

# Konstruowanie gazociągów na niestabilnym podłożu

Zbigniew Rudnicki, Jerzy Tarnowski

## Wprowadzenie

Na terenach niestabilnych (górnicych, bagiennych, narażonych na drgania parasejsmiczne), gazociągi znacznie częściej niż w innych rejonach narażone są na awarie. Utrata ciągłości konstrukcji (pęknięcia, przerwania) sieci gazowych jest w skutkach poważnym zagrożeniem dla środowiska i przyczyną wymiernych strat ekonomicznych.

W projektowaniu sieci gazowych na terenach deformowanych eksploatacją górnicych przeprowadzenie obliczeń wytrzymałościowych dla poszczególnych jej elementów jest utrudnione. Odcinki proste, łuki, załomy i rozgałęzienia poddane są złożonym i zmiennym wpływom ośrodka gruntowego oraz czynnika roboczego, które to wpływają bezpośrednio na odkształcenia gazociągu i w dużym stopniu utrudniają procedury obliczeniowe. Dotychczas stosowane normy nie uwzględniają w bilansie obciążenia gazociągu wszystkich jego rodzajów występujących w warunkach ruchomego podłoża gazociągu. Może to mieć wpływ na małą dokładność wyników i czynić mało wiarygodnymi dotychczas stosowane sposoby obliczeń. W celu eliminacji tego zjawiska opracowano modele współpracy gazociągu z górnicych odkształcalnym podłożem gruntowym [1,2,3]. W kontekście tak sformułowanego problemu przedstawiono poniżej analizę stanowiącą podstawę optymalizacji prezentowanych w literaturze obliczeń gazociągów, gwarantującą odpowiedni poziom ich niezawodności, a w konsekwencji bezpieczną eksploatację sieci gazowych na terenach górnicych.

Opracowane modele współdziałania rurociągu gazowego z ośrodkiem gruntowym na terenach górnicych mogą stanowić podstawę do podjęcia próby normalizacji metod obliczeniowych w projektowaniu sieci gazowych. Jednocześnie umożliwiają zastosowanie komputerowego wspomaganie projektowania sieci gazowych w niestabilnych środowiskach.

## Charakterystyka modelu współpracy gazociągu z niestabilnym podłożem

Zagłębiany w ruchomym gruncie gazociąg jest poddany dodatkowym obciążeniom, w postaci sił tarcia, powstających na kontakcie gazociągu i obsypki. Opracowane modele statycznej współpracy gazociągu z górnicych odkształcalnym ośrodkiem gruntowym zbudowane są głównie na następujących założeniach:

- sprężysto-plastyczny ośrodek gruntowy z wyraźnie zaznaczoną granicą plastyczności,

- sprężysto-plastyczne odkształcenia w przekrojach poprzecznych gazociągu,
- uwzględnienie własności mechanicznych gruntu przez graniczne naprężenie styczne lub obciążenie graniczne w kierunku równoległym i prostopadłym do osi rury.

W tych modelach brane są również pod uwagę przemieszczenia poziome i pionowe gruntu, względne przemieszczenia gazociągu i gruntu, współczynnik tarcia gruntu (obsypki) i gazociągu (izolacji), oraz własności geometryczno-mechaniczne gazociągu.

Na podstawie analizy opracowanych modeli współdziałania gazociągu z gruntem, można sformułować następujący algorytm obliczeniowy:

### A. DANE WYJŚCIOWE

- prognozy odkształceń terenu (kategorie górnicych),
- charakterystyka górnicych-geologiczna warstw zalegających pod gazociągiem,
- charakterystyka pokładów kopaliny (zaleganie, grubość)
- charakterystyka eksploatacyjna pokładu (czas trwania, prędkość eksploatacji, granice i kierunek eksploatacji),
- parametry geometryczno-mechaniczne sieci gazowej,
- głębokość i czas posadowienia gazociągu w gruncie,
- charakterystyka gruntu w bezpośrednim sąsiedztwie gazociągu,
- prognozowana i rzeczywista prędkość deformacji gruntu.

W oparciu o przewidywaną deformację terenu i warunki eksploatacji górnicych można oszacować prognozowane wartości odkształceń i naprężeń gazociągu, zaś na podstawie rzeczywistych deformacji terenu wyznaczyć rzeczywiste naprężenia w materiale rury.

