

Kesony ssące – konstrukcja, instalacja, nośność

Mgr inż. Łukasz Wachowski

Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku, Zakład Geomechaniki

W ostatnich dekadach obserwuje się wyraźny postęp technologiczny związany z pozyskiwaniem surowców naturalnych spod dna morskiego. Poszukiwanie i eksploatacja złóż ropy naftowej oraz gazu odbywa się na coraz większych głębokościach dochodzących nawet do 2000 m [9]. W tym samym czasie dynamicznie rozwijają się morskie farmy wiatrowe, projektowa-

ne i lokalizowane na akwenach o niesprzyjających warunkach gruntowych i wiatrowych. Jest to możliwe, z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia, w efekcie wprowadzania do praktyki nowych technologii i rozwiązań konstrukcyjnych.

Jednym z takich rozwiązań jest nowy rodzaj fundamentów podwodnych, pełniących jednocześnie rolę fundamentu kła-

sycznego i funkcję kotwy o nazwie *suction caissons* lub *suction buckets*. Fundamenty te, zazwyczaj stalowe, przypominają kształtem duży, odwrócony kubek wciskany w dno morskie podczas instalacji konstrukcji. Przenoszą one zarówno siły wciągające fundament w podłoże, jak również siły wyciągające. Zaletą takiego rozwiązania jest w miarę prosty montaż i demontaż z dna morskiego, wspomagany wtłaczaniem bądź wypompowywaniem wody z wnętrza konstrukcji. Rozwiązania te są alternatywą dla tradycyjnych fundamentów podwodnych, betonowych pali wierconych lub wciskanych pali stalowych bądź zakotwień: klasycznych lub innych, np. typu *drag anchors*. Kesony ssące są obecnie stosowane w różnego rodzaju konstrukcjach pełnomorskich, takich jak platformy wiertnicze, morskie elektrownie wiatrowe lub głębokowodne konstrukcje podwodne. Stosuje się je również do kotwienia pojedynczych boi lub pływających morskich farm rybnych.

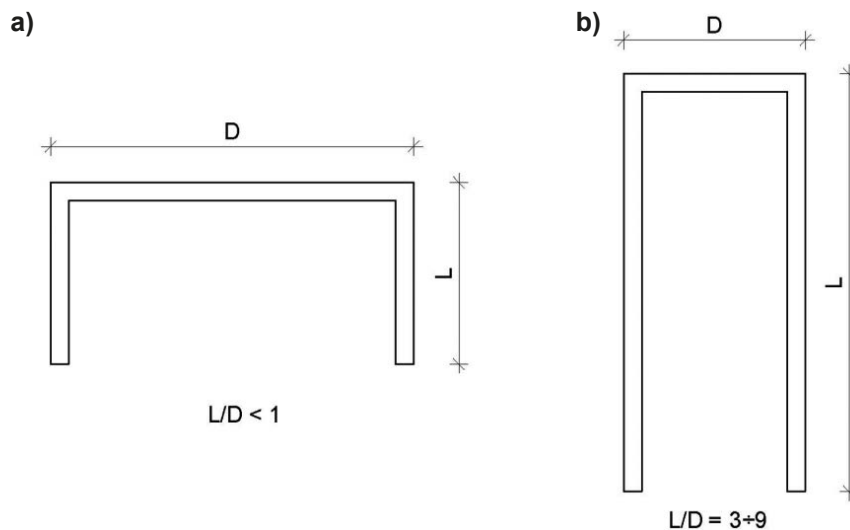
KONSTRUKCJA I INSTALACJA

Kesony ssące to duże cylindryczne konstrukcje, najczęściej wykonane ze stali, otwarte w podstawie i zamknięte u góry. Mogą być one instalowane zarówno w gruntach piaszczystych,

