

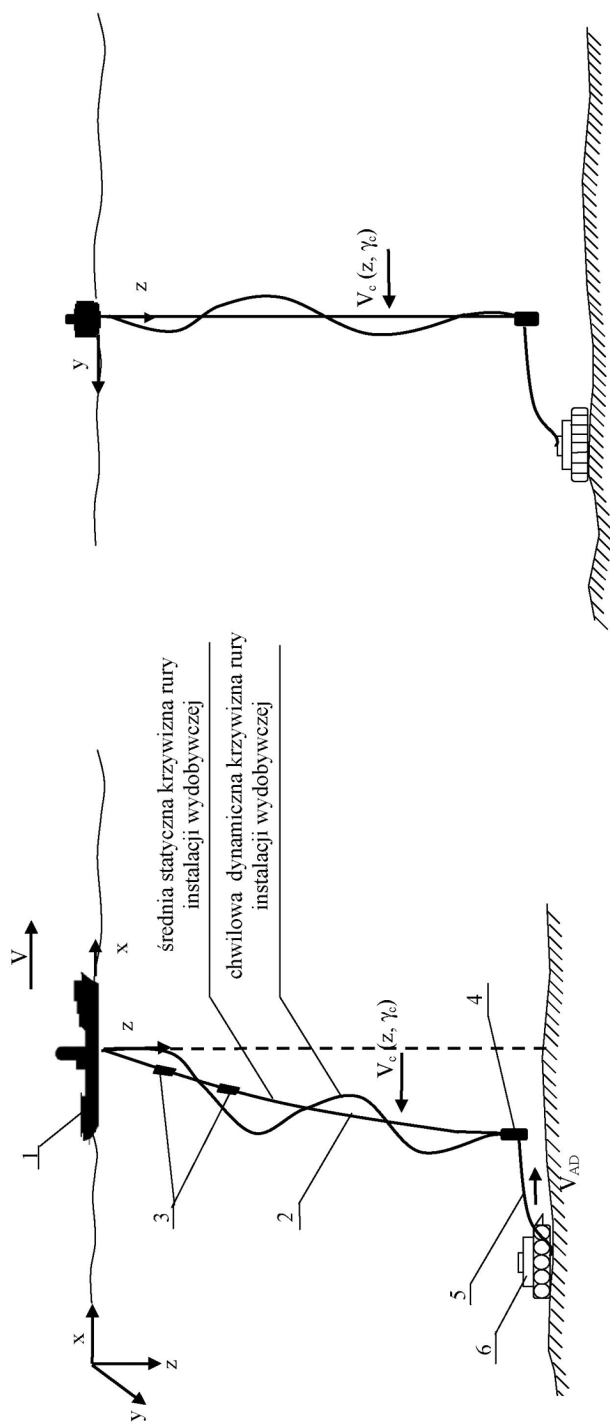
Katarzyna Żelazny, Tadeusz Szelangiewicz**

ODKSZTAŁCENIA I ZMIANY POŁOŻENIA PIONOWEGO RUROCIĄGU PODCZAS WYDOBYWANIA POLIMETALICZNYCH KONKRECCI Z DNA OCEANU

1. Wstęp

Koncepcja hydraulicznego systemu wydobywania polimetalicznych konkrecji przedstawiona została w [2 i 3]. Podczas eksploatacji złoża agregat denny powinien poruszać się ruchem prostoliniowym po wyznaczonym polu zbierając możliwie dokładnie konkrecje znajdujące się na dnie oceanicznym. Prędkość poruszania się agregatu zbierającego zależy od założonej rocznej wydajności, szerokości zbierania (szerokości agregatu) oraz gęstości zalegania konkrecji na dnie [4]. Statek wydobywczy będzie musiał śledzić położenie agregatu na dnie i tak manewrować aby dolny koniec pionowej rury wydobywczej znajdował się w pobliżu agregatu zbierającego. Ruch statku wydobywczego będzie powodował zmiany kształtu — odchylenia od pionu dolnego końca rurociągu wydobywczego (rys. 1). Dolny koniec pionowej rury wydobywczej jest połączony z agregatem zbierającym konkrecje za pomocą elastycznego rurociągu o zerowej lub minimalnie dodatniej pływerności. Długość tego odcinka nie może być nigdy mniejsza niż maksymalna odległość chwilowego położenia dolnego końca pionowej rury wydobywczej od agregatu zbierającego konkrecje. Nie może nigdy wystąpić oddziaływanie pomiędzy dolnym końcem pionowej rury wydobywczej a agregatem zbierającym. Siły reakcji w wyniku takiego oddziaływania doprowadziły by do zerwania elastycznego rurociągu lub do uszkodzenia agregatu zbierającego konkrecje [4]. Stąd podstawowym problemem przy badaniu niezawodności takiej instalacji wydobywczej, oprócz naprężeń występujących w pionowej rurze są deformacje kształtu i odchylenia od pionu dolnego końca rury wydobywczej.

