

Katarzyna Żelazny, Tadeusz Szelangiewicz**

OBCIĄŻENIA I NAPRĘŻENIA W PIONOWYM RUROCIĄGU PODCZAS WYDOBYWANIA POLIMETALICZNYCH KONKRECCI Z DNA OCEANU

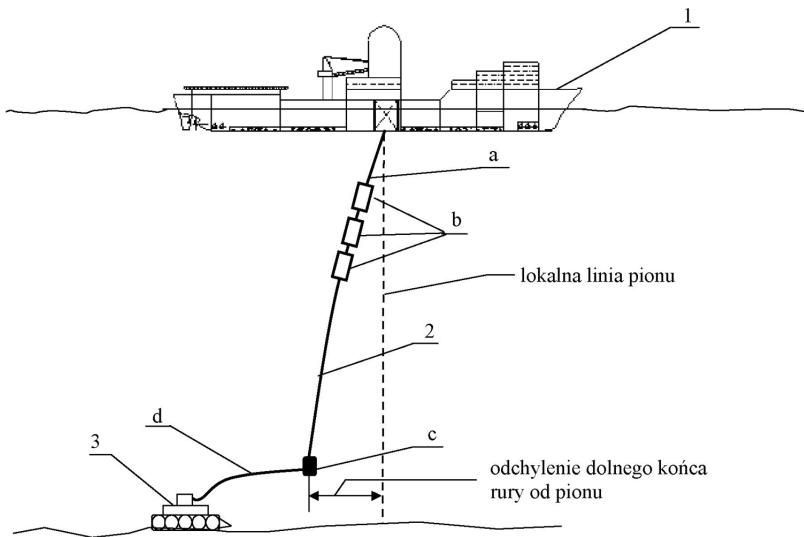
1. Wstęp

Znajdujące się na powierzchni dna oceanów, na dużych głębokościach rzędu 4000–6000 m, konkrecje żelazowo-manganowe są przyszłościowym źródłem cennych metali takich jak: miedź, mangan, nikiel, kobalt i inne. Jedną z metod wydobywania konkrecji, przedstawionych w [5], jest metoda hydrauliczna z pompami głębinowymi (rys. 1).

W metodzie tej, konkrecje zbierane z dna oceanicznego za pomocą specjalnego agregatu z własnym napędem są podawane do pionowego rurociągu wydobywczego, podwieszono do kadłuba statku wydobywczego, pływającego na powierzchni oceanu. Przepływy wody i konkrecji w rurociągu wydobywczym jest realizowany za pomocą pomp głębinowych. Pomiędzy agregatem zbierającym, a pionowym rurociągiem wydobywczym znajduje się odcinek elastycznego rurociągu o zerowej pływalności, którego zadaniem jest kompensowanie zmian odległości pomiędzy agregatem zbierającym konkrecje a dolnym końcem pionowego rurociągu wydobywczego aby nie dopuścić do oddziaływań pomiędzy rurociągiem pionowym a agregatem. Agregat zbierający konkrecje z dna oceanicznego porusza się po określonej trajektorii i nie zawsze jest to ruch prostoliniowy — na tę trajektorię ma wpływ ukształtowanie dna: uskoki, dziury, duże pochyłości. Statek wydobywczy z podwieszoną instalacją rurową będzie poruszał się po trajektorii wynikającej ze śledzenia ruchu agregatu dennego oraz zmian kształtu w toni wodnej rury wydobywczej. Przy planowanej rocznej wydajności takiego kompleksu wydobywczego 1,5 mln ton konkrecji, średnica wewnętrzna rurociągu wydobywczego powinna wynosić około 25 cm [5] przy długości 4000–6000 m. Tak mała średnica w stosunku do długości powoduje, że powstające deformacje kształtu oraz naprężenia w rurowej instalacji wydobywczej będą największym zagrożeniem, a tym

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

samym będą decydować o efektywności i niezawodności pracy kompleksu wydobywczego. Badanie wielkości deformacji kształtu, a szczególnie odchylenie dolnego końca rury od pionu przechodzącego przez górny koniec rury (rys. 1) oraz naprężeń powstających w rurze wydobywczej jest jednym z podstawowych problemów wymagających rozwiązania podczas projektowania kompleksu wydobywczego. Drugim istotnym zagadnieniem jest określenie ewentualnych oddziaływań pomiędzy pionowym a poziomym rurociągiem w przypadku gdy odległość pomiędzy agregatem zbierającym, a dolnym końcem pionowego rurociągu przekroczy długość poziomego, elastycznego rurociągu.