### B. OBLICZENIA STATYCZNO-WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Uwzględniając powyżej przedstawione dane wyjściowe można z zadowalającą dokładnością wyznaczyć wartości i rozkłady sił wewnętrznych w gazociągach wynikających z odkształcenia gruntu. Należą do nich siły osiowe ( w prostych odcinkach gazociągu) oraz momenty gnące i siły poprzeczne (w załomach i odgałęzieniach gazociągu).

- wydlężenia branego pod uwagę odcinka gazociągu oraz przemieszczenie gruntu względem gazociągu

- wyznaczenie wartości naprężeń w gazociągu:
- wzdłużnych wynikających z odkształcenia poziomego terenu,
- normalnych w węzłach (załomy, rozgałęzienia), wynikające z poziomych odkształceń terenu,
- wzdłużnych wywołanych krzywizną terenu.

Drugi model pozwala również na wyznaczenie odległości między kompensowanymi odcinkami oraz wartości przerwy dylatacyjnej w kompensatorze.

Dotychczasowe obliczenia gazociągów i instalacji gazowniczych opierały się na normie PN-90/M.-34502 – Obliczenia wytrzymałościowe. Norma ta bierze pod uwagę rury stalowe, obciążone przede wszystkim ciśnieniem wewnętrznym transportowanego medium. Norma nie uwzględnia w obliczeniach oddziaływań odkształcalnego górnictwo podłoża.

W celu rozszerzenia zakresu normalizacji metod obliczeniowych przy projektowaniu gazociągów na terenach górniczych opracowana metodyka [1,2] uwzględnia w obliczeniach obciążenie statyczne, będące wynikiem deformacji ciągłych gruntu (niecki obniżeniowe). Rozszerzenia zakresu statycznych obliczeń modelowych dokonano w pracy [3], uwzględniając dodatkowo następujące rodzaje obciążenia:

- okresowe wywołane drganiami i wstrząsami pochodzenia parasejsmicznego (górnictwo, przemysłowe i komunikacyjne),
- dynamiczne (impulsowe), wywołane deformacjami nieciągłymi (szczeliny, zapadliska, uskoki).

W uzupełniających obliczeniach z udziałem drgań podłoża, dokonuje się obliczeń maksymalnych wartości naprężeń normalnych oraz naprężeń ścinających powstające w gazociągu zależne od:

- energii sejsmicznej wstrząsu, odległości od epicentrum wstrząsu, prędkości propagacji fal,
- amplitudy prędkości drgań fali, gęstości ośrodka gruntowego.

Naprężenia w gazociągu wywołane obciążeniami komunikacyjnymi lub przemysłowymi można traktować jako obciążenia długotrwałe o charakterze okresowym (do kilku godzin w ciągu doby), zaś obciążenia dynamiczne od wstrząsów górniczych jako sporadyczne (impulsowe – kilka razy w roku).

Sumaryczny efekt oddziaływań obciążeń okresowych i dynamicznych powoduje odkształcenia zmęczeniowe w materiale rurociągu (rozwój mikropęknięć), zwłaszcza w elementach z krawędziami konstrukcyjnymi (spoiny, załomy, odgałęzienia, armatura, kompensatory).

Tak więc w projektowanej normie oprócz obliczeń w oparciu o dotychczasową normę PN-80/B-03040 należy uwzględnić obciążenia wywołane: deformacjami ciągłymi gruntu, deformacjami nieciągłymi gruntu i wstrząsami pochodzenia parasejsmicznego.

### **Aplikacja wspomaganie komputerowego metodyki obliczeń gazociągów na terenach o niestabilnym podłożu.**

Analiza obliczeń konstrukcyjnych gazociągu i znaczna liczba danych spowodowała konieczność zastosowania komputerowych metod wspomaganie procesu projektowania gazociągów w niestabilnym środowisku [9]. Poniżej dokonano doboru i optymalizacji metody aplikacji wspomaganie komputerowych obliczeń.

Komputerowe wspomaganie obliczeń – w przypadku projektowania gazociągów użytkowanych na terenach niestabilnych – może być realizowane różnymi metodami z których rozpatrzmy trzy, a mianowicie:

1. Użycie wyspecjalizowanego napisanego na zamówienie – programu komputerowego,
2. Zastosowanie MathCAD'a – uniwersalnego programu do obliczeń matematycznych,
3. Zastosowanie arkusza kalkulacyjnego i narzędzi Excel'a.