* Wydział Techniki Morskiej i Transportu, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie



Rys. 1. Komplex wydobywczy do eksploatacji polimetalicznych konkracji z dna oceanu: 1 — statek wydobywczy; 2 — pionowa rura wydobywcza; 3 — pompy głębinowe; 4 — bufor; 5 — poziomy elastyczny rurociąg transportowy; 6 — denny agregat zbierający; V — prędkość statku wydobywczego; V_{AD} — prędkość dennego agregatu zbierającego konkracje, $V_c(z, \gamma_c)$ — prędkość prądu głębinowego, której wartość zależy od głębokości wody z i geograficznego kierunku γ_c prądu

2. Ruch agregatu zbierającego konkretje i statku wydobywczego na powierzchni oceanu

W wielu publikacjach dotyczących badania dynamiki systemu wydobywczego (rys. 1), w tym rurowej instalacji wydobywczej zakłada się, że agregat zbierający konkretje będzie poruszał się odcinkami ruchem prostoliniowym i będzie zawracał na granicy eksploatowanego pola. Przy takiej trajektorii ruchu statek wydobywczy, pływający na powierzchni oceanu też będzie poruszał się po podobnej trajektorii. Ponieważ dno oceanu nie jest płaską równiną, a bardziej przypomina krajobraz księżycowy, to agregat zbierający nie będzie poruszał się ruchem jednostajnym prostoliniowym ale jego prędkość będzie się zmieniać, a trajektoria ruchu będzie wynikała z ukształtowania dna oceanicznego. Stąd też statek wydobywczy będzie musiał dostosowywać swoją trajektorię ruchu do ruchu agregatu zbierającego. Na statek wydobywczy dodatkowo będzie oddziaływało środowisko morskie (wiatr, falowanie oraz ewentualnie oceaniczne prądy powierzchniowe) zakłócając jego trajektorię ruchu. Złożony ruch statku wydobywczego, składający się z ruchu wolnozmiennego wynikającego z manewrowania i szybkozmiennego wynikającego z kołysań statku na fali, będzie wymuszeniem kinematycznym górnego końca pionowego rurociągu. To wymuszenie kinematyczne łącznie z oddziaływaniem oceanicznych prądów głębinowych będzie powodowało odchylenie od pionu (deformację kształtu) rurociągu wydobywczego. Przy długości rurociągu około 5000 m wystąpi duże opóźnienie czasowe pomiędzy wymuszeniem ruchu górnego końca rury wydobywczej a reakcją na ten ruch jej dolnego końca. Kontrola położenia dolnego końca rurociągu wydobywczego względem agregatu zbierającego staje się więc jednym z podstawowych problemów przy projektowaniu tego typu instalacji wydobywczej.

W projekcie badawczym [4] przedstawiono matematyczny model ruchu agregatu zbierającego, model ruchu statku wydobywczego łącznie z losowymi oddziaływaniami od środowiska morskiego oraz model dynamiki pionowego rurociągu wydobywczego.