Rys. 1. System wydobywczy do eksploatacji polimetalicznych kongrecji z dna oceanu:
 1 — statek wydobywczy; 2 — rurowa instalacja wydobywcza (a — pionowa rura wydobywcza;
 b — pompy głębinowe; c — bufor; d — poziomy elastyczny rurociąg transportowy);
 3 — denny agregat zbierający

2. Wymuszenia zewnętrzne działające na rurociąg wydobywczy

Podczas prowadzenia prac wydobywczych, ze względu na ukształtowanie dna oceanicznego oraz założoną technologię zbierania kongrecji, trajektoria ruchu agregatu zbierającego nie będzie pokrywała się z trajektorią ruchu statku wydobywczego. Oddziaływanie środowiska morskiego, głównie wiatru i falowania spowoduje, że ruch statku będzie złożony ze zmiennego odcinkami ruchu prostoliniowego i krzywoliniowego (manewry), na który nałożone będą szybkozmiennne przemieszczenia wynikające z kołysań statku wydobywczego na fali.

Wymuszenia i obciążenia działające na rurową instalację w trakcie prowadzenia prac wydobywczych będą więc następujące [6]:

- wymuszenia kinematyczne górnego końca rury pochodzące od ruchu statku wydobywczego;
- obciążenia od względnej prędkości wody (siły oporu i oddziaływania prądów głębinowych);
- obciążenia od przepływającej w rurociągu mieszaniny wody i wydobywanych kongrekcji;
- obciążenia od ciężaru własnego rury i bufora znajdującego się w dolnym końcu rurociągu wydobywczego;
- obciążenia od ewentualnych innych urządzeń zamontowanych na rurociągu wydobywczym (pomp głębinowych, czujników, kabli zasilających agregat denny).

Większość tych wymuszeń i obciążeń będzie wywoływała deformacje kształtu (odchylenia od linii pionowej) instalacji wydobywczej oraz naprężenia w rurociągu.

W tym referacie przedstawiono wyniki symulacji komputerowych naprężeń w pionowym rurociągu wydobywczym, natomiast w [7] przedstawiono symulacje deformacji kształtu.

3. Komputerowe symulacje naprężeń w rurociągu wydobywczym

Ze względu na nieproporcjonalne wymiary (bardzo mała średnica rurociągu w stosunku do jego długości) oraz bardzo złożony ruch górnego końca rury podwieszona do kadłuba statku, opis matematyczny dynamiki rurociągu jest w postaci nieliniowych, stochastycznych równań różniczkowych drugiego rzędu. Pełny opis matematyczny ruchu statku wydobywczego oraz dynamiki rurociągu wydobywczego zamieszczony jest w [3].

Rozwiązanie, czyli wyznaczenie w dziedzinie czasu chwilowego kształtu, prędkości czy przyspieszeń deformacji a także naprężeń, jest możliwe za pomocą metod numerycznych np. metody elementów skończonych (MES) [2, 3, 4].

Symulacje komputerowe zostały wykonane dla następujących danych [6]:

- wymiary rurowej instalacji wydobywczej:
 - długość rury — $L_R = 4600$ m,
 - średnica zewnętrzna — $D_Z = 0,28$ m,
 - średnica wewnętrzna — $D_W = 0,25$ m;
- materiał rury: stal konstrukcyjna:
 - ciężar jednostkowy rury w powietrzu — $\rho_{RP} = 0,923$ kN/m,
 - ciężar jednostkowy rury w wodzie — $\rho_{RW} = 0,835$ kN/m,