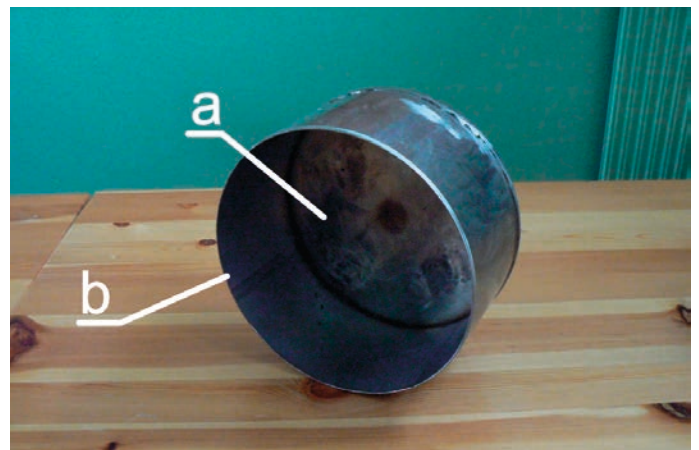
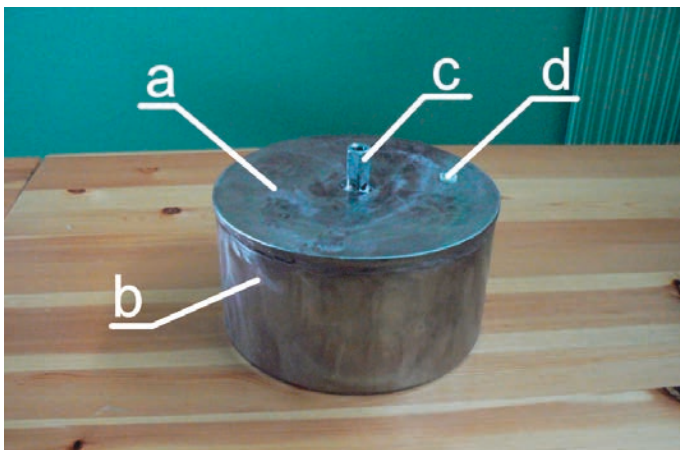
jak i spoistych. Do instalacji w piaskach stosuje się konstrukcje o średnicach większych od ich wysokości (stosunek długości L do średnicy D jest mniejszy od 1). Natomiast w gruntach spoistych stosowane są zakotwienia wyższe niż szersze (ze stosunkiem L/D w granicach 3 do 9) (rys. 1). W tego rodzaju fundamentach stosunek grubości ścian do średnicy waha się w granicach od 0,3% do 0,6% [2]. Przy wyższych konstrukcjach stosuje się dodatkowe usztywnienia wzdłuż jej wysokości oraz w postaci pierścieni wzdłuż jej wewnętrznego obwodu, aby zapobiec wybočeniom pobocznicy podczas montażu. Konstrukcja fundamentu jest wyposażona w zawory umieszczone na górnej płycie, które umożliwiają usunięcie lub wprowadzenie powietrza lub wody do wnętrza kesonu (rys. 2).

W praktyce, pod stopami morskich platform wiertniczych lub morskich elektrowni wiatrowych, najczęściej stosuje się pojedyncze kesony ssące, ale spotyka się również obiekty złożone. Mogą mieć one postać konstrukcji zespolonej, które obejmują kilka fundamentów połączonych ze sobą łącznikami stalowymi bądź formę konstrukcji z jedną płytą górną i kesonem podzielonym kilkoma przegradami.

Instalacja kesonu ssącego polega na opuszczeniu go ze statku za pomocą wciągarki na dno morskie. Na tym etapie zawory



Rys. 1. Wymiary kesonów ssących stosowanych w: gruntach niespoistych (a) i gruntach spoistych (b)



Rys. 2. Model kesonu ssącego stosowany w badaniach laboratoryjnych w IBW PAN, będący miniaturą rzeczywistej konstrukcji
a – płyta górna, b – pobocznica, c – mocowanie do konstrukcji obciążającej, d – zawór

umieszczone w górnej płycie fundamentu są otwarte, co umożliwia swobodny wypływ powietrza z jego wnętrza. Początkową fazę instalacji stanowi zagłębianie fundamentu pod wpływem własnego ciężaru, dopóki opór gruntu nie zatrzyma dalszej penetracji konstrukcji. W tym momencie zawory są zakręcane i następuje wypompowywanie wody za pomocą pomp umieszczonych na statku. Usuwanie wody z wnętrza fundamentu pozwala uzyskać różnicę ciśnień powodującą dalsze zagłębianie się fundamentu. Ponadto, w gruntach przepuszczalnych, woda przepływająca przez pory gruntu z zewnątrz do wnętrza konstrukcji wzdłuż jej pobocznic powoduje lokalne zmniejszenia naprężeń efektywnych na dnie fundamentu oraz w strefie kontaktu ścian kesonu z gruntem. Obniża to opór tarcia na pobocznicach kesonu i tym samym ułatwia jego dalszą penetrację. Pompowanie ustaje w momencie osiągnięcia przez fundament projektowanego zagłębienia w dnie morskim.