3. Komputerowe symulacje odkształceń rurowej instalacji wydobywczej

Przeprowadzenie kompleksowej symulacji ruchu agregatu zbierającego konkretje, ruchu statku wydobywczego oraz odkształceń instalacji rurowej w dziedzinie czasu wymaga opracowania specjalnego programu komputerowego oraz mapy dna oceanicznego dla pola, z którego będą wydobywane polimetaliczne konkretje. W takim systemie komputerowym musi być moduł, który z wystarczającą dokładnością będzie wyznaczał chwilowe położenie w toni wodnej poszczególnych elementów (odcinków) pionowej rury wydobywczej przy losowym, zmiennym w czasie wymuszeniu kinematycznym. Istniejące, firmowe oprogramowanie narzędziowe nie bardzo się do tego celu nadaje. Stąd też w pierwszym kroku wykonano symulacje komputerowe dynamiki rury wydobywczej dla zadanego, ustalonego wymuszenia kinematycznego bez analizowania ruchu agregatu zbierającego konkretje. Obliczenia te wykonano programem ABAQUS [1].

Założenia do przeprowadzenia symulacji oraz parametry rury wydobywczej zostały przedstawione w [5].

Ze względu na bardzo dużą liczbę parametrów mających wpływ na dynamikę rurociągu wydobywczego oraz na bardzo dużą liczbę możliwych kombinacji tych parametrów przyjęto, że symulacje wykonane zostaną dla najbardziej reprezentatywnych przypadków.

Symulacje komputerowe przeprowadzono w następującym zakresie:

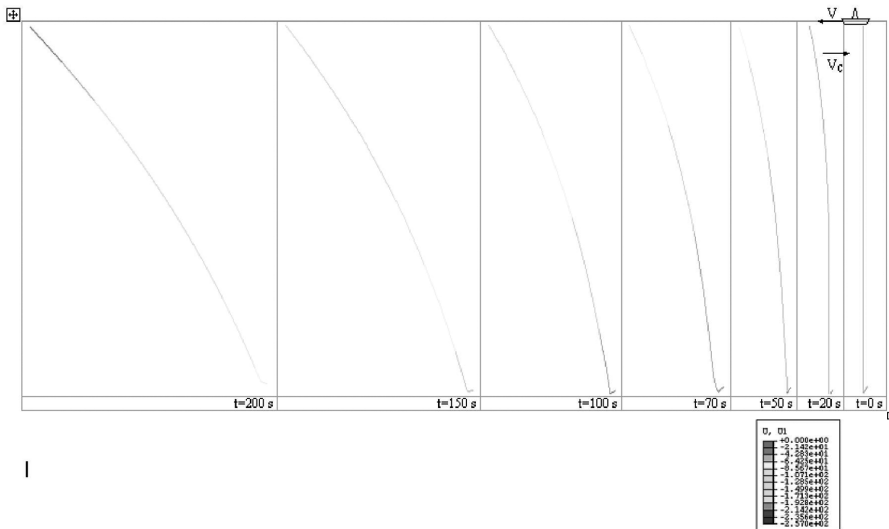
- Statek wydobywczy z opuszczoną rurową instalacją wydobywczą:
 - rusza i płynie ze stałą stabilizowaną prędkością,
 - płynie ze stałą prędkością i zatrzymuje się;
- Statek wydobywczy płynie ze stałą prędkością:
 - prąd głębinowy, działający na rurową instalację wydobywczą, jest skierowany przeciwnie do kierunku ruchu statku,
 - prąd głębinowy skierowany jest prostopadle do kierunku ruchu statku,
 - prąd głębinowy skierowany jest zgodnie z kierunkiem ruchu statku;
- Statek wydobywczy płynie z ustaloną prędkością i jednocześnie wykonuje regularne kołysania:
 - wypadkowa amplituda (S_{Ax}) kołysań leży w płaszczyźnie ruchu statku wydobywczego,
 - wypadkowa amplituda (S_{Ay}) kołysań leży w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ruchu statku wydobywczego.

