

Adam KRASIŃSKI
Politechnika Gdańska

OBCIĄŻENIA RUROCIĄGÓW PODZIEMNYCH POSADOWIONYCH NA SŁABYM PODŁOŻU GRUNTOWYM

Streszczenie. W artykule opisano zjawiska i czynniki geotechniczne, mogące powodować bardzo niebezpieczny wzrost obciążeń podziemnych rurociągów, przechodzących przez tereny o słabym podłożu gruntowym. Z uwagi na brak opisu tych zjawisk w literaturze technicznej i zaleceniach dotyczących projektowania rurociągów, w artykule zaproponowano sposoby szacowania wartości obciążeń działających na rurociąg posadowiony na palach w terenie o słabym podłożu gruntowym. Przedstawiono przykład z praktyki, w którym wzrost obciążeń doprowadził do poważnej awarii rurociągu dalekosiężnego.

LOADS OF UNDEGROUND PIPELINES FOUNDED IN WEAK SUBSOIL

Summary. The paper presents the phenomena and geotechnical factors causing significant increase of loads acting on underground pipelines, running through the areas of weak subsoil are presented. Due to a lack of proper description of these phenomena in the literature as well as the lack of design recommendations, the procedures of the assessment of loads acting on a pipeline founded on piles in a weak subsoil are proposed. The problem has been illustrated by a practical case in which the increase of loads due to the unfavorable subsoil conditions caused serious failure of a long pipeline.

1. Wprowadzenie

Rurociągi, a szczególnie rurociągi dalekosiężne, prowadzone są przez tereny o różnej budowie i jakości podłoża gruntowego. Na trasie rurociągu mogą trafić się tereny o słabym podłożu gruntowym zbudowanym z torfów, gytii lub namulów (tereny bagienne, niecki po dawnych jeziorach, pradolina rzek itp.) W przypadku słabego podłoża gruntowego, z uwagi na jego dużą ściśliwość i niestabilność, stosuje się specjalne sposoby posadowienia rurociągów. Jednym z częściej stosowanych sposobów jest posadowienie na palach.

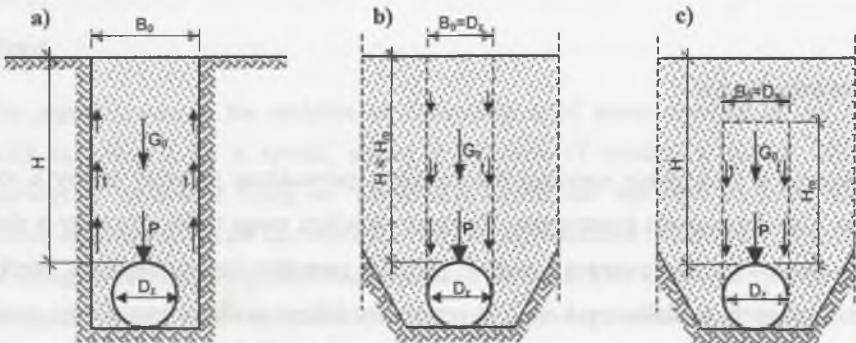
W odniesieniu do rurociągów podziemnych układanych w dobrym podłożu gruntowym, można w literaturze znaleźć wiele zaleceń dotyczących określania wielkości i rodzaju działających na nie obciążeń (np. Kuczyński, 1980). Natomiast dla rurociągów posadowionych na palach w trudnych warunkach gruntowych brak jest takich zaleceń. W efekcie projektanci rurociągów, którymi nie zawsze są inżynierowie budowlani, a prawie nigdy geotechnicy, nie mając specjalnych zaleceń do obliczania rurociągów posadowionych na palach, często stosują takie same procedury zbierania obciążeń, jak dla rurociągów układanych bezpośrednio na gruncie. Tymczasem w przypadku rurociągu posadowionego na palach i zagłębionego w niestabilnym gruncie mogą wystąpić niekorzystne zjawiska prowadzące do znacznego, nawet kilkukrotnego wzrostu obciążeń. Nieuwzględnienie tych zjawisk w fazie projektowania rurociągu może w konsekwencji doprowadzić, i już niestety w kilku przypadkach doprowadziło, do niebezpiecznych deformacji rurociągu i jego awarii.

