiska o 30°, spowodowało uzyskanie wyniku dla jednego z czujników poniżej 70%. Jest to jednak i tak znacznie wyższe wskazanie niż dla analogicznej sytuacji uwzględniającej przesunięcie promieniowe osi wewnętrznej kolumny (scenariusz testu nr 31).

Tabela 5 Wyniki stopnia wyparcia cieczy dla przestrzeni pierścieniowej z miejscowym zwężeniem

Numer scenariusza testu	Nat. przep. [l/s]	Ecentryczność [%]	Pochylenie osi [°]	Ruch obr. [r/min]	Ruch ↓ [Hz]	Zastosowana przeszkoda	Para cieczy	Skuteczność wyparcia [%]	Najniższe wskazanie [%]
46	2	0	0	-	-	zw. 25%	III/I	91,1	89,0
47	2	0	0	-	-	zw. 50%	III/I	88,6	83,4
48	2	0	0	-	-	zw. 75%	III/I	84,7	72,2
49	2	0	30	-	-	zw. 25%	III/I	86,4	81,8
50	2	0	30	-	-	zw. 50%	III/I	85,2	79,1
51	2	0	30	-	-	zw. 75%	III/I	73,7	69,9
52	2	0	0	-	-	zw. 75%	VI/V	87,3	82,0
53	2	0	0	-	-	zw. 75%	V/VI	92,4	87,8
54**	2	0	0	-	-	zw. 75%	VII/II	70,2	67,8
55**	2	0	0	-	0.2	zw. 75%	VII/II	79,3	72,1*

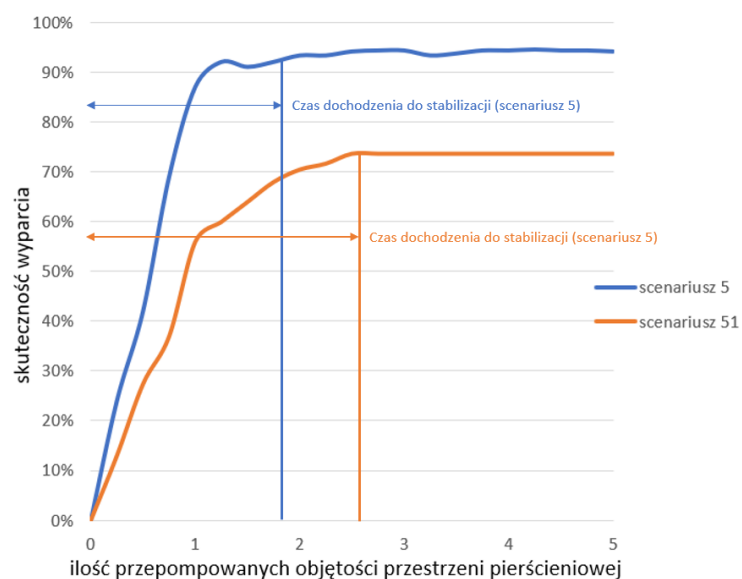
\* - wyraźne zaburzenia w rejestrowanym sygnale mogące być efektem nieszczelności i dostawania się powietrza do przestrzeni pierścieniowej

\*\* - wystąpiła częściowa sedimentacja cząsteczek stałych (baryt), która mogła mieć wpływ na wyniki pomiarów



Rysunek 87 Porównanie wyników uśrednionych i wskaźników czujników o najniższej wartości dla scenariuszy testów nr 49, 50 i 51

Wraz ze zmniejszeniem prześwitu zaobserwowano zwiększenie aktywności mieszania w przestrzeni pierścieniowej. Widoczne jest to w postaci wydłużenia czasu dochodzenia do stabilizacji wskaźników czujników. Na Rysunku 88 porównano przebieg wykresu dla koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej (scenariusz testu nr 5) i dla przestrzeni z 75% zwężeniem (scenariusz testu nr 51).



Rysunek 88 Porównanie stopnia wyparcia dla scenariuszy testu nr 5 i 51 z zaznaczonymi czasami dojścia do stabilizacji, w obu scenariuszach pochyłono oś stanowiska o 30°



Porównanie wyników scenariuszy testów nr 54 i 55 świadczy o korzystnym wpływie implementacji ruchu posuwisto-zwrotnego na skuteczność procesu wypierania. Potwierdzenie postawionej tezy było jednym z głównych celów tych badań.

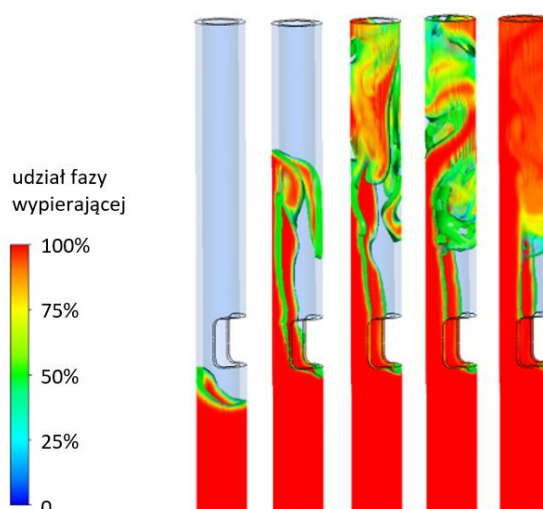
### Częściowe zamknięcie przestrzeni pierścieniowej

Nie mniej ważnym celem pracy było potwierdzenie negatywnego wpływu zmian w przestrzeni pierścieniowej na proces wypierania. Na podstawie wyników pomiarów (Tabela 6) widoczne jest, iż zgodnie z oczekiwaniami, bezpośrednio za przeszkodą wytworzyła się kieszeń cieczy pierwotnej, gdzie akcja wypierania była ograniczona (analogicznie do Rysunku 89).

Tabela 6 Wyniki stopnia wyparcia cieczy dla przestrzeni pierścieniowej z częściowym zamknięciem prześwitu

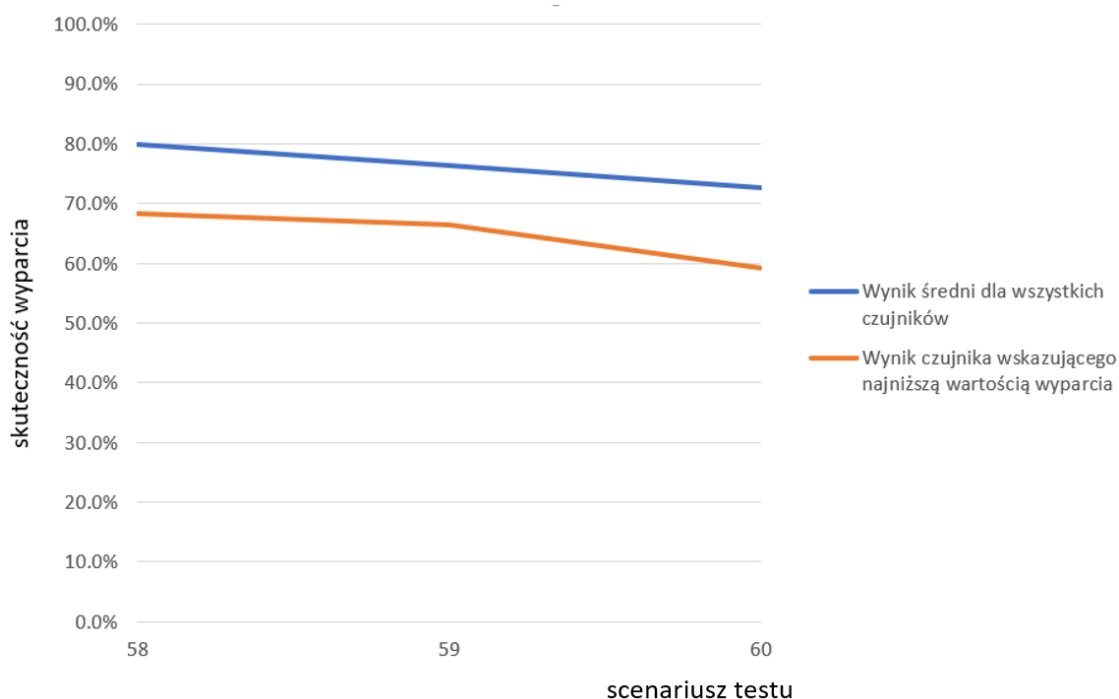
Numer scenariusza testu	Nat. przep. [l/s]	Ecentryczność [%]	Pochylenie osi [°]	Ruch obr. [r/min]	Ruch ↑↓ [Hz]	Zastosowana przeszkoda	Para cieczy	Skuteczność wyparcia [%]	Najniższe wskazanie [%]
55	2	0	0	-	-	za. 50%	III/I	89,5	79,9
56	2	0	0	-	-	za. 75%	III/I	86,4	75,2
57	2	0	0	-	-	za. 90%	III/I	81,7	70,1
58	2	0	30	-	-	za. 50%	III/I	79,9	68,3
59	2	0	30	-	-	za. 75%	III/I	76,4	66,5
60	2	0	30	-	-	za. 90%	III/I	72,7	59,1
61	2	0	0	-	-	za. 75%	VI/V	81,6	78,8
62	2	0	0	-	-	za. 75%	V/VI	85,3	81,2
63	1	0	0	-	-	za. 50%	III/I	73,1	56,4
64*	2	0	0	-	-	za. 75%	VII/II	51,8	3,9
65*	2	0	0	-	-	za. 90%	VII/II	42,2	2,7
66*	2	0	0	-	-	za. 75%	II/VII	88,4	76,9

\* - wystąpiła częściowa sedymentacja cząstek stałych (baryt), która mogła mieć wpływ na wyniki pomiarów



Rysunek 89 Wyniki symulacji procesu wypierania cieczy dla 0,5s; 1s; 1,5s; 2s; 4s - częściowe zamknięcie przestrzeni pierścieniowej wynoszące 50% prześwitu [58]

Ponownie, na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, iż wraz z intensywnością zmian w przestrzeni pierścieniowej skuteczność wyparcia spada (zestaw scenariuszy testów nr 55-57, 58-60 - Rysunek 90 oraz 64-65).