Zakres parametrów, dla których wykonywano obliczenia był następujący:

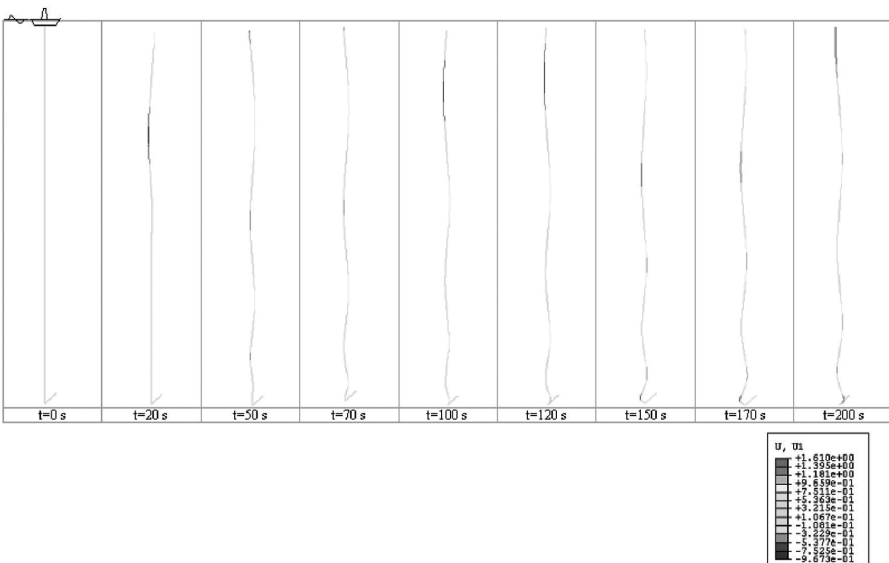
- stabilizowana prędkość statku wydobywczego $V = 0,257; 0,514; 0,771; 1,028; 1,285$ m/s;
- amplitudy kołysań regularnych statku (amplitudy wymuszeń kinematycznych dla rurociągu wydobywczego) dla kierunku wzdłużnego i poprzecznego $S_{Ax} = S_{Ay} = 1; 2; 4$ m,
- częstość kołysań regularnych statku wydobywczego (częstości wymuszeń kinematycznych górnego końca rurociągu wydobywczego) $\omega = 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6$ 1/s;
- prędkość prądu głębinowego:
 - – na głębokości od 0–600 m $V_C = 1$ m/s,
 - – na głębokości od 600–4600 m $V_C = 0,3$ m/s.

Wszystkie symulacje komputerowe wykonano w dziedzinie czasu, natomiast wyniki tych symulacji przedstawiono w postaci graficznej dla danego przypadku obliczeniowego też w dziedzinie czasu (czyli pokazano stan rurociągu wydobywczego dla wybranych kroków czasowych) lub też dla stanu ustalonego (na rysunkach dla stanu ustalonego pokazano wpływ istotnych parametrów związanych z konstrukcją rurociągu, wymuszeniami kinematycznymi od statku wydobywczego lub od środowiska morskiego).

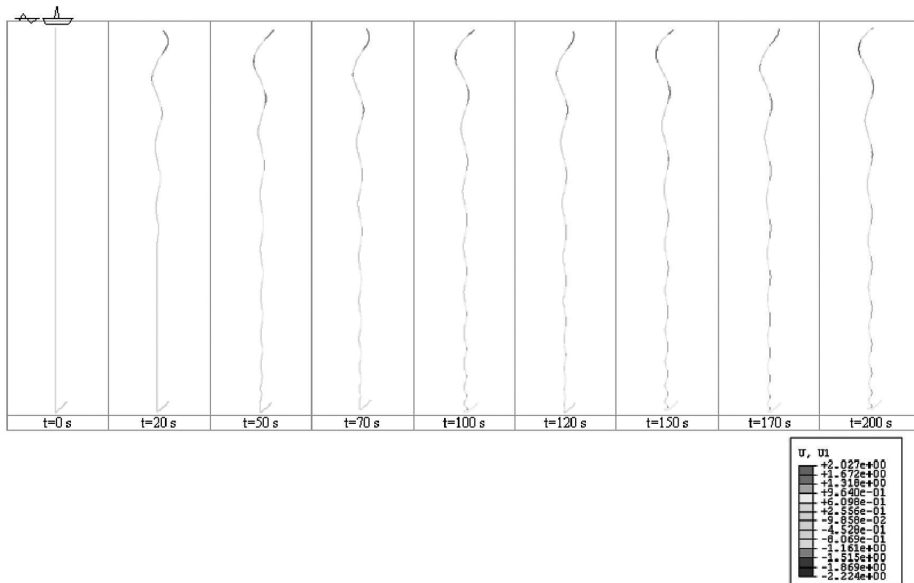
Przykładowe wyniki przeprowadzonych symulacji przedstawiono na rysunkach 2–6. Pełny zakres otrzymanych wyników symulacji zawarty jest w [4].