Rozwiązanie pierwsze – wyspecjalizowany program – może być rozwiązaniem najdroższym jako, że nie każdy inżynier będzie w stanie samodzielnie napisać w jakimś języku programowania, odpowiedniej jakości tego rodzaju program, a kontakt z programistą nie zawsze jest łatwy i tani.

Program taki jest dla użytkownika „czarną skrzynką”, która w wygodny sposób wytwarza wyniki po wprowadzeniu danych, jednakże użytkownik nie ma zazwyczaj wglądu w proces obliczeń, nie może modyfikować tego procesu ani uzyskać wydruku używanych wzorów (formuł matematycznych) oraz wyników pośrednich i musi poprzestać na dokumentacji, wynikach testowania programu i na uwierzeniu programiście, że wprowadził prawidłowe wzory, dobrał odpowiednie typy i struktury danych, zapewnił poprawną komunikację między modułami programu i nie popełnił błędów wpływających na wyniki obliczeń.

Drugie rozwiązanie – zastosowanie uniwersalnego programu do obliczeń matematycznych takiego jak MathCAD pozwala z kolei na całkiem inne podejście. Tutaj opracowujemy dokument obliczający – aplikację, która ma wykonywać obliczenia a zarazem ma postać publikacyjną. Wszystkie wzory do obliczeń oraz objaśnienia tekstowe są widoczne, gdyż służą nie tylko do obliczeń ale i do przeglądania przez użytkownika, który w tym przypadku nie potrzebuje znać jakiegokolwiek języka programowania.

W dokumentach można używać stosowaną przez matematyków notację jak: zapis macierzowy i wektorowy, ułamki piętrowe, wskaźniki i wykładniki, greckie litery, symbole sum, całek i inne. Taka postać jest dogodna dla kogoś kto chce mieć pełną dokumentację procesu obliczeń, a mniej wygodna dla tego kto tylko chce wielokrotnie wpisywać zestawy danych i jak najszybciej obejrzeć w zwartej formie wyniki bez potrzeby przeglądania czy drukowania długiego dokumentu.

Czynniki przemawiające na korzyść uniwersalnych programów do obliczeń matematycznych to:

- możliwość używania ich bez potrzeby uczenia się języka programowania,
- łatwość przeglądania i modyfikowania algorytmu obliczeń,
- postać publikacyjna dokumentu czyli dokumentacja procesu obliczeń, a z drugiej strony rosnąca i w pewnym stopniu zniechęcająca złożoność obiektowych języków programowania.

MathCAD jest więc bardzo dobrym narzędziem które może w wielu wypadkach zastąpić specjalistyczne oprogramowanie i narzędzia do jego tworzenia i dokumentowania (język programowania i zaawansowany edytor tekstu). Daje też czytelną postać dokumentacji toku obliczeń w czym przewyższa specjalistyczne programy a także arkusze kalkulacyjne.

Do wad MathCAD'a można zaliczyć:

- mniejsze rozpowszechnienie i rzadziej spotykana umiejętność posługiwania się nim w porównaniu do programów biurowych (n.p.: pakietu Microsoft Office),
- brak możliwości zabezpieczenia dokumentu przed zmianami – co zapobiegłoby jego przypadkowym (lub celowym) modyfikacjom przy wprowadzaniu danych,
- brak możliwości ukrycia części dokumentacyjnej dokumentu tak aby pozostały widoczne tylko pola danych i wyników.

Trzecie rozwiązanie jest po części pośrednie między dwoma poprzednimi chociaż nie pozbawione wad. Otóż EXCEL wywodzi się z programów zwanych kiedyś „arkuszami elektronicznymi” a później „arkuszami kalkulacyjnymi” i na najniższym poziomie wtajemniczenia można go tak traktować, jednakże poziomów tych jest wiele i to coraz trudniejszych lecz dostarczających obszerny repertuar środków aż do obiektowego języka programowania MS VBA (Microsoft Visual Basic for Applications) oraz możliwości wstawiania obiektów systemu Windows i wykorzystywania różnorodnych narzędzi i programów działających w tym systemie.