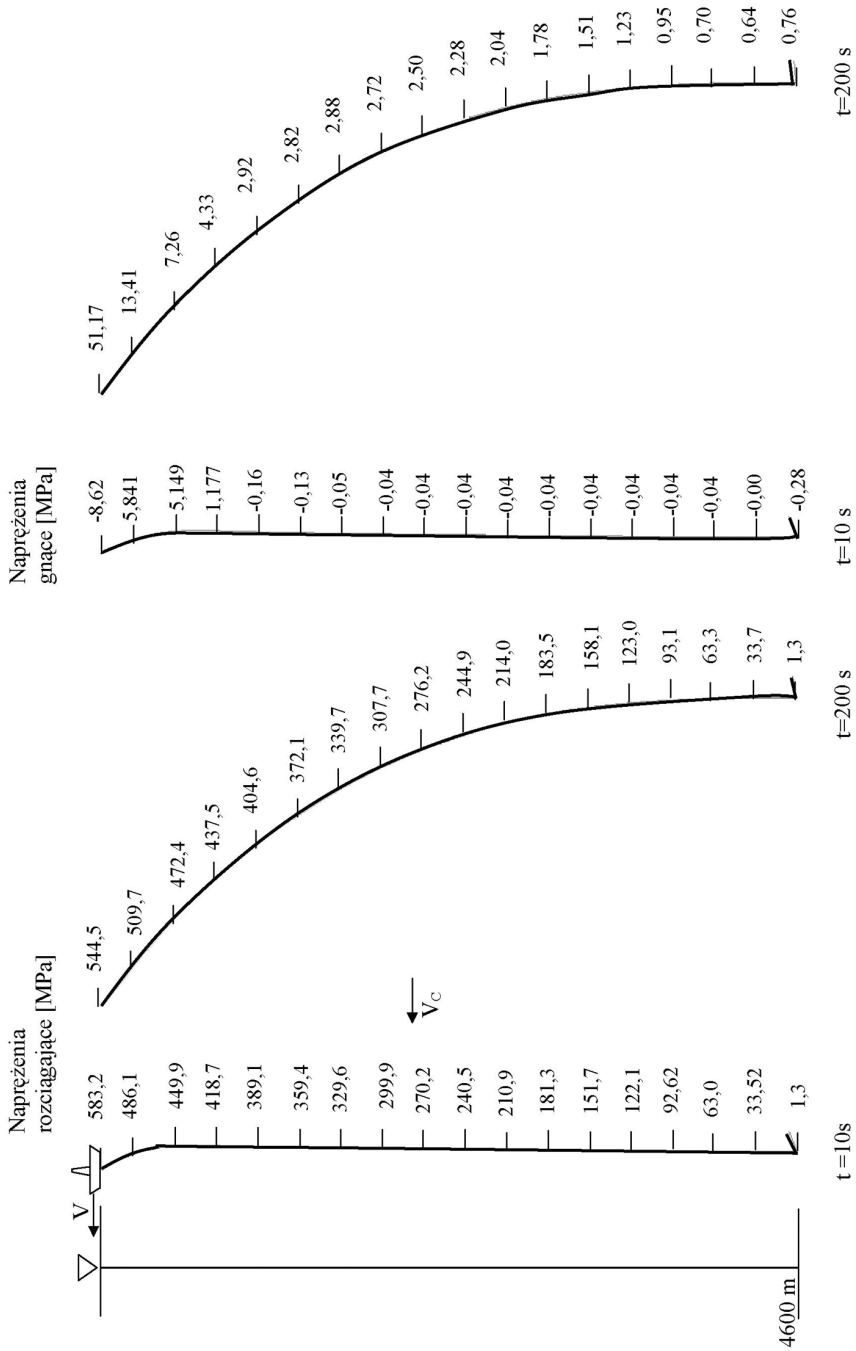
- moduł sprężystości Younga — $E = 210 \text{ GPa}$,
 - granica plastyczności — $Re = 350 \text{ MPa}$;
- mocowanie górnego końca rury na statku wydobywczym:
- górny koniec rury zamocowany jest przegubowo na statku wydobywczym — na rurę nie są przenoszone momenty skręcające ani zginające,
 - wymuszenie kinematyczne jest w płaszczyźnie poziomej;
- ciężar bufora w wodzie: 2 kN ,
- przyjęte wartości współczynników:
- współczynnik oporu normalnego, średnia wartość — $C_D = 1,0$,
 - współczynnik oporu stycznego (tarcia), średnia wartość — $C_F = 0,35$,
 - współczynnik masy hydrodynamicznej (masy dodatkowej od otaczającej wody), wartość średnia — $C_M = 1,0$;
- prędkość prądu głębinowego:
- na głębokości od 0 do 600 m $V_C = 1 \text{ m/s}$,
 - na głębokości od 600 do 4600 m $V_C = 0,3 \text{ m/s}$;
- parametry przepływającej mieszaniny wody i kongrecji [5]:
- średnia gęstość mieszaniny $\rho_m = 1224 \text{ kg/m}^3$,
 - średnia prędkość przepływu $V_k = 2,65 \text{ m/s}$.