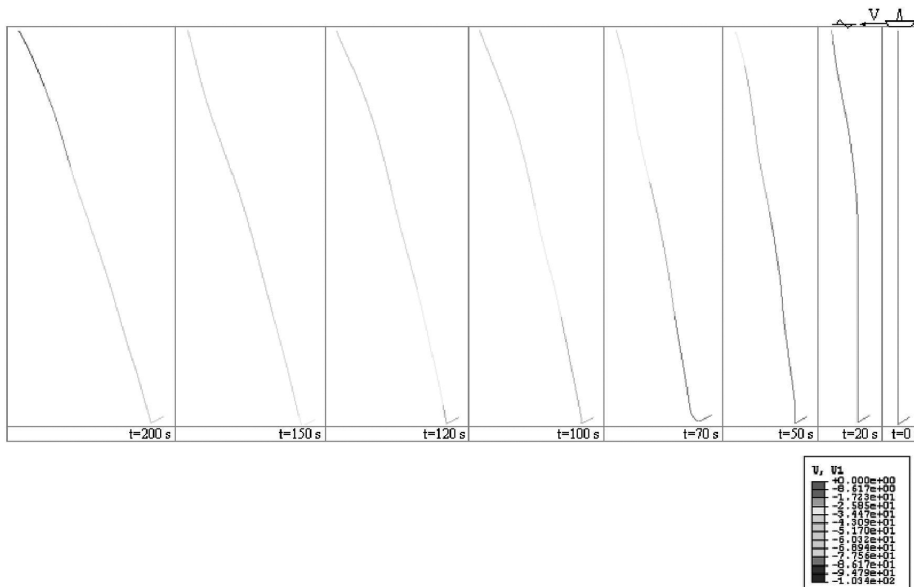
Rys. 2. Symulacja zmian kształtu rurowej instalacji wydobywczej — przemieszczenia poziome rury [m], prędkość statku $V = 1,285$ m/s, prąd głębiny przeciwnie skierowany do prędkości statku



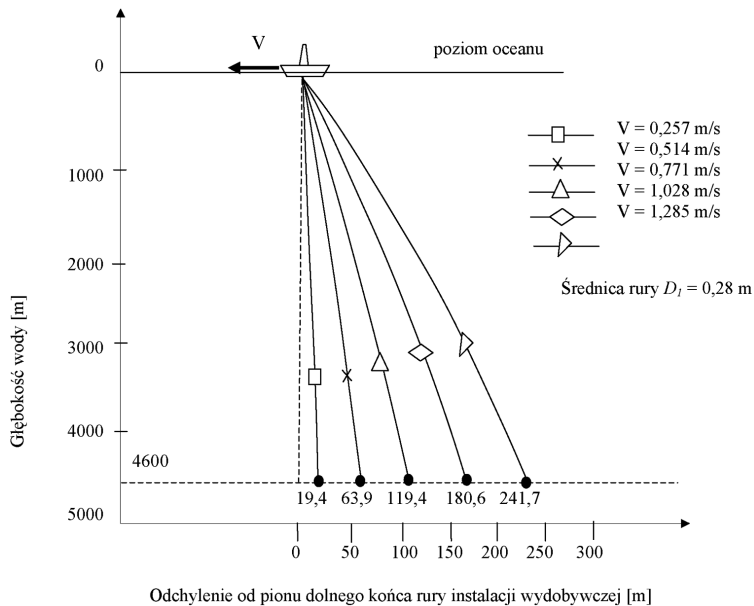
Rys. 3. Symulacja zmian kształtu rurowej instalacji wydobywczej — przemieszczenia poziome rury [m], prędkość statku $V = 0$ m/s, kinematyczne oscylacyjne wymuszenia górnego końca rury o amplitudzie $S_{AK} = 1$ m, częstość wymuszenia $\omega = 0,3$ 1/s