Napisanie dobrej aplikacji w Excel'u, która miałaby w miarę możliwości łączyć zalety obu poprzednio opisanych rozwiązań – nie musi więc być zagadnieniem łatwym a może być trudniejszym niż napisanie programu działającego w środowisku DOS.

Mamy jednak w Excel'u między innymi możliwości używania:

- szerokiego repertuaru gotowych funkcji (nie tylko obliczeniowych),
- adresów komórek i zakresów lub nadawanych im nazw (zmiennych),
- elementów okien dialogowych (przycisków, list rozwijalnych i t.p.),

- tabel i prostych operacji na nich jako bazach danych,
- wielu rodzajów automatycznie generowanych wykresów,
- automatycznego wyznaczania wykresu i równania tzw. linii trendu czyli krzywej przechodzącej przez zadane punkty,
- dekompozycji zadania na wiele arkuszy tematycznych,
- wstawiania rysunków i obrazów równań matematycznych,
- zabezpieczania arkuszy przed zmianami innymi niż wpisywanie danych.

Dzięki tym i innym możliwościom Excel'a - aplikacja w nim utworzona może pełnić zarówno rolę programu realizującego obliczenia jak i dokumentu opisującego tok obliczeń.

Niestety jednak w Excel'u (inaczej niż w MathCAD'zie) obie te postacie niekoniecznie muszą być zgodne ze sobą, a w szczególności wzory matematyczne wstawione jako obiekty programu Microsoft Equation nie służą do obliczeń lecz są traktowane jak „obrazki” a niezależnie od nich - wzory do obliczeń muszą być wpisane (w notacji Excel'a) do odpowiednich komórek lub umieszczone w modułach Visual Basic'a (procedurach lub funkcjach) i wówczas zapisane zgodnie z regułami tego języka.

### Ogólny opis aplikacji (Excel) do obliczeń projektowych gazociągów w górnictwo odfalcalnym środowisku

Dla przejrzystości – dokument podzielono na wiele arkuszy, których nazwy widoczne są u dołu ekranu, na tak zwanych „zakładkach”. Zawartość poszczególnych arkuszy przedstawiono w poniższej tabeli:

Nazwa arkusza	Zawartość
DANE	Arkusze ten zawiera komórki lub listy rozwijalne dla wprowadzania danych a także niezbędne objaśnienia. Wartości list rozwijalnych pobierane są z arkuszy TABELA oraz RURY a wprowadzone wartości są dostępne dla innych arkuszy.
WYNIKI	Na tym arkuszu są zestawione kopie wyników pobrane z arkusza OBLICZENIA
OBLICZENIA	Ten arkusz zawiera zarówno wprowadzone do komórek wzory niezbędne do obliczeń, jak i dokumentację toku obliczeń z wykorzystaniem „obrazów równań” czyli obiektów utworzonych programem Microsoft Equation
TABELA	Tu zestawiono tabele których wartości są automatycznie pobierane do obliczeń
RURY	Zawiera tabelę danych typoszeregu rur
WYKRESY	Na tym arkuszu zgromadzono wszystkie niezbędne do obliczeń wykresy doświadczalne oraz aproksymujące je krzywe analityczne
OPIS	Zawiera wykaz oznaczeń użytych w opisie dokumentacyjnym oraz odpowiadających im oznaczeń użytych w wyrażeniach Excel'a

## Listy rozwijalne i automatyczny wybór wartości z tabel

We wszystkich przypadkach gdy wpisywanie danej wartości może być zastąpione wybraniem z wykazu – jednej z wielu ustalonych wartości – zastosowano listy rozwijalne, dzięki którym użytkownik nie musi gdzie indziej szukać granicznych wartości a zarazem zmniejszone jest ryzyko wprowadzenia wartości błędnych.

A oto krótki opis konstruowania takiej listy rozwijalnej w tworzonym dokumencie:

Umieszczenie w arkuszu elementu (tzw.: formantu) typu lista rozwijalna możliwe jest przy użyciu paska narzędzi „Formularze”. Przed wstawieniem tego formantu, w jednym z arkuszy należy wpisać do tabelki wykaz wartości, który ma się pojawiać w liście rozwijalnej.

Po wstawieniu formantu „lista rozwijalna” – w ramach operacji jego formatowania przypisuje się mu odpowiednią tabelę, a także komórkę, w której ma pojawić się numer (indeks) pozycji (tekstowej lub liczbowej) wybranej przez użytkownika z listy.