Rysunek 90 Porównanie wyników uśrednionych i wskazań czujników o najniższej wartości dla scenariuszy testu nr 58, 59 i 60

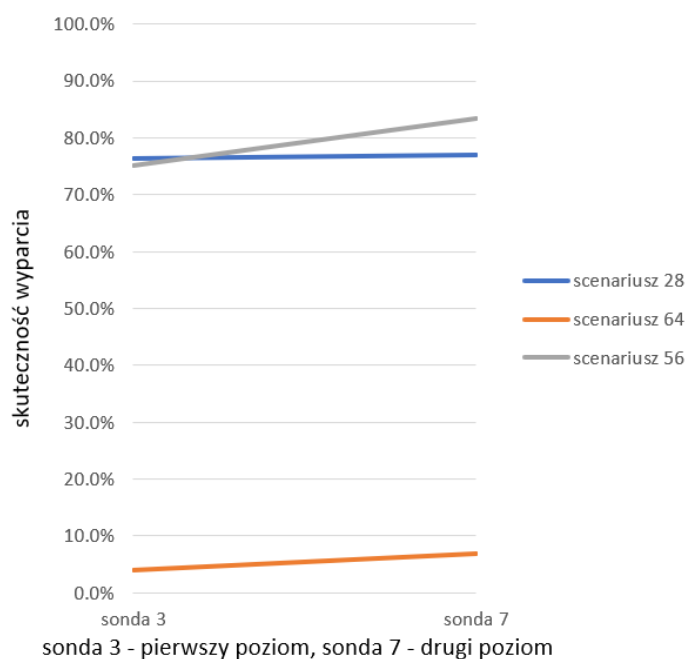
Co ponownie warto zaznaczyć, to wpływ właściwości reologicznych i poprawnej różnicy gęstości cieczy na skuteczność wyparcia, widoczny na zestawieniu wyników testów nr 64 i 66. Kiedy ciecz o wyższej lepkości i gęstości (VII) wypierała ciecz II w scenariuszu testów nr 66 to wynik wyparcia był na stosunkowo wysokim poziomie (88,4% - Tabela 6). Jako zadowalające należałoby również ocenić wskazanie dla czujnika o najniższym poziomie wyparcia (76,9%). Dla tych przestrzeni pierścieniowych był to zawsze czujnik o numerze 3, znajdujący się bezpośrednio nad wprowadzoną przeszkodą (kanał w przeszkodzie znajdował się na linii sondy 1 i 5). Gdy jednak zamieniono ciecz w scenariuszu testu nr 64 uzyskana wartość średnia wyniosła 51,8%, a poziom stabilizacji dla czujnika 3 wyniósł jedynie 3,9%. Można zatem stwierdzić, iż w bezpośredniej bliskości sondy 3 po przetłoczeniu 5 objętości cieczy wypierającej pozostała kieszeń niewypłukanej cieczy numer II. Tak niskie wskazanie może oznaczać, iż nad przeszkodą szybkość ścinania była niewystarczająca aby naprężenie ścinające przekroczyło granice płynięcia i doszło jedynie do szczątkowej akcji mieszania cieczy.

W przeciwieństwie jednak do przestrzeni ecentrycznej, gdzie niedoskonałości w wyparciach są porównywalne dla obu poziomów czujników, w przestrzeni z częściowym zamknięciem

prześwitu widoczny jest istotny wzrost wskazań między czujnikiem 3 i czujnikiem 7. Wzrost tych wskazań zależy jednak wyraźnie od zastosowanej pary cieczy. Na Rysunku 91 widoczny jest wzrost wskazań między dwoma poziomami dla trzech scenariuszy testów:

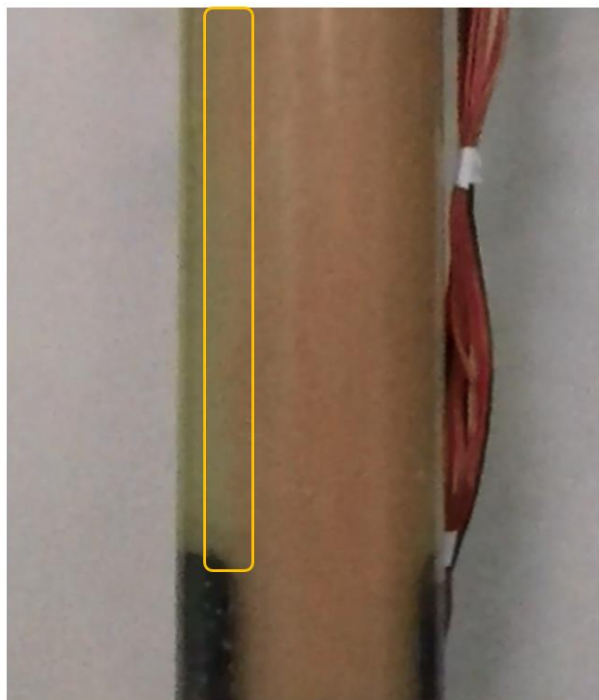
- 28 (przestrzeń ecentryczna – 75%, para cieczy III/I) dla celów porównawczych,
- 64 (zamknięcie prześwitu - 75%, para cieczy VII/II),
- 56 (zamknięcie prześwitu - 75%, para cieczy III/I).

Widoczne jest, że dla przestrzeni ecentrycznej wskazywany poziom wyparcia jest niemal identyczny na obu poziomach. Dla przestrzeni z częściowym zamknięciem prześwitu, gdzie ciecz II wypierała ciecz VII (scenariusz testu nr 64) widać, iż powstały kanał cieczy wypieranej miał ciągłość co najmniej do wysokości drugiego poziomu sond, podczas gdy dla scenariusza testu nr 56 sonda na wyższym poziomie osiągnęła wartość porównywalną do średniej dla wszystkich czujników.



Rysunek 91 Porównanie różnic wskazań skuteczności wyparcia między poziomami dla scenariuszy testu nr 28, 64 i 56

Jak zostanie pokazane w dalszej części tezy, kanały takie mogą ciągnąć się w warunkach otworowych nawet na setki metrów. Już kilkudziesięciocentymetrowa kieszeń płuczkowa może prowadzić do rozpoczęcia procesu korozji i poważnych strat dla właściciela odwiertu. Potencjalny kanał o długości kilkuset metrów może prowadzić również do migracji płynów złożowych i potencjalnej katastrofy ekologicznej.



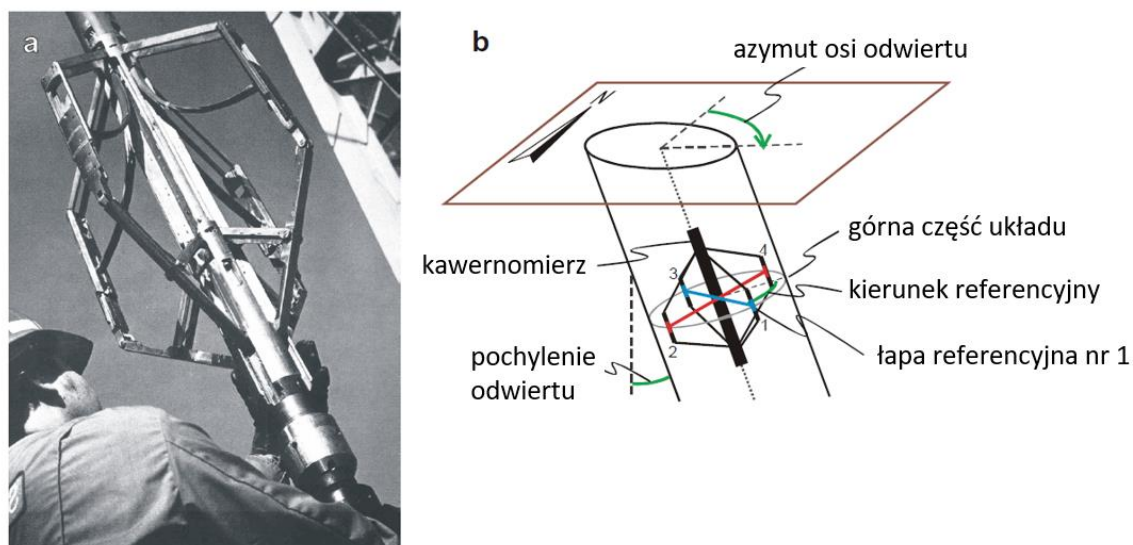
Rysunek 92 Widoczna kieszeń cieczy wypieranej przy ścianie zewnętrznej rury, scenariusz testu nr 62