W artykule podano kilka wskazówek dotyczących określania obciążeń tego typu rurociągów oraz przedstawiono przypadek z praktyki awarii rurociągu spowodowanej przeciążeniem.

2. Obciążenia rurociągów posadowionych w dobrym podłożu gruntowym

Głównym obciążeniem rurociągu podziemnego jest oddziaływanie ciężaru nadsypki gruntowej. Na ogół jest to ciężar bryły gruntu spoczywającego nad nim, który może być, w zależności od tego, czy rurociąg jest w wykopie czy w nasypie, powiększony lub pomniejszony o siły tarcia na powierzchniach bocznych tej bryły.

W przypadku rurociągu w wąskim wykopie siły tarcia zmniejszają ciężar bryły gruntu, gdyż grunt z zasypki przemieszczając się w dół zawieszają się na ścianach wykopu (rys. 1a).



Rys. 1. Schematy obciążeń działających na rurociągi ułożone w dobrym podłożu gruntowym (opis w tekście) [2]

Fig. 1. Schemes of loads acting on the pipelines founded in good soil conditions [2]

W przypadku rurociągu w nasypie lub w szerokim wykopie może być odwrotnie – cały nasyp może osiadać bardziej niż rurociąg. Wówczas siły tarcia skierowane są na dół i dokładają się do obciążenia od ciężaru bryły gruntu nad rurociągiem (rys. 1b). W obu przypadkach, ze względu na ogólnie dobre parametry podłoża gruntowego, osiadania gruntu, jak i przemieszczenia rozpatrywanych brył gruntowych są niewielkie i przy większych głębokościach mogą nie dochodzić do powierzchni terenu (rys. 1c), więc i siły tarcia nie są zbyt duże.

Jednym z ogólnych wzorów podających wartość obciążenia P od gruntu działającego na rurociąg, jakie można znaleźć w literaturze, jest wzór Lenza [2]:

$$P = \lambda \cdot G_0 = \lambda \gamma H B_0 \quad [\text{kN/m}] \quad (1)$$

w którym:

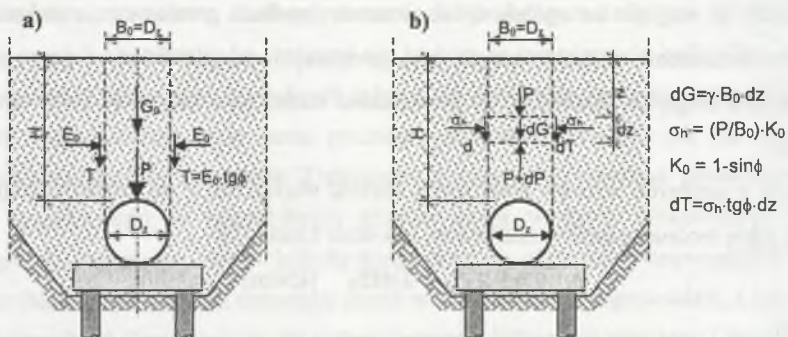
- G_0 – ciężar bryły gruntu znajdującej się nad rurociągiem,
- λ – współczynnik uwzględniający siły tarcia na powierzchniach bocznych bryły,
- H – wysokość nadkładu gruntu nad rurociągiem,
- B_0 – szerokość bryły gruntu spoczywającej nad rurociągiem,
- γ – ciężar objętościowy gruntu z zasypki.

W zależności od przypadku, szerokość B_0 przyjmuje się według rys. 1. Współczynnik λ otrzymuje się z rozwiązania równań różniczkowych. Dla rurociągów układanych w wykopie współczynnik ten, oznaczany jako λ_w , przyjmuje wartości mniejsze od 1.0, natomiast dla rurociągów w nasypie - oznaczany jako λ_n przyjmuje wartości większe od 1.0.