Przy obciążeniach wciskających, na przykład od zewnętrznej konstrukcji posadowionej na fundamencie, keson ssący pracuje jak klasyczny fundament lub pał. Przy siłach wyciągających odrywaniu kesonu zapobiega, oprócz ciężaru konstrukcji i oporu tarcia gruntu na pobocznicach, podciśnienie w kesonie uzyskane w momencie instalacji.

W przypadku zmiany lokalizacji konstrukcji lub potrzeby odholowania do celów remontowych istnieje możliwość łatwego podniesienia fundamentu z dna morskiego. Po otworzeniu zaworów i wyrównaniu różnicy ciśnień, keson ssący podnosi się za pomocą wyciągarki. Przy ewentualnych oporach, proces ten można wspomóc, wtłaczając do wnętrza kesonu wodę lub powietrze.

ZALETY KESONÓW SSĄCYCH

Szybki wzrost liczby zastosowań kesonów ssących w ostatnich latach spowodowany jest ich licznymi korzystnymi cechami w porównaniu z tradycyjnymi fundamentami. Największą zaletą jest relatywnie niski koszt instalacji. Nie używa się bowiem ciężkiego sprzętu niezbędnego do wykonania alternatywnych podwodnych fundamentów, najczęściej w postaci pali wierconych. Ponadto, w przypadku kesonów ssących istnieje możliwość ich instalacji na głębokim morzu, gdzie wykonanie pali jest znacznie utrudnione lub nieopłacalne. Także podnoszenie kesonów ssących z dna morskiego jest stosunkowo proste i tanie. Fundamenty palowe najczęściej traci się w dnie morskim, odcinając posadowioną na nich zasadniczą konstrukcję. Wykonanie kesonów ssących jest oczywiście bardziej kosztowne od pali wwiercanych lub wbijanych ze względu na złożoność konstrukcji i precyzję budowy, co znacznie zwiększa koszty materiałów i robocizny. Jednakże relatywnie koszty i krótki czas instalacji oraz możliwość prostego odzyskania i wielokrotnego użycia kesonów ssących sprawiają, że ich stosowanie jest znacznie bardziej opłacalne od dotychczasowych, tradycyjnych konstrukcji.

ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII KESONÓW SSĄCYCH W PRAKTYCE

Keson ssący to stosunkowo nowa, lecz intensywnie rozwijająca się technologia. Pierwsze takie konstrukcje, zainstalowane z użyciem sił przyssania, zastosowano w 1989 roku w platformie Gullfaks C na Morzu Północnym. Szesnaście

wielkośrednicowych fundamentów posadowiono na głębokości 220 m na dnie morskim zbudowanym z glin i luźnych piasków gliniastych. Pobocznicę fundamentów zagłębiono w dnie morskim na głębokość 22 m przy wprowadzeniu podciśnienia zadanego przy użyciu pomp [2]. Z kolei pierwszą tego rodzaju konstrukcją zainstalowaną w podłożu piaszczystym wykonano w 1994 roku do posadowienia platformy *Statoil Draupner E* na Morzu Północnym [5]. Kesony ssące o średnicy 12,0 m i wysokości 6,0 m zagłębiono przy użyciu podciśnienia na głębokości 70 m. Kolejną podobną konstrukcją z użyciem kesonów ssących zainstalowano na Morzu Północnym w 1996 roku.

Pozytywne efekty instalacji fundamentów z użyciem sił przyssania spowodowały szybki rozwój tej technologii i dalsze, liczne zastosowania w praktyce. Szacuje się, że obecnie jest zainstalowanych ponad 500 kesonów ssących, w więcej niż 50 lokalizacjach na całym świecie. Ta liczba jest ciągle niewielka w porównaniu do liczby tradycyjnych fundamentów palowych, ale liczba zastosowań tej nowej technologii bardzo szybko wzrasta. Obecnie kesony ssące są stosowane na wszystkich kontynentach i na różnych głębokościach wody: od wód płytkich (20 ÷ 40 m) do bardzo głębokich (nawet 1000 m).