## Rozdział 5 Analiza danych otworowych

### Pomiary na płytkich otworach badawczych

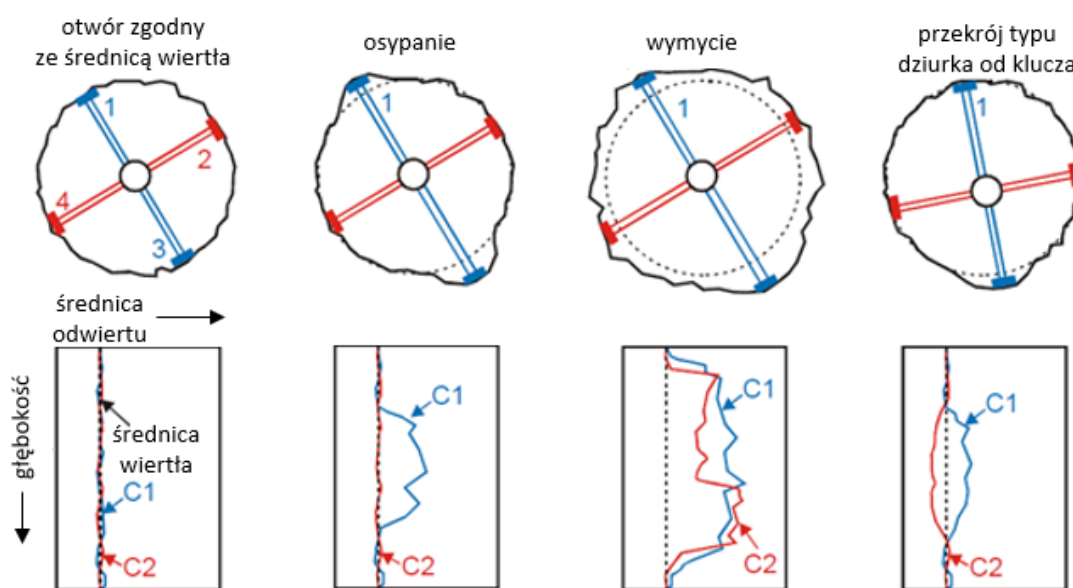
Zakładając, że postawiona teza na temat wpływu zmian przestrzeni pierścieniowej jest prawdziwa, należy oczekiwać, że podobny efekt zakłóceń geometrii można zaobserwować w warunkach rzeczywistych. Analiza tej korelacji jest jak najbardziej celowa ze względu na to, iż przed każdą operacją cementowania takie zmiany można wykryć podczas standardowo prowadzonych badań z użyciem kawernomierza otworowego (Rysunek 93). Oznacza to, iż dane te są dostępne dla zespołu wykonującego pracę, a rozprawa ta może rzucić nowe światło na sposób ich interpretacji.

Podczas tego pomiaru kawernomierz zapuszczany jest na dno sekcji wywierconego odcinka. Następnie dochodzi do rozłożenia jego ramion, które przez cały czas opierają się o ścianę odwiertu. Ich rozłożenie promieniowe przez cały czas jest monitorowane i zapisywane z zależności od głębokości w odwiercie. Urządzenie następnie stopniowo wyciągane jest na powierzchnię, a łapy kawernomierza ślizgają się na ścianach odwiertu dostosowując automatycznie swój rozstaw.



Rysunek 93 Schemat działania kawernomierza [82]  
 a) przygotowanie do zapuszczenia, b) schemat pracy w odwiercie

Wartość z przeciwległych łap jest sumowana, dając aktualną średnicę na danej głębokości. W ten sposób powstaje krzywa lokalnej średnicy odwiertu w zależności od głębokości. Rysunek 94 przedstawia ideę pomiaru czteroramiennego kawernomierza, jednak w przemyśle stosuje się odmiany nawet 64-ramienne [83] dające znacznie większą rozdzielność geometrii odwiertu. W połączeniu z dostępną informacją o lokalnym pochyleniu odwiertu, wynikami litologii, oraz średnicą cementowanej kolumny rur, daje to stosunkowo precyzyjne informacje na temat lokalnej geometrii przestrzeni pierścieniowej.



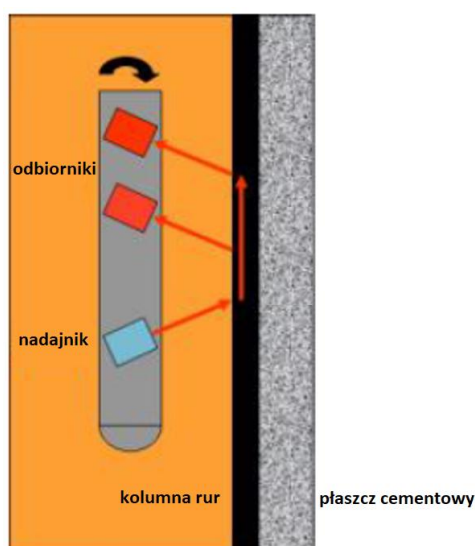
Rysunek 94 Schemat pomiaru średnicy otworu kawernomierzem czteroramiennym [84]

Pomiary te są prowadzone w następujących celach:

- określenie wymaganej ilości zaczynu cementowego,
- ustalenie, czy możliwe jest zapuszczenie kolumny rur (czy nie ma zamknięcia odwiertu).

Teza ta ma na celu dodanie kolejnego punktu do tej listy - czy istnieje znacząca redukcja prześwitu przestrzeni pierścieniowej, która może obniżyć jakość cementowania.

Obecność płaszczu cementowego można ustalić za pomocą metod akustycznych, takich jak CBL (ang. Cement Bond Log), VDL (ang. Variable Density Log) lub metod ultradźwiękowych jak na przykład CET (ang. Cement Evaluation Tool). Niezależnie od rodzaju źródła wszystkie metody opierają się na monitorowaniu zmian sygnału za pomocą wbudowanych odbiorników (Rysunek 95). Dla pomiaru CBL jest to redukcja amplitudy sygnału, która wskazuje związanie kolumny rur z płaszczem cementowym lub jego brak.



Rysunek 95 Schemat pomiaru CBL [84]

W celu potwierdzenia postawionej tezy związanej z niekorzystnym wpływem redukcji prześwitu wykonano dwa płytkie odwierty wiertnicze o głębokości pionowej (TVD) wynoszącej 92 m. Następnie do jednego z nich wprowadzono wodę i pozostawiono w takim stanie na 5 godzin. Intencją tego działania było spowodowanie maksymalnych zmian w geometrii odwiertu. Jak można zobaczyć na Rysunku 96, podczas pomiaru kawernomierzem wykryto zwężenie między 73 a 74m. Ze względów organizacyjnych, nie było możliwe przeprowadzenie operacji finalizacji odwiertu bezpośrednio po przeprowadzonym pomiarze kawernomierzem, a do czasu rozpoczęcia cementowania minęły kolejne 4 godziny. Dalsze zmiany w geometrii otworu potwierdzają również problemy z zapuszczeniem kolumny od poziomu 73m, gdzie kolumna musiała być zapuszczana tak

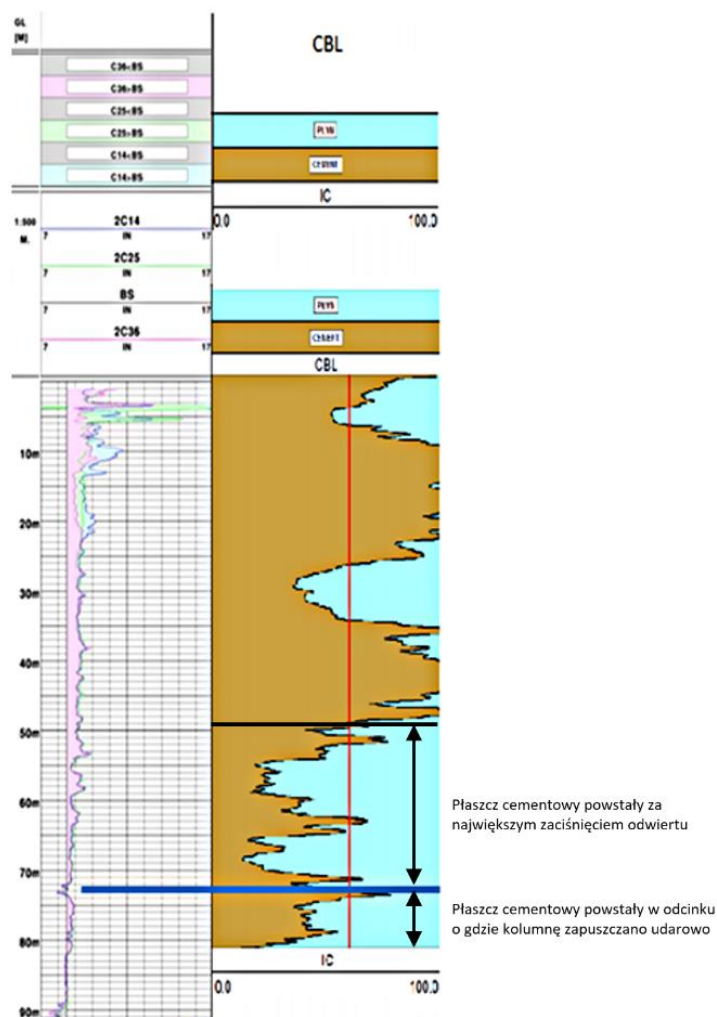
zwanym ruchem młotkowym. Można więc zakładać, iż zaciśnięcie odwiertu pogłębiło się w tym czasie. Problemy z zapuszczeniem kolumny poniżej 74m wskazuje, że poniżej tego poziomu również mogło dojść do zmian geometrii związanych z występowaniem formacji ilastych, lub powstałych w wyniku osypania ściany odwiertu.

Do tego odwiertu wprowadzono 7-calową kolumnę rur i wykonano cementowanie zgodnie z praktyką branżową. Po odczekaniu zalecanych 28 dni przeprowadzono pomiary CBL.