Pełna symulacja naprężeń i odkształceń rurociągu podczas procesu wydobywania kongrecji wymaga symulacji ruchu agregatu zbierającego kongrecje z dna oceanu oraz statku wydobywczego na powierzchni oceanu. Wstępna analiza naprężeń i odkształceń rurociągu została wykonana dla zadanego ruchu prostoliniowego statku wydobywczego bez uwzględniania ruchu agregatu zbierającego kongrecje oraz dla zadanej prędkości i kierunku prądu głębinowego.

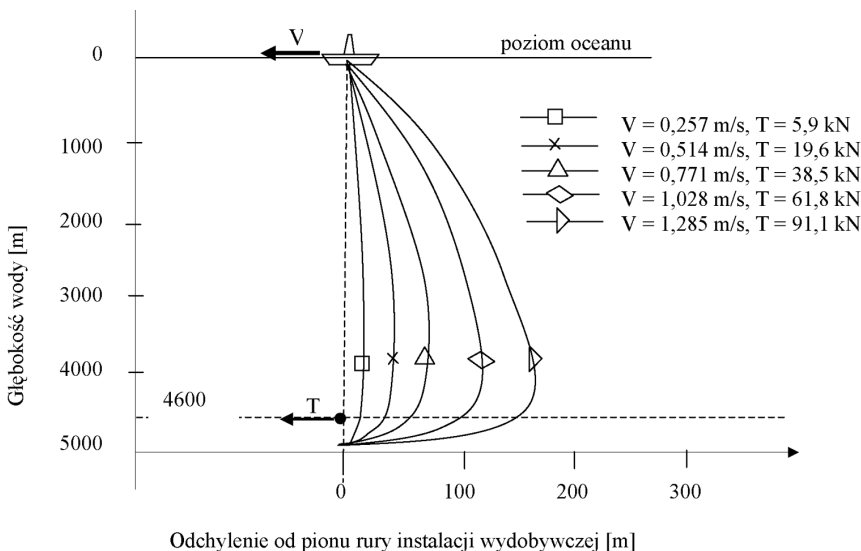
Dla tak zadanych wymuszeń kinematycznych górnego końca rurociągu, obliczenia naprężeń i odkształceń rurociągu zostały wykonane programem ABAQUS [1].

Przykładowe wyniki symulacji w czasie deformacji kształtu i naprężeń w rurociągu dla założonych parametrów ruchu statku wydobywczego pokazano na rysunku 2 (pełny zakres wyników symulacji komputerowych zamieszczono w [6]).

Przeprowadzono także symulacje numeryczne w celu określenia wielkości poziomej siły jaką należałoby przyłożyć do dolnego końca rury wydobywczej aby utrzymać ten koniec w linii pionowej przechodzącej przez górny koniec rury wydobywczej. Wyniki obliczeń, przedstawione na rysunku 3, pokazują jak duże mogłyby być oddziaływania pomiędzy agregatem zbierającym kongrecje a pionową rurą wydobywczą, gdyby nie było elastycznego, poziomego rurociągu.



Rys. 2. Symulacja naprężeń rozciągających i gnących w rurociągu instalacji wydobywczej dla dwóch chwil czasowych (naprężenia są namiesione na poszczególne odcinki rurociągu dla kształtu odpowiadającego danej chwili czasowej), prędkość statku $V = 0,771$ m/s, kierunek prądu głębinowego zgodny z kierunkiem ruchu statku



Rys. 3. Deformacje kształtu rurowej instalacji wydobywczej w funkcji prędkości statku wydobywczego przy stabilizacji położenia dolnego końca rury