OBCIĄŻENIA DZIAŁAJĄCE NA KESONY SSĄCE

W praktyce kesony ssące są poddawane zarówno obciążeniom stałym, jak i obciążeniom cyklicznym o dużej i małej częstotliwości [3]. Obciążenia stałe najczęściej pochodzą od ciężaru własnego fundamentu oraz od ciężaru posadowionej na nim konstrukcji. Cykliczne obciążenia fundamentów są związane z działaniem fal morskich na konstrukcję zasadniczą obciążającą fundamenty. Obciążenia cykliczne o dużej częstotliwości pochodzą od falowania podczas sztormu, natomiast obciążenia o małej częstotliwości są spowodowane zwykłym falowaniem, a także działaniem wiatru i prądów morskich.

Obciążenia zewnętrzne działają na podwodne fundamenty w kierunku pionowym i w poziomym. W przypadku ciężkich platform wiertniczych dominują obciążenia pionowe, natomiast obciążenia poziome mają istotne znaczenie przy zakotwieniach konstrukcji pływających połączonych z fundamentem za pomocą lin lub łańcuchów. W przypadku obciążeń pionowych kesony ssące przenoszą obciążenia wciskające i wyciągające. W tym ostatnim przypadku takiemu obciążeniu przeciwstawia się ciężar konstrukcji, ciężar „korka” gruntowego wewnątrz kesonu (tworzącego się zarówno w gruntach mało przepuszczalnych, jak i w piaskach drobnych lub pylastych), tarcie gruntu o pobocznicę oraz podciśnienie generujące się wewnątrz i w otoczeniu fundamentu.

BADANIA KONSTRUKCJI KESONÓW SSĄCYCH

Keson ssący, jako rozwiązanie nowatorskie, wymagają badań, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i na konstrukcjach pełnowymiarowych. Badania takie są zlecane i finansowane przez wielkie koncerny naftowe, a ich wyniki w przeważającej większości niestety nie są publicznie dostępne.

W literaturze naukowej można znaleźć nieliczne opisy badań modelowych kesonów ssących prowadzonych w warunkach laboratoryjnych, wykonywanych z modelami około 100 razy mniejszymi niż rzeczywiste konstrukcje. Przykładowo, badania

monotonicznego i cyklicznego osiowego wyciągania pojedynczych fundamentów z nawodnionego gruntu niespoistego za pomocą ramy z trzema stopniami swobody przeprowadził Byrne [1]. Podobne badania, wykonane tym razem w komorze ciśnieniowej, opisał Kelly i in. [7]. Z kolei Lu i in. [6] przeprowadzili badania monotonicznego wyciągania modeli kesonów ssących w szklanym zbiorniku. Badania wykonano, używając pojedynczy model oraz zespół czterech fundamentów (tetrapod), przy trzech różnych prędkościach wyciągania.

W ostatnich latach rozpoczęto badania modelowe fundamentów kesonów ssących w wirówce, która umożliwia odwzorowanie rzeczywistych warunków obciążenia i stanu naprężenia w gruncie. Badania monotonicznego i cyklicznego wciskania i wyciągania modeli z pojedynczymi fundamentami przeprowadził Lu i in. [8], zaś Senders [10] z zespołem trzech fundamentów (tripod).

Wyniki dotychczasowych badań umożliwiły przede wszystkim rozpoznanie zjawisk zachodzących w kesonie podczas procesu instalacji i wyciągania, zarówno w gruntach spoistych i niespoistych. W przypadku gruntów spoistych podciśnienie, spowodowane wypompowywaniem wody z wnętrza kesonu, powoduje przeważnie bezproblemowe zagłębienie się fundamentu w gruncie. W przypadku instalacji w gruntach niespoistych podciśnienie powoduje dodatkowy przepływ wody w gruncie przy podstawie konstrukcji i przy jej pobocznicach. Znaczna różnica ciśnień wewnątrz i na zewnątrz kesonu, niezbędna do odpowiedniego zagłębienia kesonu w dnie piaszczystym, może doprowadzić do awarii konstrukcji fundamentu. Również, podczas deinstalacji fundamentu odnotowuje się występowanie większych sił wyciągających w gruntach piaszczystych niż w gruntach ilastych. Z tego powodu konstrukcje kesonów ssących przewidziane do posadowienia w gruntach niespoistych muszą być bardziej masywne i wytrzymałe.