W rezultacie, powyżej poziomu, na którym odkryto zaciśnięcie odwiertu można zaobserwować ponad 20-metrowy przedział charakteryzujący się niewystarczającym związaniem płaszczka cementowego z kolumną rur. Taki wynik nie był obserwowany w odwiercie kontrolnym.

Pomimo braku możliwości jednoznacznego ustalenia geometrii otworowej, można zakładać, iż przynajmniej w jednym miejscu powstał przekrój zbliżony do częściowego zamknięcia przestrzeni pierścieniowej.

Na Rysunku 96 czerwona pionowa linia reprezentuje przyjęty w przemyśle poziom akceptowalnego związania płaszczka cementowego z rurą. Reprezentuje on poziom 60% możliwej redukcji amplitudy, gdyby kolumna rur była całkowicie związana z płaszczem cementowym. Horyzontalna niebieska linia wskazuje poziom, na którym wystąpiły zmiany geometrii otworu.



Rysunek 96 Wyniki testu na płytkim otworze badawczym - kawernomierz + wyniki CBL [58]

Wynik ten potwierdza postawioną tezę odnoszącą się do negatywnego wpływu zmian przestrzeni pierścieniowej na wynik operacji cementowania, jednak zakładając, że rzeczywiście istnieje taka korelacja, powinna być zauważalna w odwiertach komercyjnych. Taka analiza została przeprowadzona, a jej wyniki zostały opisane w kolejnym rozdziale.

### Analiza danych z otworów komercyjnych

Dzięki uprzejmości spółki PGNiG S.A., która udostępniła dane, możliwe było wykonanie analizy 6 odwiertów komercyjnych zlokalizowanych na terenie Polski. W jednym z nich odkryta została intensywna redukcja prześwitu (Rysunek 97). Pomiędzy 2721 i 2723 metrem wyniki wskazują, iż wartość średnicy odwiertu jest na poziomie 7 cali, a w ostatniej części tego odcinka osiąga wartość nawet niższą, z najniższym wskazaniem równym 6,1259 cala. Rozmiar wiertła użytego w tej sekcji odwiertu to 8,5 cala. Do odwiertu zapuszczono i zacementowano kolumnę



rur o średnicy 7 cali z łączeniami między sekcjami o średnicy 7,5 cala. Przy zapuszczeniu kolumny rur niezbędne było użycie ruchu młotkowego. Pomimo to utrzymano cyrkulację płuczki w odwiercie. Wskazuje to, iż na tej głębokości powstała geometria ułożenia rury względem ściany odwiertu opisana w rozdziale 4 jako częściowe zamknięcie przestrzeni pierścieniowej. Inną równie prawdopodobną ewentualnością jest pewna wypadkowa lokalnego zamknięcia z lokalnym zwężeniem przestrzeni pierścieniowej. Niestety do ustalenia dokładnej sytuacji otworowej brak jest kluczowych danych jak lokalne pochylenie osi odwiertu czy wykres ciśnienia agregatu płuczkowego w domenie czasu, na którym można spodziewać się skokowego wzrostu wartości po zapuszczeniu kolumny poniżej poziomu 2723m.

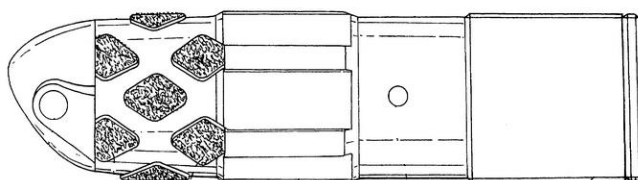
głębokość	średnica wiertła	zapis wychyleń łap kawernomierza			
2720.1000	8.5000	8.4649	8.9728	9.1175	8.5930
2720.2000	8.5000	8.4915	9.0147	9.0638	8.7108
2720.3000	8.5000	8.3787	9.2071	8.9406	8.7064
2720.4000	8.5000	8.3757	9.1040	8.6971	8.7061
2720.5000	8.5000	8.4130	9.0165	8.6596	8.7869
2720.6000	8.5000	8.3609	9.0293	8.6246	8.7835
2720.7000	8.5000	8.2818	8.9441	8.7238	8.6354
2720.8000	8.5000	8.1369	8.8366	8.5159	8.3682
2720.9000	8.5000	7.9168	8.6761	7.7552	7.9683
2721.0000	8.5000	7.7562	8.5181	7.2775	7.7748
2721.1000	8.5000	7.4323	8.0573	7.4309	7.6644
2721.2000	8.5000	7.0576	7.7948	7.4636	7.0879
2721.3000	8.5000	6.7074	7.5930	7.3540	6.4754
2721.4000	8.5000	6.5958	7.4011	7.3045	6.3240
2721.5000	8.5000	6.5724	7.2408	7.2667	6.2966
2721.6000	8.5000	6.5505	7.1647	7.2260	6.2739
2721.7000	8.5000	6.5263	7.1135	7.2012	6.2288
2721.8000	8.5000	6.5267	7.0724	7.1442	6.2220
2721.9000	8.5000	6.5312	7.0452	7.0797	6.2055
2722.0000	8.5000	6.5539	7.0034	7.0385	6.2247
2722.1000	8.5000	6.5601	6.9808	7.0444	6.2292
2722.2000	8.5000	6.5613	6.9461	7.0783	6.2254
2722.3000	8.5000	6.5892	6.8992	7.0629	6.2671
2722.4000	8.5000	6.5916	6.8804	7.0657	6.2846
2722.5000	8.5000	6.5656	6.8889	7.0638	6.2363
2722.6000	8.5000	6.5437	6.9027	7.0453	6.1855
2722.7000	8.5000	6.5194	6.9251	7.0608	6.1471
2722.8000	8.5000	6.5219	6.9690	7.1098	6.1767
2722.9000	8.5000	6.5613	7.0063	7.1839	6.1864
2723.0000	8.5000	6.5787	7.1240	7.3506	6.1717
2723.1000	8.5000	6.6240	7.3687	7.5566	6.1259
2723.2000	8.5000	6.7239	7.6166	7.3234	6.3694
2723.3000	8.5000	7.1651	7.9047	7.5843	6.9108
2723.4000	8.5000	8.2308	8.7408	8.5960	8.2614
2723.5000	8.5000	8.9390	9.3494	9.0938	9.3885
2723.6000	8.5000	9.3843	9.6232	9.3361	9.9203
2723.7000	8.5000	9.7136	9.8404	9.6213	10.3020
2723.8000	8.5000	9.7762	9.8415	9.7354	10.3873

Rysunek 97 Wyniki pomiaru średnicy otworu kawernomierzem, 4 kolumny wskazań wynikają z zastosowania kawernomierza 8 ramiennego

W skrajnych sytuacjach tego typu zaciśnięcia wymagają użycia specjalnego sprzętu otworowego typu guide shoe lub reamer shoe (Rysunek 98), a nawet ponownego przewiercenia tej części odwiertu. Oznacza to konieczność ponownego montowania i zapuszczania przewodu wiertniczego. Dla głębokości powyżej 2 tysięcy metrów to utrata dnia pracy wiertni i osób

zaangażowanych. Biorąc pod uwagę ilość zespołów i konieczność ich pozostawiania w gotowości do wykonania swojego zadania, jest to poważne obciążenie budżetu całego projektu.

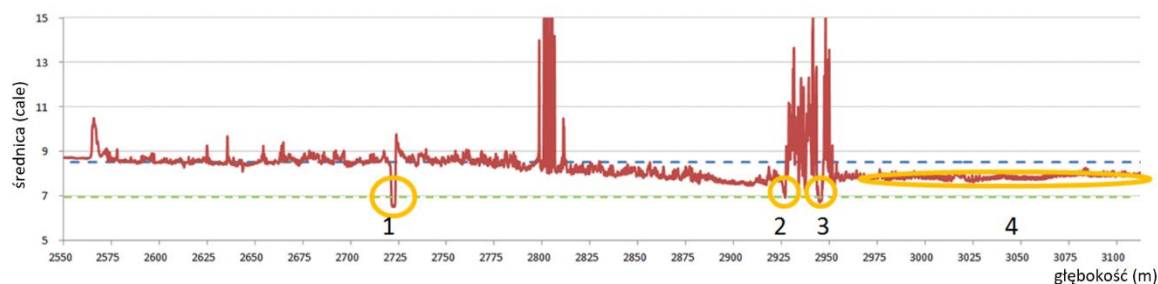
Jak zaznaczono wcześniej, obecnie pomiary kawernomierzem przeprowadzone są w celu ustalenia objętości zaczynu i potwierdzenia czy możliwe jest zapuszczenie kolumny rur na planowaną głębokość. Badania nad negatywnym wpływem częściowego zamknięcia przestrzeni pierścieniowej mogą prowadzić do stworzenia oprogramowania przewidującego lokalną geometrię przestrzeni pierścieniowej, które ułatwiłoby podjęcie decyzji w przypadku wysokiego ryzyka wystąpienia takiej sytuacji w otworze. W wielu przypadkach wykorzystanie dodatkowego sprzętu czy nawet utrata dodatkowego dnia pracy wiertni, może oznaczać mniejsze straty niż potencjalne konsekwencje braku poprawnego płaszcza cementacyjnego. Przykładem może być omówiona katastrofa w Zatoce Meksykańskiej.