3. Obciążenia działające na rurociągi posadowione na podporach palowych

W przypadku rurociągów prowadzonych przez tereny o słabym podłożu gruntowym i posadowionych na palach, obciążenia rurociągu mogą być znacznie większe, ze względu na znacznie większe osiadania zasypki gruntowej. Niezależnie wówczas od tego, czy rurociąg jest układany w wykopie, czy w nasypie, siły tarcia na ścianach bocznych bryły gruntu nad rurociągiem działają dociążająco i są znacznie większe niż określone np. wzorem Lenza. Dzieje się tak dlatego, że osiadania zasypki gruntowej na słabym podłożu mogą wynosić od kilku do kilkudziesięciu centymetrów, natomiast osiadania rurociągu są bardzo małe, ze względu na posadowienie na palach. Osiadania zasypki mogą być powodowane między innymi przez to, że używa się do niej gruntu mineralnego (zwykle piasku), cięższego od wybranego z wykopu rodzimego gruntu organicznego, jak również przez wykonawstwo robót

(np. przez obniżanie zwierciadła wody gruntowej). Przy dużych osiadaniach przemieszczenia bocznych brył gruntowych względem bryły nad rurociągiem dochodzą do poziomu terenu. Siły tarcia należy więc wtedy zbierać z całej wysokości ścian bocznych tej bryły (rys. 2a,b).



Rys. 2. Układy obciążeń działających na rurociąg posadowiony na palach: a) schemat do metody uproszczonej, b) schemat do metody otrzymanej z równania różniczkowego

Fig. 2. Loading set acting on a pipeline on piles: a) simplified method scheme, b) scheme for the method based on differential equation

W celu oszacowania wartości obciążenia działającego w takim przypadku na rurociąg można zastosować jedną z trzech metod podanych poniżej.

a) Metoda uproszczona

Schemat obliczeniowy i podstawowe założenia do tej metody przedstawiono na rys. 2a. W metodzie tej przyjmuje się, że w trakcie przemieszczania się w dół zasypu lub nasypu rurociąg, który nie ulega przemieszczeniom, obciążony jest ciężarem spoczywającej na nim bryły gruntu oraz siłami tarcia zebranymi z całej wysokości ścian bocznych tej bryły:

$$P = G_0 + 2T \quad [\text{kN/m}] \quad (2)$$

Siły tarcia T oblicza się przy założeniu stanu parcia spoczynkowego gruntu na ścianach bryły:

$$T = E_0 \cdot \text{tg} \phi \quad (3)$$

w którym:

E_0 – wypadkowa parcia spoczynkowego gruntu.

Do parcia spoczynkowego można przyjąć współczynnik według wzoru Jaky'ego: $K_0 = 1 - \sin \phi$.

b) Metoda otrzymana z równania różniczkowego równowagi naprężeń

Schemat obliczeniowy i podstawowe założenia do tej metody przedstawiono na rys. 2b. W metodzie tej zakłada się wzajemne współoddziaływanie pomiędzy siłami tarcia i naprężeniami pionowymi w gruncie nad rurociągiem. Podobnie jak wyżej, przyjęto stan parcia spoczynkowego gruntu na ścianach bocznych bloku gruntowego nad rurociągiem.

W analizie zagadnienia wychodzi się z równania różniczkowego równowagi elementarnego wycinka bloku gruntowego o wysokości dz i ciężarze dG :

$$P + dP = P + dG + 2dT \quad (4)$$

Po szczegółowym rozpisaniu i przekształceniach otrzymujemy ostateczną postać równania:

$$P + dP = P + \gamma B_0 dz + \frac{2P}{B_0} K_0 \operatorname{tg} \phi dz \quad (5)$$

$$\frac{dP}{dz} = \gamma B_0 + \frac{2P}{B_0} K_0 \operatorname{tg} \phi \quad (6)$$