4. Wstępne wnioski z przeprowadzonych badań symulacyjnych

- 1) Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że o wytrzymałości pionowej rury wydobywczej decydują naprężenia rozciągające pochodzące głównie od ciężaru własnego rury. Naprężenia gnące wynikają głównie od prędkości statku wydobywczego (wymuszanie kinematyczne) i ich poziom jest poniżej 10% naprężeń rozciągających. Przepływ w rurociągu mieszaniny wody i kongrecji powoduje także powstanie naprężeń ale ich poziom jest rzędu 0,1–0,2% naprężeń rozciągających. Przy badaniu symulacyjnym rurociągu wydobywczego nie wystąpiły naprężenia skręcające, ponieważ przekrój rury jest symetryczny a wymuszenie kinematyczne było prostoliniowe.
- 2) Do badań przyjęto rurociąg wydobywczy o stałej średnicy. W rzeczywistej realizacji metody hydraulicznej instalacji wydobywczej średnica rurociągu będzie się zmieniać — w rurociągu będą zainstalowane pompy głębinowe. Na zewnątrz rurociągu będą zamocowane kable zasilające pompy głębinowe oraz agregat zbierający kongrecje z dna oceanicznego. Mogą być też zainstalowane różnego rodzaju czujniki, np. do kontroli odchyleń od pionu rury wydobywczej. W takiej sytuacji średnica rurociągu będzie się zmieniać a przekrój z kablami będzie niesymetryczny. Mogą wtedy powstać dodatkowe naprężenia styczne od momentu skręcającego.
- 3) Na wytrzymałość pionowego rurociągu wydobywczego praktycznie nie ma wpływu ruch statku wydobywczego (oczywiście w zakresie prędkości, jakie mogą wystąpić podczas wydobywania kongrecji).

- 4) Symulowany był także wpływ szybkozmiennych wymuszeń kinematycznych pochodzących od kołysań statku. Tego typu wymuszenia wywoływały poprzeczne drgania rury wydobywczej ale powstające dodatkowe naprężenia były bardzo małe w stosunku do naprężeń rozciągających pochodzących od ciężaru własnego rury.
- 5) Zmniejszenie poziomu naprężeń rozciągających jest możliwe poprzez zastosowanie elementów wypornościowych rozmieszczonych wzdłuż rury wydobywczej. Wytrzymałość na rozciąganie rurociągu wydobywczego można poprawić także przez optymalny dobór grubości ścianki rury do rodzaju stali lub zastosowanie innych, bardziej wytrzymałych na rozciąganie materiałów, np. kompozytów.
- 6) Podczas badań symulacyjnych stwierdzono, że połączenie między agregatem zbierającym konkrety a dolnym końcem rurowej instalacji wydobywczej musi być takie aby nie było żadnego oddziaływania między tymi elementami instalacji wydobywczej. Siły występujące w dolnym końcu rurociągu wydobywczego są tak duże, że albo agregat byłby włączony po dnie (nawet bokiem) i nie spełniałby swojej funkcji, albo nastąpiłoby zerwanie poziomego rurociągu łączącego agregat z rurową instalacją wydobywczą. Długość poziomego rurociągu nie może być mniejsza niż maksymalna odległość pomiędzy agregatem zbierającym a dolnym końcem pionowego rurociągu podczas prowadzenia prac wydobywczych.

LITERATURA

- [1] ABAQUS/CAE, User's Manual version 6.10
- [2] *Blajer W.*: Metody dynamiki układów wieloczłonowych, Politechnika Radomska, Radom, 1998.
- [3] *Chung J.S., Chengt B.*: 3-D Responses of Vertical Pipe Bottom Pin-Joined to a Horizontal Pipe to Ship Motion and Trust on Pipe-Part I: MSE and FEM Modeling, Proceedings of the Nine International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France, May 30 – June 4, 1999.
- [4] *Chung J.S., Chengt B.*: 3-D Responses of Vertical Pipe Bottom Pin-Joined to a Horizontal Pipe to Ship Motion and Trust on Pipe-Part II: Numerical Examples by MSE and FEM Results, Proceedings of the Nine International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France, May 30 – June 4, 1999.
- [5] *Sobota J.*: Oszacowanie zapotrzebowania energii dla systemów podnoszenia konkrety z dna oceanu, Wspólna Organizacja Interoceanmetal, Szczecin, 2003.
- [6] Sprawozdanie z projektu badawczego 5T12C 012 25: Badanie dynamiki kompleksu wydobywczego do eksploatacji głębokowodnych konkrety oceanicznych (redakcja T. Szelangiewicz), Szczecin, 2006.
- [7] *Żelazny K., Szelangiewicz T.*: Odształcenia i zmiany położenia pionowego rurociągu podczas wydobywania polimetalicznych konkrety z dna oceanu, I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Górnictwo Morskie, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2011.