Rysunek 98 Narzędzie otworowe typu reamer shoe [85]

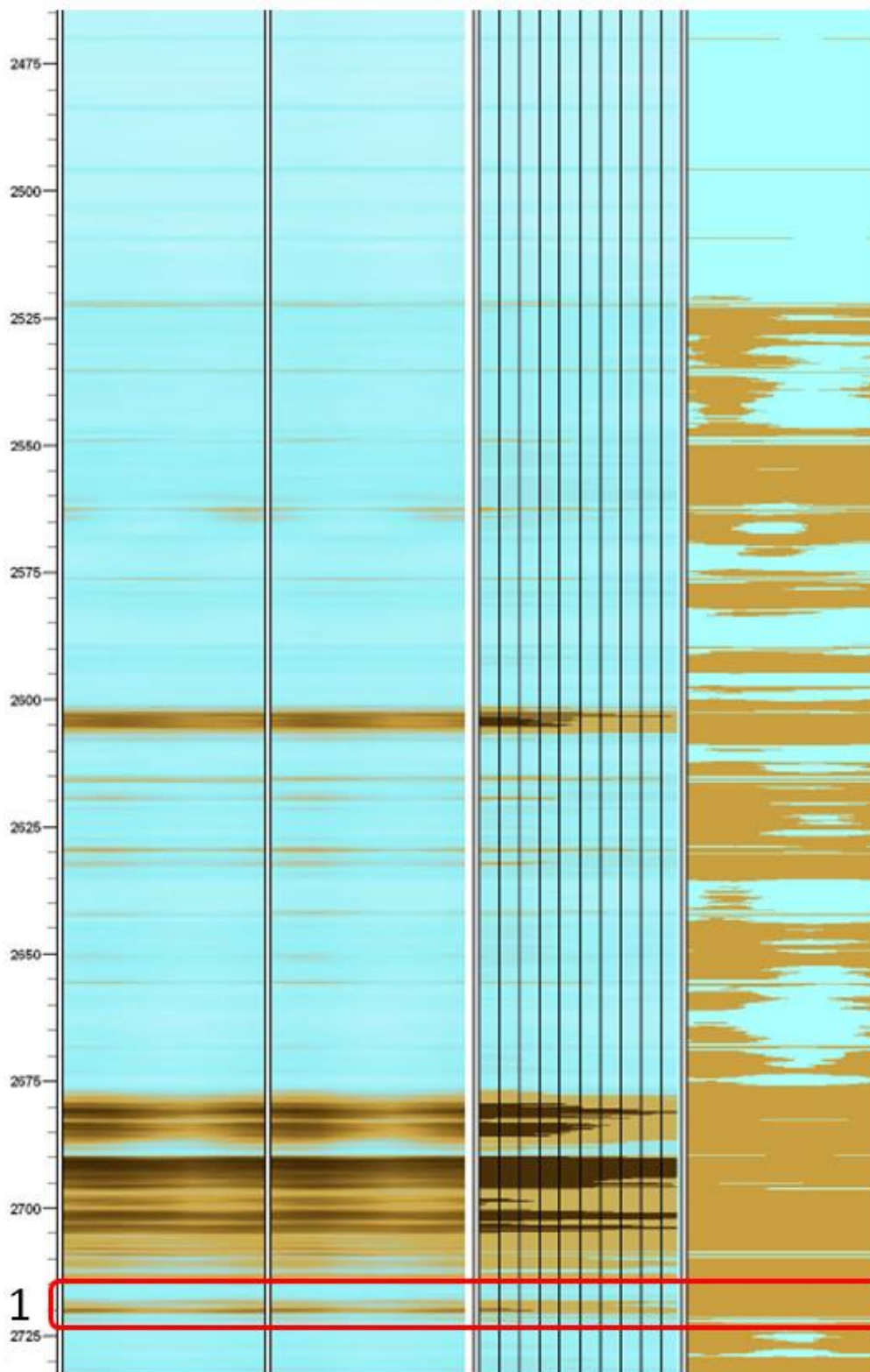
Podobna sytuacja zaciśnięcia prześwitu powtórzyła się trzy razy w tej sekcji odwiertu (na głębokości 2723m, 2928m i 2945m - Rysunek 99). Dodatkowo wystąpiła intensywna redukcja średnicy w przedziale 2960-3125 metrów. Zielona przerywana linia wskazuje średnicę cementowanej kolumny rur, która trzykrotnie przecina lokalne wskazania kawernomierza. Założyć należy, że w całym cementowanym odcinku sytuacja otworowa określana jako częściowe zamknięcie przestrzeni pierścieniowej wystąpiła trzykrotnie, właśnie na wyszczególnionych poziomach, gdzie największe zmiany dotyczyły omówionego poziomu 2723m. Odcinek oznaczony numerem 4 może świadczyć o dużej niestabilności odwiertu na całej jego wysokości. Tak intensywna zmiana względem średnicy wiertła (kolor niebieski) może być wynikiem pęcznienia formacji ilastych lub osunięcia się ściany odwiertu. Na tę drugą alternatywę mogą wskazywać bardzo duże wzrosty średnic zarejestrowane na głębokości 2800-2815m oraz 2930-2955m świadczące o dużym ubytku materiału skalnego. Zmiany otworowe są jeszcze bardziej widoczne, kiedy uwzględni się ruch spiralny wiertła powodujący, iż początkowa średnica odwiertu była jeszcze większa niż zaznaczony niebieską linią poziom. Ponownie, do czasu rozpoczęcia procesu cementowania, na skutek opóźnień wywołanych czynnościami związanymi z wyciągnięciem

osprzętu pomiarowego, zapuszczeniem kolumny rur itd., końcowe zmiany geometrii mogły być jeszcze większe niż te zarejestrowane całe godziny przed rozpoczęciem procesu.



Rysunek 99 Wyniki pomiaru kawernomierzem w przedziale 2550-3150m  
kolor czerwony – wskazania kawernomierza, niebieski – średnica wiertła, zielony – zewnętrzna średnica kolumny rur

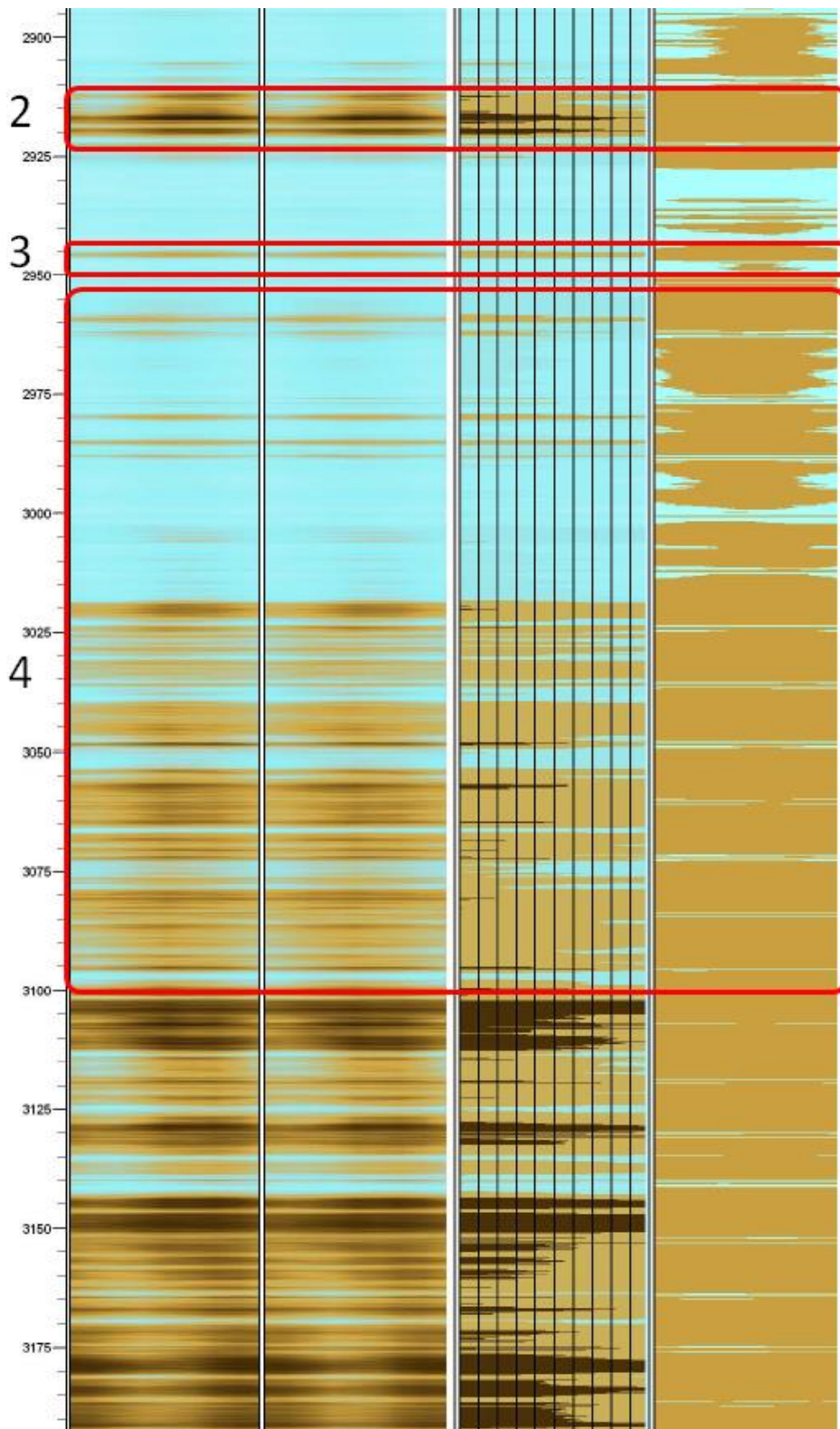
Te niekorzystne zmiany geometrii przestrzeni pierścieniowej należy zestawzić z wynikami stanu zacementowania tego odcinka (Rysunek 100 i 101). Kluczowe są na nich kolumny po prawej stronie reprezentujące zwiążanie cementu z kolumną rur i obecnością cementu na danej głębokości. W uproszczeniu, kolor brązowy wskazuje obecność cementu, a niebieski jego brak. Widać, że powyżej poziomu 1 wystąpiło stopniowe pogorszenie jakości zacementowania (2723-2450m) z ponad 70 metrowym odcinkiem wskazującym na niemal całkowity brak zwiążania cementu z rurą (2522-2450m). Taki wynik może wskazywać na wystąpienie kanału typu II lub V, gdzie bardzo prawdopodobne jest wytworzenie się przepływu palcowego i minimalne wypełnienie przestrzeni pierścieniowej zaczynem cementowym na danej głębokości.