Po przyjęciu warunku brzegowego, że dla $z = 0 \rightarrow P = 0$ i przy $z = H$ otrzymujemy rozwiązanie równania, podające wartość obciążenia P działającego na rurociąg:

$$P = \frac{\gamma B_0^2}{2K_0 \operatorname{tg} \phi} \left[\exp\left(2K_0 \frac{H}{B_0} \operatorname{tg} \phi\right) - 1 \right] \quad (7)$$

c) Metoda elementów skończonych

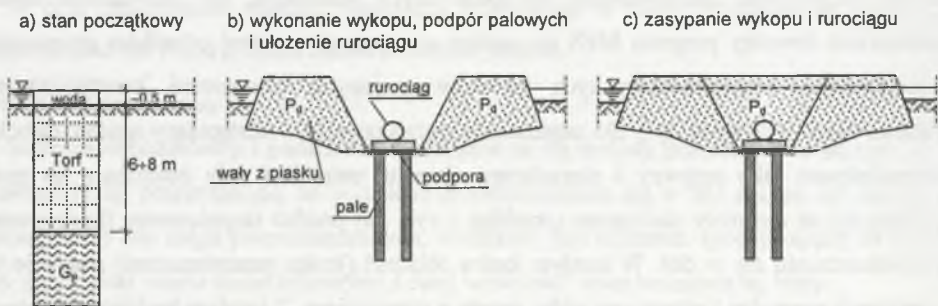
Za pomocą tej metody nie jest możliwe podanie rozwiązania ogólnego. Każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie, dla konkretnych warunków. Do rozwiązania można zastosować dowolny program MES do analizy sprężysto-plastycznej ośrodków gruntowych z możliwością współpracujący tych ośrodków z innymi elementami konstrukcyjnymi (betonowymi, stalowymi itp.). Do zagadnienia można podejść w następujący sposób: rurociąg wymodelować jako sztywny i nieruchomy element, natomiast cały otaczający go grunt podzielony na elementy skończone (przykład – rys. 5a) poddać stopniowemu (krokowemu) przemieszczaniu się w dół. W każdym kroku obliczeń (kroku przemieszczeń) analizuje się naprężenia normalne i styczne na styku gruntu z rurociągiem. Z każdym krokiem naprężenia te wzrastają, przy czym zmiierają do pewnej ustabilizowanej wartości. Po osiągnięciu umownej ich stabilizacji proces obliczeniowy można zakończyć i ustalić wartość obciążenia rurociągu.

4. Przykład obliczeniowy obciążenia rzeczywistego rurociągu posadowionego na palach

Przykład poniższy dotyczy rzeczywistego stalowego rurociągu $\phi 530/7$ mm przeznaczonego do transportu cieczy, który uległ awarii w wyniku przeciężenia [1]. Na trasie rurociągu w kilku odcinkach natrafiono na tereny bagienne o bardzo słabym podłożu gruntowym.

Rurociąg poprowadzony został pod terenem na głębokości około 2.0 m i na odcinkach bagiennych posadowiony na podporach palowych w rozstawie co około 17.0 m. Każda podpora składała się z dwóch pali wierconych $\phi 230$ mm, połączonych żelbetową belką, na której za pośrednictwem specjalnego łoża oparto rurociąg. Podłoże gruntowe na rozpatrywanych odcinkach od poziomu terenu do głębokości $6.0 \div 8.0$ m zbudowane było z bardzo słabych gruntów organicznych: torfów, gytii i namulów. Pod nimi znajdowały się grunty nośne w postaci glin piaszczystych i piasków gliniastych, do których doprowadzono pale. Generalnie analizowane tereny były podmokłe.

Podczas prac ziemnych wykonano wykop pod rurociąg z jednoczesnym ułożeniem wałów ziemnych po obu stronach, które miały umożliwić odwodnienie wykopu i poruszanie się sprzętu budowlanego. Następnie wykonano pale i żelbetowe oczepy, na których oparto prowadzony rurociąg. Po zakończeniu wszystkich prac montażowych zasypano wykop, pozostawiając nad rurociągiem nasyp wystający około 0.5 m ponad poziom wody w bagnach. Przebieg kolejnych etapów prac przedstawiono schematycznie na rys. 3.