Zauważmy, że dla Excel'a użytkownik zawsze wybiera NUMER pozycji a nie jej wartość.

Oddzielnym problemem jest otrzymanie wartości z tego wiersza tabeli, którego numer wybraliśmy. Na przykład po wybraniu kategorii górniczej z listy rozwijalnej na arkuszu DANE, interesuje nas w Tabeli 1. automatyczne pobranie wartości granicznych: nachyleń, odkształceń poziomych oraz promieni krzywizny - z tego samego wiersza tabeli co wybrana kategoria górnicza. Umożliwia to funkcja Excel'a o niefortunnej nazwie INDEKS. Nazwa jest absolutnie myląca gdyż zawsze funkcje nazywane są od tego co obliczają a nie od nazw argumentów. W tym przypadku funkcja INDEKS jako argumenty musi mieć podane przynajmniej:

- nazwę lub zakres adresów kolumny z której będzie wybierać wartość,
- indeks czyli numer wiersza z którego ma pobrać wartość.

Funkcja ta wybiera więc z podanej kolumny wartość na podstawie indeksu.

Oto fragment arkusza „TABELA” z tabelą nr 1:

	A	B	C	D	E	F	G
1	Tabela 1. Kategorie górnicze i odpowiadające im graniczne						
2	Wartości parametrów deformacji terenu:						
3		Nachylenie		Odkształcenie		Promień	
4	Kategoria	[mm/m]		Poziome [mm/m]		Krzywizny [km]	
5		od_T1	do T2	Od e1	Do e2	od R1	do R2
6	I	0	2,499	0	1,499	20	999
7	II	2,5	4,999	1,5	2,999	12	19,999

8	III	5	9,999	3	5,999	6	11,999
9	IV	10	14,999	6	8,999	4	5,999
10	V	15	999,999	9	999,999	0,1	3,999
11	Wybrano:						
12	4	10	14,999	6	8,999	4	5,999

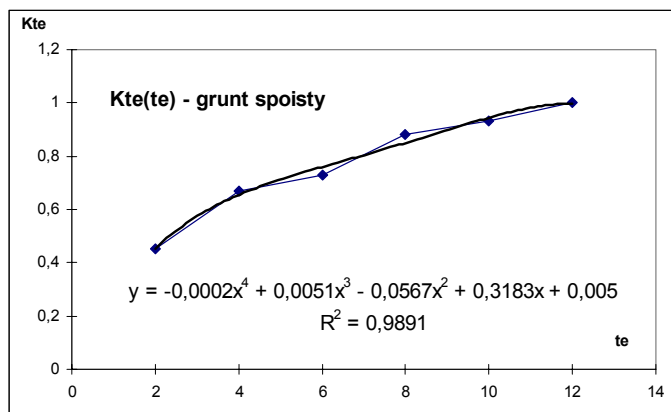
Natomiast na arkuszu „DANE” znajduje się lista rozwijalna pozwalająca wybrać kategorię górniczą.

## Aproksymacja krzywych doświadczalnych

Według wytycznych projektowania, niektóre wartości powinny być odczytywane z załączonych tabel lub wykresów doświadczalnych. Sposób automatyzacji odczytu wartości z tabel dla wybranego przez użytkownika wiersza przedstawiono powyżej.

Nieco innym zagadnieniem jest odczytywanie wartości (z tabeli lub wykresu) dla wyliczonej wartości argumentu. Aby zautomatyzować tego rodzaju czynności, aproksymowano wykresy (lub ciągi wartości) doświadczalnych krzywymi analitycznymi - (krzywymi regresji) wykorzystując bardzo pożyteczne narzędzie Excel'a nazywające się w nim „dodawaniem linii trendu”.

Dla funkcyjnego zapisu wartości współczynnika wyznaczono krzywą analityczną regresji (trendu), równanie tej krzywej oraz wartość parametru R<sup>2</sup>. Przykład aproksymacji współczynnika K<sub>te</sub>, zależnego od okresu między posadowieniem gazociągu w gruncie, a początkiem odkształceń gruntu przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Funkcyjny zapis zmian wartości współczynnika K<sub>te</sub>, w zależności od początku odkształceń gruntu w kolejnych latach

## Zabezpieczenie dokumentu przed zmianami

Użytkownicy, którzy będą jedynie wprowadzać dane do dokumentu – nie powinni mieć możliwości modyfikowania wzorów, opisów i innych elementów – gdyż bierze za nie odpowiedzialność twórca aplikacji. W Excel'u istnieje możliwość zabezpieczenia przed zmianami określonych

części dokumentu-aplikacji. Przed zabezpieczeniem całego arkusza należy zaznaczyć te komórki do których będą wprowadzane dane i wyłączyć dla nich zabezpieczanie. Dla odblokowania ochrony arkusza można ustalić hasło.