WYZNACZANIE SIŁY WCISKAJĄCEJ ORAZ WYCIĄGAJĄCEJ KESONY SSĄCE W GRUNCIE NIESPOISTYM

Wyniki dotychczasowych badań pozwoliły na określenie zależności umożliwiających wyznaczenie wartości siły wciska-

jącej i wyciągającej niezbędnej do instalacji i deinstalacji kesonów ssących w dnie piaszczystym. Metodę taką zaproponował Houlby oraz Byrne w pracach [2] i [4]. Przedstawiono wzory na siłę wciskającą i wyciągającą kesony ssące (rys. 3) z jednorodnego, niespoistego podłoża nawodnionego.

Rozpatruje się dwa etapy instalacji kesonu ssącego w podłożu. Pierwszy etap dotyczy instalacji pod wpływem ciężaru własnego. W drugim etapie instalacja jest wspomagana podciśnieniem spowodowanym wypompowywaniem wody z wnętrza kesonu ssącego. W pierwszym etapie instalacji wartość siły wciskającej zależy od parametrów gruntu, jego zagęszczenia oraz grubości ścian bocznych kesonu ssącego. Opór tarcia podczas wciskania kesonu ssącego wyznacza się na podstawie rozkładu naprężeń efektywnych na pobocznicach fundamentu przy uwzględnieniu współczynnika parcia bocznego oraz kąta tarcia pomiędzy gruntem a ścianami fundamentu.

Pionową siłę wciskającą keson ssący do zagłębienia h bez wprowadzania podciśnienia opisali Houlby i Byrne [2] zależnością (1):

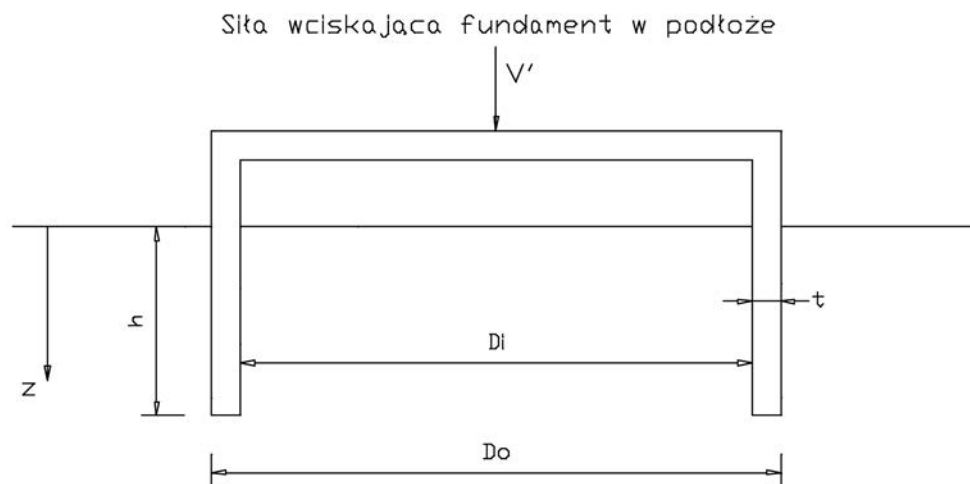
$$V'_{wc} = \frac{\gamma' h^2}{2} (K \tan \delta)_o (\pi D_o) + \frac{\gamma' h^2}{2} (K \tan \delta)_i (\pi D_i) + \left(\gamma' h N_q + \gamma' \frac{t}{2} N_\gamma \right) (\pi D t) \quad (1)$$

gdzie:

- γ' – ciężar objętościowy gruntu z uwzględnieniem wporu wody,
- K – współczynnik parcia poziomego działającego na ścianki kesonu ssącego,
- δ_o, δ_i – kąty tarcia gruntu o fundament odpowiednio na zewnątrz i wewnątrz kesonu ssącego,
- D_o, D_i – średnica zewnętrzna i wewnętrzna kesonu ssącego,
- t – grubość ścianki pobocznic,
- N_γ, N_q – współczynniki nośności,
- h – aktualne zagłębienie kesonu ssącego,
- $D = (D_o + D_i)/2$ – średnia wartość średnicy kesonu ssącego.