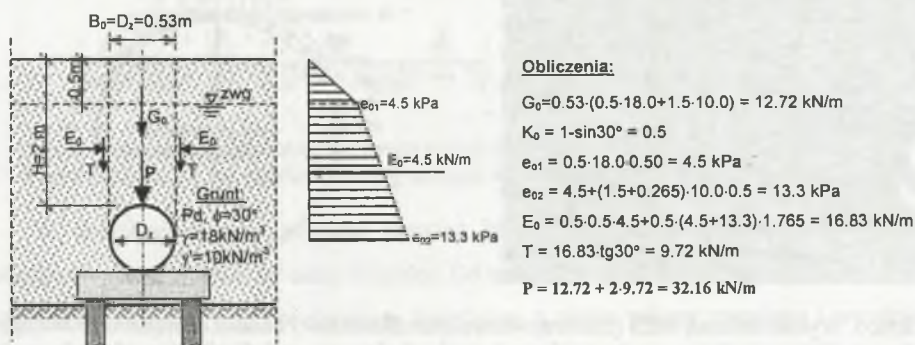
Rys. 3. Główne etapy prac przy budowie analizowanego rurociągu
Fig. 3. Main working phases during the construction of the pipeline

Już w kilka tygodni po zasypaniu rurociągu, w trakcie kontrolnych pomiarów geodezyjnych, wykryto niepokojące przemieszczenia i deformacje rurociągu. Po ponownym jego odsłonięciu stwierdzono, że deformacje polegają na ogólnym pofalowaniu rurociągu, dużych i trwałych ugięciach, rzędu $10 \div 15$ cm w przęsłach i wygięciach do góry nad podporami. Dodatkowo wystąpiły deformacje poprzeczne (spłaszczenie) przekroju rury nad niektórymi podporami oraz pęknięcie i uszkodzenia niektórych żelbetowych belek podpór. Charakter deformacji wskazywał jednoznacznie na znaczne pionowe przeciążenie rurociągu jako główną przyczynę.

4.1. Obliczenia obciążeń działających na rurociąg

Nasyt ułożony obok i nad rurociągiem stanowił dla słabego podłoża gruntowego dodatkowe obciążenie, które spowodowało osiadania rzędu kilkudziesięciu centymetrów. W wyniku tych osiadań nasyp przemieszczał się w dół, natomiast rurociąg, posadowiony na stabilnych podporach palowych, nie osiadał lub osiadał bardzo niewiele. Stanowił więc opór dla osiadającego nasypu. Opór ten wywołał tak duże obciążenie pionowe rurociągu, że najprawdopodobniej przekroczyło ono między innymi jego nośność na zginanie.

Przyjęty do analizy i obliczeń schemat oraz dane przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Warunki i dane do obliczenia obciążeń rurociągu (schemat do metody uproszczonej)
Fig. 4. Geotechnical conditions and other data for the calculations of loads of the pipeline

W celu oszacowania wartości obciążeń działających na rurociąg w opisanych wyżej warunkach wykonano obliczenia metodami przedstawionymi w pkt. 2 i 3.

Obliczenie obciążenia jak dla rurociągu układanego na gruncie – według wzoru (1)

Zgodnie z rys. 4, ciężar gruntu nad rurociągiem wynosi: $G_0 = 12.72 \text{ kN/m}$. Dla warunków zadania odczytano z nomogramów [2] współczynnik $\lambda_n = 1.80$. Całkowite obciążenie pionowe rurociągu wynosi:

$$P = \lambda_n \cdot G_0 = 1.80 \cdot 12.72 = 22.90 \text{ kN/m}$$

Obliczenie metodą uproszczoną – według wzoru (2)