### Wnioski

1. Na terenach eksploatacji górniczej praca statyczna gazociągów jest znacznie zaburzona przez wpływy okresowo działających impulsów dynamicznych. Stąd w obliczeniach konstrukcyjnych nie może zabraknąć nie uwzględnianego w normach sprawdzenia generowanych wówczas w przekrojach naprężeń zmiennych.
2. Poddana analizie metodyka obliczeniowa zawarta w omawianych modelach zapewnia w zadowalającym stopniu osiągnięcie dokładności prowadzonych obliczeń konstrukcyjnych, gwarantującą odpowiedni poziom niezawodności, a w konsekwencji bezpieczną eksploatację sieci gazowych na terenach górniczych.
3. Dane zastosowane do modelowania współpracy gazociągu z górniczo odkształcalnym podłożem mogą posłużyć do zbudowania odpowiedniego systemu informacyjnego – bazy danych, a także umożliwiają opracowanie tzw. systemów ekspertowych lub doradczych, które mają znacznie szersze możliwości niż tradycyjne bazy danych. Zaproponowany program obliczeń komputerowych odpowiada wymaganiom stawianym procesom konstruowania układów mechanicznych (sieciowych).
4. Przeprowadzona analiza potwierdziła przydatność omawianych modelowych obliczeń konstrukcji gazociągów, na szybkie zweryfikowanie i ocenę jakości konstrukcyjnej i technologicznej, zastosowanych rozwiązań w projekcie sieci.

### Literatura

1. Mokrosz R., Wprowadzenie do mechaniki budowli liniowych zagłębionych w gruncie na terenach górniczych. Wydawnictwo PAN, Katowice 1985.
2. Kopczyński A.: Praca studialna - Wytyczne projektowania i budowy rurociągów gazu na terenach górniczych. Biuro Projektów Gazownictwa Gazoprojekt, Wrocław 1991.
3. Mutke G., Tarnowski J.: Wpływ drgań podłoża na gazociągi. Rurociągi Nr4/41/05
4. PN-90/M-34502. Gazociągi i instalacje gazownicze. Obliczenia wytrzymałościowe.
5. PN-H-74221-1994. Rury przewodowe klasy A ze stali niestopowych do budowy gazociągów.
6. PN-86/B-02480. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
7. Broniec Z., Szybka J., Tarnowski J.: Modelowanie systemu eksploatacji sieci gazowych użytkowanych na terenach górniczych. Zagadnienia eksploatacji maszyn, z.1(113), PAN Warszawa 1998.
8. Broniec Z., Czachórska E., Szybka J.: Tarnowski J., Problemy bezpieczeństwa eksploatacji sieci gazowych na terenach górniczych. Zagadnienia eksploatacji maszyn, z.3(115), PAN Warszawa 1998.
9. Rudnicki Z.: Komputerowy bank informacji o elementach liniowych sieci eksploatowanych w górniczo odkształcalnych ośrodkach gruntowych. Trwałość i niezawodność sieci gazowych eksploatowanych na terenach górniczych. Prace nr 83. IGNiG, Kraków 1994 r.

## ReAKKT Report 2006-11-19

**Przy okazji podpisania umowy z RosUkrEnergo na dostawy gazu przez Ukrainę, PGNiG zostało praktycznie zmuszone do zmiany formuły cenowej stosowanej w obowiązującym od 1996 r. Kontrakcie Jamalskim. Zgoda na to może kosztować PGNiG ok. 200 mln USD tylko w pierwszym roku, którego dotyczyć będzie zmiana, i potencjalnie 3,7 mld USD w całym pozostałym jeszcze okresie obowiązywania kontraktu.**

Czytaj więcej na: <http://reakkt.wordpress.com/2006/11/19/gazowa-zagadka/>