Rys. 4. Symulacja zmian kształtu rurowej instalacji wydobywczej — przemieszczenia poziome rury [m], prędkość statku $V = 0$ m/s, kinematyczne oscylacyjne wymuszenia górnego końca rury o amplitudzie $S_{AX} = 4$ m, częstość wymuszenia $\omega = 1,0$ 1/s



Rys. 5. Symulacja zmian kształtu rurowej instalacji wydobywczej — przemieszczenia poziome rury [m], prędkość statku $V = 0,514$ m/s, kinematyczne oscylacyjne wymuszenia górnego końca rury zgodne z kierunkiem ruchu statku, amplituda wymuszenia $S_{AX} = 2$ m, częstość wymuszenia $\omega = 0,3$ 1/s



Rys. 6. Odchylenie od pionu dolnego końca rury instalacji wydobywczej w funkcji stałej prędkości statku

4. Wstępne wnioski z przeprowadzonych badań

- 1) Deformacje kształtu (odchylenia od pionu) rurowej instalacji wydobywczej zależą przede wszystkim od zakładanej prędkości statku podczas wydobywania konkrecji, od prędkości prądów głębinowych i kołysań statku. Im większe prędkości statku tym większe odchylenia od pionu dolnego końca rurociągu wydobywczego — wielkość tych odchyleń ma decydujące znaczenie na współpracę agregatu zbierającego konkrecje z rurową instalacją wydobywczą.
- 2) Kołysania statku wydobywczego wywołują poprzeczne drgania rury wydobywczej, które szybko zmniejszają swoją amplitudę wraz z głębokością wody. Wymuszenia kinematyczne rury od kołysań statku mają więc mały udział w całkowitych przemieszczeniach (odchylenia od pionu) dolnego końca rury wydobywczej.
- 3) Możliwość ograniczenia deformacji kształtu rurowej instalacji wydobywczej badano poprzez zmianę sztywności materiałowej oraz poprzez dodatkowe elementy tłumiące umieszczone w węzłach obliczeniowych. Zabiegi te nie zmniejszyły quasistatycznych deformacji, natomiast stosując te dodatkowe elementy można było tłumić rezonanse powstające w rurowej instalacji wydobywczej przy niektórych częstościach wymuszeń kinematycznych górnego końca rury.
- 4) Zwiększanie masy bufora także nie spowodowało istotnego zmniejszenia odchyleń dolnego końca rurociągu wydobywczego.

- 5) Jedynym ze sposobów na ograniczenie odchyień od pionu dolnego końca rurowej instalacji wydobywczej jest ograniczenie prędkości ruchu statku nad złożem. Aby jednak zapewnić zakładaną wydajność wydobywania konkrecji musi być odpowiednia szerokość agregatu zbierającego, która też jest ograniczona prawidłową pracą agregatu i ukształtowaniem dna oceanicznego.
- 6) Uniknięcie możliwości oddziaływania dolnego końca rurociągu wydobywczego na agregat zbierający konkrecje z dna jest możliwe także poprzez wydłużenie poziomego, elastycznego rurociągu. Długość tego rurociągu jednak ma także swoje granice — przy znacznej długości istnieje możliwość zginania rurociągu na małym promieniu krzywizny i jego uszkodzenie.

LITERATURA

- [1] ABAQUS/CAE, User's Manual version 6.10
- [2] Projekt koncepcyjny technologii wydobywania polimetalicznych konkrecji (redakcja J. Sobota, B. Szirajew), Wspólna Organizacja Interoceanmetal, Szczecin, 2005 r.
- [3] *Sobota J.*: Oszacowanie zapotrzebowania energii dla systemów podnoszenia konkrecji z dna oceanu, Wspólna Organizacja Interoceanmetal, Szczecin, 2003.
- [4] Sprawozdanie z projektu badawczego 5T12C 012 25: Badanie dynamiki kompleksu wydobywczego do eksploatacji głębokowodnych konkrecji oceanicznych (redakcja T. Szelangiewicz), Szczecin, 2006.
- [5] *Żelazny K., Szelangiewicz T.*: Obciążenia i naprężenia w pionowego rurociągu podczas wydobywania polimetalicznych konkrecji z dna oceanu. I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Górnictwo Morskie, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2011.