We wzorze (1) pierwszy człon opisuje siłę tarcia gruntu o zewnętrzne pionowe ścianki kesonu ssącego, drugi siłę tarcia wewnątrz kesonu, a trzeci człon określa nośność dolnej, pierścieniowej podstawy pobocznic, która jest szacowana w sposób konwencjonalny.

W drugim etapie instalacji proces wciskania jest wspomagany podciśnieniem (ssaniem) s związanym z wypompowywa-



Rys. 3. Geometria kesonu ssącego wciskanego w piaszczyste dno morskie

niem wody z wnętrza kesonu ssącego. W tym przypadku całkowite ciśnienie w konstrukcji opisano w pracy [2] wzorem (2).

$$p_{c1} = p_a + \gamma_w h_w - s \quad (2)$$

gdzie:

p_a – ciśnienie atmosferyczne,

h_w – głębokość wody,

γ_w – ciężar objętościowy wody.

Przyjmuje się, że ciśnienie wody w porach gruntu przy podstawie kesonu ssącego jest równa wartości podciśnienia s skorygowanego poprzez pomnożenie przez tzw. współczynnik ciśnienia a zależny od stosunku h/D , który najczęściej przyjmuje wartości mniejsze od 0,5. Przy tym założeniu całkowite ciśnienie przy podstawie fundamentu p_{c2} opisano w pracy [2] zależnością (3).

$$p_{c2} = p_a + \gamma_w (h_w + h) - as \quad (3)$$

Różnica ciśnień powoduje, że na zewnątrz kesonu ssącego średni gradient hydrauliczny p_o opisany zależnością (4) jest skierowany w dół, zaś wewnątrz kesonu ssącego gradient hydrauliczny p_i opisany wzorem (5) jest skierowany do góry [2].

$$p_o = \frac{as}{\gamma_w h} \quad (4)$$

$$p_i = \frac{(1-a)s}{\gamma_w h} \quad (5)$$

Zakłada się, że dystrybucja ciśnienia wody w porach gruntu na zewnątrz i wewnątrz kesonu ssącego jest liniowa z głębokością. Rozkład naprężeń efektywnych na zewnątrz i wewnątrz pobocznic kesonu ssącego, oznaczony odpowiednio: p'_o i p'_i , oblicza się podobnie, z tą różnicą, że γ_w we wzorach (4) i (5) jest zastąpione przez γ'_w (zależności (6) i (7)) [2].

$$p'_o = \gamma' + \frac{as}{h} \quad (6)$$

$$p'_i = \gamma' - \frac{(1-a)s}{h} \quad (7)$$

gdzie:

γ' – ciężar objętościowy gruntu z uwzględnieniem wyporu.

Pionowa siła powodująca penetrację kesonu ssącego do zagłębienia h przy wprowadzonym podciśnieniu s opisano w pracy [2] zależnością (8):

$$\begin{aligned} V'_{wcs} &= V' + s \left(\frac{\pi D_i^2}{4} \right) = \\ &= \left(\gamma' + \frac{as}{h} \right) \frac{h^2}{2} (K \tan \delta)_o (\pi D_o) + \left(\gamma' - \frac{(1-a)s}{h} \right) \frac{h^2}{2} + \\ &+ (K \tan \delta)_i (\pi D_i) + \left[\left(\gamma' - \frac{(1-a)s}{h} \right) h N_q + \gamma' \frac{t}{2} N_\gamma \right] (\pi D t) \quad (8) \end{aligned}$$

W przypadku deinstalacji kesonu ssącego proces wyciągania może przebiegać stosunkowo wolno lub bardzo szybko. Drugi przypadek może być związany z oddziaływaniem falowania na posadowioną na kesonie ssącym konstrukcję zasadniczą.