Rysunek 100 Wyniki stanu zacementowania, od lewej - głębokość, mapa amplitudy, znormalizowana mapa amplitudy, mapa związania, mapa obecności cementu, 2460-2730m

Analogiczne są również wyniki dla pozostałych poziomów, gdzie widoczna jest korelacja między wystąpieniem zaciśnięcia odwiertu, a wyraźnym pogorszeniem stanu zacementowania.





Rysunek 101 Wyniki stanu zacementowania, od lewej - głębokość, mapa amplitudy, znormalizowana mapa amplitudy, mapa związania, mapa obecności cementu, 2890-3190m

Jest to zatem kolejne po wynikach na stanowisku badawczym potwierdzenie postawionej tezy o negatywnym wpływie zmian geometrii na proces wypierania w przestrzeni pierścieniowej.

## Rozdział 6 Omówienie wyników i wnioski

W toku przeprowadzonych badań udowodniono negatywny wpływ przeszkód przepływu na proces wypierania się cieczy w przestrzeni pierścieniowej, potwierdzając postawioną tezę. Może to pozytywnie wpłynąć na zmiany procedur branżowych. Badania stanowią empiryczny argument uzasadniający dodatkowy koszt na etapie finalizacji odwiertu. Mając na uwadze ograniczenie ryzyka migracji płynów złożowych czy uszkodzeń odcinka spowodowanych procesami korozji, zespół realizujący może podjąć decyzję o ponownym rozwierceniu czy wykorzystaniu dodatkowego sprzętu otworowego, niwelującego zmiany geometrii.

Otwiera to drogę do wdrożenia nowych procedur i technologii optymalizacji geometrii otworu wiertniczego przed rozpoczęciem procesu cementowania. Odpowiednim przykładem może być nowy typ buta cementacyjnego opracowany na Politechnice Gdańskiej.



Rysunek 102 Wizualizacja opracowanego buta cementacyjnego i gotowe urządzenie podczas testów na odwiercie głębokim

Dzięki stworzonemu rozwiązaniu, narzędzie to skrawa nadmiar materiału skalnego, rozdrabnia go i odprowadza na powierzchnię zapobiegając odkładaniu się go na ścianach kolumny rur czy odwiertu w postaci mud cake'ów (Rysunek 103). Główną zaletą tego narzędzia jest zapewnienie odsunięcia promieniowego, niezbędnego do usunięcia kieszeni płuczkowych i wytworzenia prawidłowego płaszczu cementowego [86].



Rysunek 103 Rozdrobnione zwiernicy materiału skalnego w wyniku pracy urządzenia

Szczególnie istotne są wyniki częściowego zamknięcia przestrzeni pierścieniowej. Wyniki badań wskazują, że gdy podczas pomiaru kawernomierzem zostanie wykryta znaczna redukcja prześwitu, taka sekcja powinna zostać przywrócona do stanu podstawowego przed przejściem do etapu cementowania.

Wyniki badań jasno pokazują, iż miejscowe zmiany w przestrzeni pierścieniowej mogą mieć często nawet bardziej negatywny wpływ na skuteczność wyparcia cieczy z przestrzeni pierścieniowej w porównaniu do sytuacji ecentrycznej. Jest to tym bardziej istotne, gdy weźmie się pod uwagę, iż wpływowi braku koncentryczności poświęcono w ostatnich kilkudziesięciu latach wiele badań (w tym eksperymentalnych), podczas gdy wpływ miejscowych zmian geometrii poruszony był w otwartej literaturze jedynie raz, w bardzo ogólnej analizie numerycznej.

W rozprawie wykazano, iż wraz ze zwężaniem prześwitu przestrzeni pierścieniowej maleje skuteczność procesu wyparcia. Warto zaznaczyć, iż w przypadku małego stopnia zmian (25% zwężenie przestrzeni pierścieniowej), wyniki stopnia wyparcia są bardzo zbliżone do wyników testów wykonanych na koncentrycznej przestrzeni pierścieniowej. Dopiero 75% zwężenie przestrzeni pierścieniowej doprowadziło do wyraźnego spadku skuteczności wyparcia cieczy wypieranej.

Analogiczna relacja zachodzi dla przestrzeni pierścieniowych z częściowym zamknięciem prześwitu. Wyraźnie widać, iż wraz ze zmniejszaniem się prześwitu spada skuteczność wyparcia cieczy wypieranej. Wyniki te pozostają jednak na stosunkowo dobrym poziomie dopóki różnica gęstości cieczy wypieranej i wypierającej sprzyja procesowi wypierania (ciecz wypierana jest mniej gęsta od cieczy wypierającej). W takich warunkach powstanie kieszeni w płaszczu cementowym jest stosunkowo mało prawdopodobne. Jednak, jak pokazały wyniki, prawdopodobieństwo to

wzrasta jeśli ciecz wypierana ma większą gęstość. W takim wypadku zaobserwowano wystąpienie tzw. przepływu palcowego, gdzie bezpośrednio za przeszkodą wytworzył się obszar z całkowicie niewypartą cieczą wypieraną (ang. mud pocket). Pomimo, że w pracach komercyjnych zawsze dąży się do uniknięcia takiej sytuacji poprzez staranne dobieranie zestawu cieczy otworowych (różnica w gęstości każdej analizowanej pary to minimum 20%, gdzie każda kolejna wprowadzana do otworu ciecz jest gęstsza od poprzedniej), to jednak ze względu na warunki otworowe (np. ucieczka płynów otworowych) nie zawsze jest to możliwe. Połączenie 90% zamknięcia przestrzeni pierścieniowej z sytuacją kiedy to ciecz mniej gęsta wypierała ciecz o większej gęstości dało najniższą skuteczność wyparcia ze wszystkich przeprowadzonych testów.

**Badanie, jako pierwsze w otwartej literaturze analizuje eksperymentalnie wpływ ruchu posuwisto-zwrotnego kolumny rur na skuteczność procesu wypierania cieczy. Udowodniono, że taki ruch zwiększa skuteczność wyparcia cieczy wypieranej w przestrzeni pierścieniowej, potwierdzając postawioną tezę.** Jak podkreślono, informacje na temat tej zależności można znaleźć w wielu źródłach literaturowych, jednak to badanie jako pierwsze potwierdza empirycznie wcześniejsze założenia. Na tym etapie nie można jednak odpowiedzieć na pytanie, czy zaleta implementacji tego ruchu przewyższa związane z nim ryzyko. Dodatkowo udowodniono, iż implementacja zarówno ruchu posuwisto-zwrotnego, jak i ruchu obrotowego pozwala na uzyskanie wyższej skuteczności wyparcia cieczy niż w przypadku wykorzystania tylko jednego rodzaju ruchu.

**Udowodniono, iż implementacja ruchu obrotowego zwiększa skuteczność wyparcia cieczy z przestrzeni pierścieniowej oraz, że jednoczesne zastosowanie ruchu obrotowego i posuwisto-zwrotnego zwiększa skuteczność wyparcia cieczy z przestrzeni pierścieniowej w porównaniu do sytuacji, w której wykorzystuje się tylko ruch obrotowy lub tylko ruch posuwisto-zwrotny.**

Potwierdzono również szereg zależności, które zostały przeanalizowane w poprzednich badaniach. Jako przykłady:

- potwierdzono, iż skuteczność wyparcia cieczy z przestrzeni pierścieniowej maleje wraz ze wzrostem stopnia ecentryczności,
- potwierdzono wzrost skuteczności wypierania cieczy przy zwiększeniu natężenia przepływu,
- potwierdzono, iż wraz ze wzrostem pochylecia osi odwiertu zmniejsza się skuteczność wyparcia,
- potwierdzono, iż zachowanie prawidłowej różnicy w gęstości zastosowanych par cieczy ma kluczowe znaczenie dla procesu wypierania.



Wyniki tego badania są tym bardziej znaczące dla zrozumienia procesu wypierania w przestrzeni pierścieniowej, ponieważ od czasu zaprojektowania i skonstruowania stanowiska badawczego przez Tehrani w 1992 r. [53] przeprowadzono zaledwie kilka badań eksperymentalnych opisanych w otwartej literaturze.

Badanie to jest istotnie również ze względu na zastosowane natężenie tłoczenia, które po uwzględnieniu skalowania przekroju poprzecznego stanowiska, odpowiadało warunkom otworowym. Większość badań opierała się na natężeniach przepływu o rząd wielkości mniejszych dla porównywalnych średnic przestrzeni pierścieniowej. Pozwoliło to na potwierdzenie ich założeń w warunkach bardziej zbliżonych do rzeczywistych.