Zgodnie z wynikami obliczeń przedstawionymi na rys. 4, obciążenie rurociągu wynosi:

$$P = 32.16 \text{ kN/m}$$

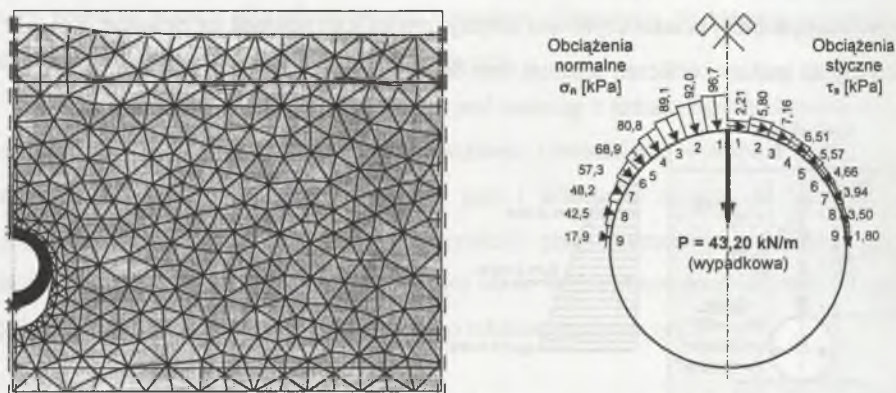
Obliczenie metodą otrzymaną z równania różniczkowego – według wzoru (7)

Średni ważony ciężar objętościowy gruntu: $\gamma_{sr} = (0.5 \cdot 18.0 + 1.5 \cdot 10.0) / 2.0 = 12.0 \text{ kN/m}^3$.
Całkowite obciążenie pionowe rurociągu:

$$P = \frac{12.0 \cdot 0.53^2}{2 \cdot 0.5 \tan 30^\circ} \cdot \left[\exp\left(2 \cdot 0.5 \cdot \frac{2.0}{0.53} \tan 30^\circ\right) - 1 \right] = 45.7 \text{ kN/m}$$

Obliczenie metodą elementów skończonych

Analizę MES wykonano przyjmując sprężysto-plastyczny model ośrodka gruntowego i kryterium zniszczenia według Coulomba-Mohra. W rozwiązaniu wykorzystano symetrię układu. Procedurę obliczeniową przeprowadzono zgodnie ze wskazówkami podanymi w pkt. 3c. Zdeformowaną siatkę elementów w końcowym kroku obliczeń oraz otrzymany rozkład obciążeń działających na rurociąg przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Wyniki obliczeń MES (zdeformowana siatka elementów i rozkład obciążeń na rurociągu)
Fig. 5. FEM calculation results (deformed mesh of elements and distribution of loads on the pipeline)

Zgodnie z rys. 5, otrzymane tą metodą obciążenie rurociągu wynosi:

$$P = 43.2 \text{ kN/m}$$

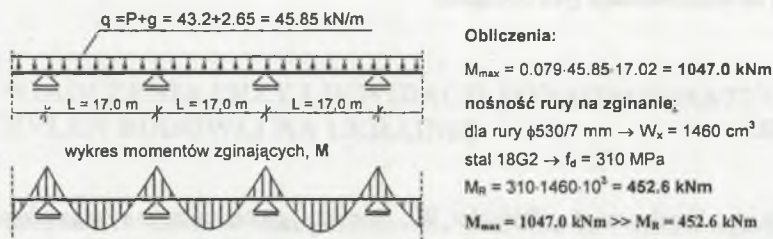
Analiza wykazała, że do całkowitego zmobilizowania maksymalnych obciążeń rurociągu wystarczyło już niewielkie przemieszczenie gruntu – około 1.0 cm.

4.2. Analiza porównawcza wyników obliczeń

Przedstawione wyniki obliczeń potwierdziły dużą wartość obciążeń działających na rurociąg w przypadku posadowienia go na palach i zasypania gruntem mineralnym na słabym podłożu gruntowym. Potwierdziły również, że dla takiego przypadku nie nadają się klasyczne metody obliczania obciążeń, stosowane do rurociągów układanych na gruncie, gdyż dają wartości dużo zaniżone. Znacznie większe wartości i bardziej odpowiadające rzeczywistości dają metody obliczeniowe opisane w pkt. 3. Spośród nich metoda uproszczona daje wyniki najmniejsze, a więc jest najmniej bezpieczna. Dwie pozostałe metody dały bardzo zbliżone wyniki i z tego względu należy je uważać za najbardziej miarodajne i zalecane.