W pierwszym przypadku, gdy siła wyciągająca będzie przykładana wolno, to w efekcie przepływu wody w porach gruntu nastąpi wyrównanie ciśnień wewnątrz i na zewnątrz kesonu ssącego. W takim wypadku jest opór fundamentu V'_{wy} i można

obliczyć go jako sumę sił tarcia na pobocznicę wewnątrz i na zewnątrz kesonu ssącego (9) [4]:

$$V'_{wy} = \frac{\gamma' h^2}{2} (K \tan \delta)_o (\pi D_o) + \frac{\gamma' h^2}{2} (K \tan \delta)_i (\pi D_i) \quad (9)$$

W drugim przypadku, szybkemu wyciąganiu przeciwstawić się będzie podciśnienie wytworzone wewnątrz oraz siły tarcia na zewnątrz kesonu ssącego. W tym przypadku siłę przeciwstawiającą się wyciąganiu kesonu ssącego V'_{wys} , związaną z wytworzonym w nim podciśnieniem s , opisano wzorem (10) [4]:

$$V'_{wys} = -s \left(\frac{\pi D_o^2}{4} \right) - s \frac{h}{2} (K \tan \delta)_o (\pi D_o) \quad (10)$$

Zatem całkowity opór kesonu ssącego V'_{wysc} przy wyciąganiu z uwzględnieniem tarcia na pobocznicę oraz oporu spowodowanego przysysaniem jest sumą zależności (9) i (10) [4]:

$$V'_{wysc} = V'_{wy} + V'_{wys} \quad (11)$$

Przedstawione zależności w gruncie niespoistym mogą być przydatne przy projektowaniu konstrukcji kesonów ssących. Umożliwiają one oszacowanie nośności oraz wartości sił kotwiących dla kesonów ssących. Pozwalają one również na wyznaczenie niezbędnej wartości podciśnienia przy instalacji kesonu ssącego, co jest potrzebne przy szacowaniu wydatku pomp oraz określeniu szybkości wypompowywania z niego wody.

PODSUMOWANIE

Kesony ssące są stosunkowo nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, stosowanymi w praktyce inżynierskiej dopiero od około 35 lat. Pełnią one zarówno rolę klasycznych fundamentów podwodnych, jak również funkcję kotew, przenosząc obciążenia wciskające i wyciągające. Ich zaletą jest prostota i szybkość montażu, zarówno w gruntach piaszczystych, jak i spoistych, także na dużych głębokościach. Łatwość demontażu czyni z nich konstrukcje wielokrotnego użytku. W odróżnieniu od klasycznych kotew konstrukcje te stawiają dodatkowy opór w efekcie działania sił przysysania przy obciążeniach wyciągających.

LITERATURA

1. Byrne B. W.: Investigations of suction caissons in dense sands. Phd Thesis, Magdalen College. London, Oxford, United Kingdom, 2000.
2. Houslyby G. T., Byrne B. W.: Design procedures for installation of suction caissons in sand. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering 158, 2004.
3. Houslyby G. T., Byrne B. W.: Suction caissons foundations for offshore wind turbines and anemometer masts. Wind engineering volume 24, 2000.
4. Houslyby G. T., Kelly R. B., Byrne B. W.: The tensile capacity of suction caissons in sand under rapid loading. Papers at the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Australia, 2005.
5. Huang J., Jianchun Cao, Audibert J. M. E.: Geotechnical design of suction caisson in clay. Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering, Honolulu, 2003.

6. Jiao B., Lu X., Zhao J., Wang W., Shi Z., Zeng X. H.: Experimental Study on the Bearing Capacity on Suction Caissons in Saturated Sand. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China, 2009.
7. Kelly R., Byrne B. W., Houlsby G. T., Martin C. M.: Pressure chamber testing of model caisson foundations in sand. Proceedings of the international conference of foundations, Dundee, 2003, 421-431.
8. Lu X., Wu Y., Jiao B., Wang S.: Centrifugal Experiment Study of Suction Bucket Foundations Under Dynamic Loading. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China, 2007.
9. NGI: Extreme Deep Anchoring (2013), www.ngi.no.
10. Senders M.: Suction Caissons in Sand As Tripod Foundations for Off-shore Wind Turbines on Sand, Ph. D. Thesis, University of Western Australia, 2008.