## **Rozdział 7 Rekomendacje**

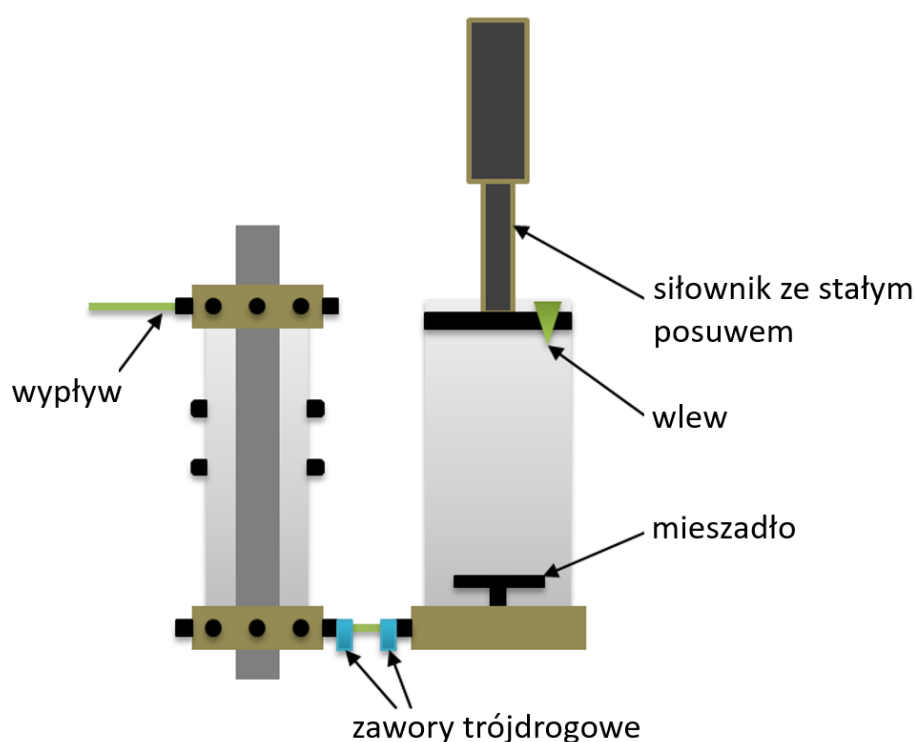
Pomimo przeprowadzonych na przestrzeni ostatnich dekad licznych badań, konieczna jest dalsza analiza procesu wypierania cieczy w przestrzeni pierścieniowej. Potrzeba ta jest wymuszana przez stale rosnące zapotrzebowanie na węglowodory i sięganie po coraz mniej dostępne złoża. Choć można założyć, że w przeciągu kilku dziesięcioleci zmniejszy się wpływ gazu i ropy naftowej na rozwój cywilizacji ludzkiej, to w dalszym ciągu mają one kluczowe znaczenie dla przetrwania społeczeństwa na jego obecnym poziomie. Potencjalne konsekwencje związane z niepowodzeniem operacji cementowania są tak znaczące, że optymalizacja tego procesu jest koniecznością.

### **Optymalizacja stanowiska badawczego**

Podczas pracy na stanowisku badawczym pojawiły się pewne obserwacje, których implementacja mogłaby przyspieszyć przyszłe badania, oraz poprawić ich jakość. Obejmują one:

- wdrożenie układu tłoczenia cieczy wypierającej opartego na siłowniku/silniku ze stałym posuwem zmniejszyłoby liczbę nieudanych eksperymentów i zapewniłoby osiągnięcie bardziej porównywalnych warunków,
- zmniejszenie odległości między zbiornikiem, a objętością pierścienia zmniejszyłoby problem sedymentacji,
- zastosowanie i umiejscowienie zaworów trójdrogowych pokazanych na Rysunku 104 znacznie skróci czas przygotowania eksperymentu,

- zwiększenie liczby czujników przewodności, dodanie czujników ciśnienia i wdrożenie złożonego systemu monitorowania wizualnego umożliwiłoby walidację i optymalizację modeli numerycznych,
- zastosowanie elektrozaworów na doprowadzeniach cieczy wypieranej umożliwiłoby analizę procesu wypierania dla położenia horyzontalnego,
- zastosowanie czujników przepływu rozmieszczonych w przestrzeni pierścieniowej, opartych na pomiarze kąta odchylenia elementu pomiarowego pozwoliłoby na lepszy przegląd lokalnych prędkości przepływu i wykrycie kieszeni cieczy wypieranej, gdzie naprężenie ścinające nie przekroczyłoby granicy płynięcia.

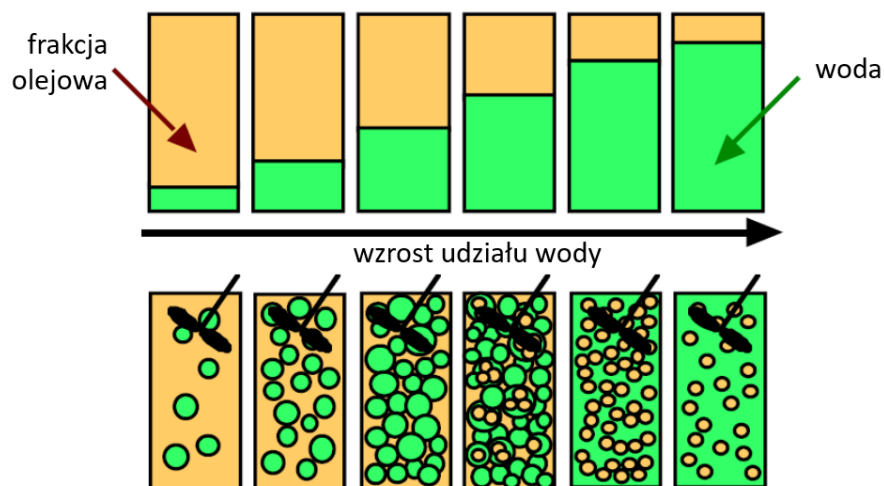


Rysunek 104 Schemat proponowanych zmian w stanowisku badawczym służącym do analizy procesu wypierania cieczy w przestrzeni pierścieniowej

#### Potencjalne kierunki kontynuacji badań związanych z tezą

Pomimo mnogości wpływu pojedynczych czynników przeanalizowanych w ramach tezy, lista kolejnych krytycznych scenariuszy eksperymentalnych jest wielokrotnie dłuższa. Zaliczyć tu można analizę wpływu czynników powierzchniowo czynnych na proces wypierania. Ich wpływ na skuteczność procesu wyparcia nie był analizowany na żadnym stanowisku badawczym tego typu w otwartej literaturze, a wnioski z przeprowadzonych badań miałyby istotne zastosowanie w przemyśle.

Kolejnym ważnym kierunkiem rozwoju badań są płuczki olejowe, które pomimo wyższej ceny nie powodują negatywnych zmian geometrii w przestrzeni pierścieniowej [87]. Dlatego też, analiza migracji interfejsów dla cieczy na bazie oleju i wody znacznie przyczyniłaby się do wzrostu wiedzy branżowej.



Rysunek 105 Wizualizacja wpływu surfaktantów na wypieranie płuczek olejowych [88]

Szczególną uwagę należy poświęcić horyzontalnym otworom, gdzie zachodzi największe ryzyko wystąpienia częściowego zamknięcia prześwitu w wyniku zapadnięcia się ściany odwiertu. Odcinki horyzontalne stwarzają zarazem najwięcej wyzwań związanych z prawidłowym doborem cieczy otworowych, gdzie stabilność cieczy jest kluczowa dla powodzenia operacji cementowania, a sedymentacja połączona z ucieczką cieczy może prowadzić do wytworzenia się kanału w płaszczu cementowym w górnej jego części [89].

Pomimo faktu, że skonstruowane stanowisko testowe teoretycznie pozwoliło na pochylenie głównej osi do położenia horyzontalnego, wady konstrukcyjne znacząco zaburzyły wyniki, które nie zostały zaprezentowane w tej tezie. Implementacja w stanowisku omówionych elektrozaworów pozwoliłaby na otrzymanie zadowalających wyników.

Ponadto, analiza procesu wypierania dla szerokiego zakresu zmian geometrii, warunków otworu wiertniczego i właściwości reologicznych płynów pozwoliłaby przemysłowi podejmować bardziej świadome decyzje, zwłaszcza biorąc pod uwagę ich potencjalne znaczenie i konsekwencje błędów.