4.3. Sprawdzenie nośności rurociągu na zginanie i ustalenie przyczyn jego deformacji

Poniżej przeprowadzone zostaną obliczenia sprawdzające, czy oszacowane obciążenia faktycznie mogły doprowadzić do przekroczenia nośności rurociągu na zginanie i w konsekwencji trwałej jego deformacji.



Rys. 6. Schemat przyjęty do sprawdzenia wytrzymałości rurociągu na zginanie
 Fig. 6. Scheme for the pipeline bending strength examination

W obliczeniach tych przyjęto rurociąg jako belkę ciągłą wieloprzęsłową (rys. 6), obciążoną równomiernie na całej długości. Do analizy przyjęto obciążenie obliczone metodą elementów skończonych, powiększone dodatkowo o ciężar własny rurociągu i wypełnienia. Porównanie maksymalnego momentu zginającego z nośnością rury wykazało znaczne, ponad dwukrotne przekroczenie nośności rurociągu na zginanie, co wystarczająco tłumaczy przyczynę powstałych deformacji. Należy dodatkowo zauważyć, że zwiększone obciążenia były groźne nie tylko dla rurociągów, ale również dla konstrukcji podpór. Dlatego niektóre z nich uległy uszkodzeniu.

5. Wnioski

W przedstawionym artykule zwrócono uwagę na niebezpieczeństwa związane z prowadzeniem rurociągów przez tereny o słabym podłożu gruntowym. W przypadku podziemnych rurociągów prowadzonych w trudnych warunkach gruntowych i posadowionych na palach obciążenia działające na te rurociągi od zasypki gruntowej mogą znacznie przewyższać obciążenia rurociągów układanych bezpośrednio na gruncie. Podawane w literaturze metody szacowania obciążeń dla rurociągów układanych w wykopie lub w nasypie i posadowianych na dobrym podłożu gruntowym nie nadają się do zastosowania dla rurociągów posadowianych na palach w trudnych warunkach gruntowych, gdyż dają zbyt

zaniżone wartości tych obciążeń. W takich warunkach bezpieczne zaprojektowanie rurociągu i jego posadowienia umożliwiają metody obliczania obciążeń opisane w pkt. 3 niniejszego artykułu. Należy ponadto zwrócić uwagę, że przy prowadzeniu rurociągów przez tereny o trudnych warunkach gruntowych, ważne jest nie tylko właściwe oszacowanie obciążeń rurociągów i ich podpór, ale również zastosowanie odpowiedniej technologii robót, zmierzającej do minimalizacji tych obciążeń.

LITERATURA

1. Krasieński A., Tejchman A., Bogotko W.: Aspekty geotechniczne ryzyka eksploatacji rurociągów na terenach o słabym podłożu gruntowym. Materiały III Krajowej Konferencji Technicznej: „Zarządzanie Ryzykiem w Eksploatacji Rurociągów”, Płock, 25-26 maj 2000.
2. Kuczyński J.: Miejskie budowle podziemne i sanitarne. PWN, Warszawa-Wrocław 1980.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław PISARCZYK

Abstract

In the case of underground pipelines running in unfavorable geotechnical conditions and founded on piles, the loads acting on the pipelines, mainly from the soil fill, can essentially exceed the loads of pipelines founded directly on the soil surface. Methods described in the literature for the assessment of loads for the pipelines running in the excavation or on the embankment and founded on good subsoil can not be used for the pipelines on piles in unfavorable subsoil conditions due to underestimation of the load values. A safe design of pipeline running in weak soils requires other approach to the problem of calculation of loads acting on the pipeline. Such methods and procedures are presented in section 3. Additionally, the described practical example of the pipeline failure shows, that in the case of unfavorable soil conditions, besides appropriate assessment of loads, important role plays also respective technology of works, leading to the maximum decrease of these loads.