## Bibliografia

- [1] Desmond Morris, *The Naked Ape* pp. 2-13, 1967
- [2] McEvedy C., Richard J., *Atlas of World Population History* pp. 342-351, 1978
- [3] Shennum P., *The Effect of Saddle Height on Oxygen Consumption During Bicycle Ergometer Work*, 1976
- [4] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Power Resources Office, *Hydroelectric Power*, 2005
- [5] Zhou H., *Oil Equivalent*, 2018
- [6] U.S. Energy Information Administration, *Annual Energy Outlook 2018*, 2018
- [7] World Health Organization & Unicef, *Levels and Trends in Child Mortality Report 2015*, 2015
- [8] Larsen J., *Effects of Wind Turbines and Other Physical Elements on Field Utilization by Pink-Footed Geese (Anser Brachyrhynchus): A Landscape Perspective*, 2000
- [9] Raugei M., *The Energy Return on Energy Investment (EROI) of Photovoltaics: Methodology and Comparisons with Fossil Fuel Life Cycles*, 2012
- [10] U.S. Energy Information Administration, *Annual Energy Outlook 2019*, 2019
- [11] Kubiszewski I., *Meta-Analysis of Net Energy Return for Wind Power Systems*, 2010
- [12] Ferroni F., *Energy Return on Energy Invested (EROEI) for Photovoltaic Solar Systems in Regions of Moderate Insolation*, 2017
- [13] Khagendra P., *Energy Payback Time (EPBT) and Energy Return on Energy Invested (EROI) of Solar Photovoltaic Systems: A Systematic Review and Meta-Analysis*, 2015
- [14] U.S. Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2019*, 2019
- [15] Chong Z., *Review of Natural Gas Hydrates as an Energy resource: Prospects and Challenges*, 2016
- [16] Organizacja ITER, *Annual Report 2019*, 2019
- [17] Organizacja ITER, *Annual Report 2015*, 2015
- [18] U.S. Energy Information Administration, *Annual Energy Outlook 2020*, 2020
- [19] Wyoming State Geological Survey, *Unconventional Reservoir Types*, 2016
- [20] Texas Standard, *How Fracking and Big Oil is Driving Up Land Prices in The Permian Basin*, 2017
- [21] National Geographic, *Perdido Oil Rig History*, 2013
- [22] Shale, *Sustainability Report*, 2014

- [23] Sabins F., *Ultra-Lightweight Cement Slurries Improve Cement Performance*, 2002
- [24] Mischke K., *Technologia Cementowania*, 1986
- [25] IHS Markit, *Petrodata Offshore Rig Day Rate Trends*, 2017
- [26] NANCE International, *Corrosion in The Oil And Gas Industry*, 2008
- [27] Brondel D., *Corrosion in the Oil Industry*, 2008
- [28] Deawwanich T., *Flow and Displacement of Viscoplastic Fluids in Eccentric Annuli*, 2013
- [29] IHS Markit, *International Exploration & Production Database*, 2017
- [30] Center for Catastrophic Risk Management THSG, *Final Report on The Investigation Of The Macondo Well Blowout*, 2010
- [31] NASA Goddard Space Flight Center, *Terra Satellites Sees Spill on May 24*, 2010
- [32] National Commission on The BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, *The Gulf Oil Disaster and The Future of Offshore Drilling*, 2011
- [33] Biegarczyk B., *Wyciek Ropy Naftowej Do Wód Zatoki Meksykańskiej w 2010 r. – Analiza Katastrofy w Zakresie Bezpieczeństwa Technicznego i Zagrożenia Środowiska Naturalnego*, 2016
- [34] British Petroleum, *Deepwater Horizon Accident Investigation Report*, 2010
- [35] British Petroleum, *Deepwater Horizon Accident Investigation Report Executive Summary*, 2010
- [36] Solorzano G., *Deepwater Horizon Platform Accident Statistics*, 2012
- [37] Rivlin R., *Solution of Some Problems in The Exact Theory of Visco-Elasticity*, *Journal of Rational Mechanics and Analysis* vol. 5 pp. 179-188, 1956
- [38] Fredrickson A., *Non-Newtonian Flow in Annuli*, 1958
- [39] Coleman, B., *Helical Flow of General Fluids*, *Journal of Applied Physics* vol. 30 pp. 1508-1512, 1959
- [40] Fredrickson A., *Helical Flow of an Annular Mass of Viscoelastic Fluid*, 1960
- [41] Kozicki W., *Non-Newtonian Flow in Ducts of Arbitrary Cross-Sectional Shape*, *Chemical Engineering Science* vol. 21 pp. 665-679, 1966
- [42] Hanks, R., *The Flow of Power-Law Non-Newtonian Fluids in Concentric Annuli*, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* vol. 18 pp 33-3, 1979
- [43] Hanks R., *The Axial Laminar Flow of Yield-Pseudoplastic Fluids in a Concentric Annuli*, *Industrial & Engineering Chemistry Process Design And Development* vol. 18, pp. 488-493, 1979
- [44] Iyoho A., *An Accurate Slot-Flow Model for Non-Newtonian Fluid Flow Through Eccentric Annuli*, *Society of Petroleum Engineers Journal* vol. 21, Pp. 565-572, 1981

- [45] Uner D., *Flow of Power-Law Fluid in an Eccentric Annulus*, SPE Drilling Engineering vol. 4, pp. 269-272, 1989
- [46] Ribeiro P., *The Effect of Rotational Speed and Eccentricity on Annular Flows with Application To Slim Hole Drilling Hydraulics*, 1994
- [47] Mclean J., *The Effect of Surface Tension on The Shape of Fingers in a Hale Shaw Cell*, 1967
- [48] Haut R., *Primary Cementing: The Mud Displacement Process*, 1979
- [49] Beirute R., *Mechanics Of The Displacement Process Of Drilling Muds By Cement Slurries Using An Accurate Rheological Model*, 1977
- [50] Juvkam-Wold H., *Casing Deflection And Centralizer Spacing Calculations*, 1992
- [51] Clark J., *Casing Centralizer US Patent Application*, 1950
- [52] Lockyear C., *Cement Channelling: How To Predict And Prevent*, SPE Drilling Engineering vol. 5 pp. 201-208, 1990
- [53] Tehrani A., *Laminar Displacement In Annuli: A Combined Experimental And Theoretical Study*, 1992
- [54] Tehrani A., *Flow Instabilities During Annular Displacement Of One Ono- Newtonian Fluids By Another, Experiments In Fluids* vol. 14 pp. 246-256, 1993
- [55] Savino M., *Flow Displacement Through Non-Rectilinear Oil Wells*, 2009
- [56] Mischke K., *Technologia Cementacyjna*, 1986
- [57] Deawwanich T., *DisplacementOf Viscoplastic Fluids in Eccentric Annuli: Numerical Simulation*, 2008
- [58] Szewczuk P., Szkodo M., *Wpływ Zaburzeń Geometrii na Proces Wypierania w Przestrzeni Pierścieniowej Otworów Wiertniczych*, 2016
- [59] Moroni N., *Pipe Rotation Improves Hole Cleaning And Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Society Of Petroleum Engineers*, 2009
- [60] Enayatpour S., *Advanced Modeling of Cement Displacement Complexities*, 2017
- [61] Barton, S., *New Technology Enhances Rotary Steerable System Performance and Provides Superior Borehole Quality and Reduces Vibration in Rotary Steerable Applications*, 2013
- [62] Bittleston S., *Mud Removal: Research Improves Traditional Cementing Guidelines*, 1979
- [63] Martin M., *Mud Displacement by Slurry During Primary Cementing Jobs - Predicting Optimum Conditions*, 1978
- [64] Nelson E., *Well Cementing*, 2006
- [65] Gafei L., *Eccentric Annulus in a Cement Job*, 2015
- [66] Boman K., *Natural Gas Powering Apache Hydraulic Fracturing Ops*, 2013
- [67] Szewczuk P., Szkodo M., Jankowski R., *Powierzchniowe Badania Mikrosejsmiczne na Odwiercie w Północnej Polsce, Optymalizacja Modelu Prędkościowego*, 2017

- [68] Mason C., *Wellbore Quality Characterization for Drilling and Casing Running in Challenging Wells*, 2007
- [69] Zhang H., Li G., *Numeryczne Symulację Profile Prędkości w Ecentrycznej Przestrzeni Pierścieniowej*, 2014
- [70] Chin W., *Managed Pressure Drilling: Modeling, Strategy and Planning*, 2011
- [71] Chin W., *Computational Rheology for Pipeline and Annular Flow*, 2001
- [72] American Petroleum Institute, *Specification 5CT, 10th Edition*, 2019
- [73] Weatherford, *Casing Accessories*, 2016
- [74] Kiełt M., *Ustalenie Metodologii Wykrywania Potencjalnego Niebezpieczeństwa Puchnięcia Skał Ilastych Na Podstawie Standardowych Parametrów Takich Jak: CDL, CNL and SGR*, 2016
- [75] Batruś T., *Skały Osadowe: Skały Ilaste*, 2017
- [76] Grim R., *Clay Mineralogy*, 1968
- [77] Alexander T., *Well Bore Wall Cleaning Tool US 3390725*, 1968
- [78] B&C Electronics, *Conductivity Transmitters*, 2016
- [79] Techmag, *FM300 Electromagnetic Flowmeter*, 2003
- [80] Bielewicz D., *Płyny Wiertnicze*, 2014
- [81] Data J., *Badania Reologiczne Próbek Układów Dwufazowych Ciecz-Ciało Stałe*, 2015
- [82] Reinecker J., *Borehole Breakout Analysis from Four-Arm Caliper Logs*, 2003
- [83] Hallenborg J., *Non Hydrocarbon Methods of Geophysical Formation*, 1997
- [84] Hayden R., *Case Studies In Evaluation of Cement With Wireline Logs in a Deep Water Environment*, 2011
- [85] Wardley M., *Reamer Shoe US20030075364A1*, 2003
- [86] Bolewski Ł., Szewczuk P., Szkoła M., *Kalibrator Otworowy i Jego Wpływ na Jakość Zacementowania Otworów Wiertniczych*, 2016
- [87] Ismail A., *Prevention of Shale Swelling Using Different Types of Nanoparticles in Water-Based Mud*, 2015
- [88] Quintero L., *Efficient Displacement of Synthetic or Oil-Based Mud and Transitional Phase Inversion*, 2012
- [89] Stryczek S., *Analysis of Technological Parameters of Cementing Slurries for Horizontal Casing Works in Pomeranian Basin*, 2015