



WPLYW USYTUOWANIA POMPY GRUNTOWEJ NA PARAMETRY EKSPLOATACYJNE POGLEBIAREK SSACYCH

Damian Bocheński

*Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Zakład Siłowni Okrętowych
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: dabocho@pg.edu.pl*

Streszczenie

Artykuł przedstawia analizę wpływu usytuowania pompy gruntowej na parametry eksploatacyjne pogłębiarek ssących. Parametrami eksploatacyjnymi są zakres stosowalności pompy gruntowej rozumiany jako przedział dopuszczalnych wartości wydajności pompy, maksymalna gęstość mieszaniny gruntowej i związana z nią wydajność pogłębiarki oraz maksymalna głębokość pogłębiania.

Słowa kluczowe: pogłębiarki ssące, parametry pogłębiarki, pompy gruntowe

1. Wprowadzenie

Pompa gruntowa jest najważniejszym urządzeniem pogłębiarskim na pogłębiarkach ssących. Jej zadaniem jest transport odspojonego gruntu z dna na pokład a następnie na miejsce odkładu urobku. Poprawny dobór parametrów pomp (ciśnienie, wydajność) zapewni założoną wydajność projektową pogłębiarki. Oprócz wyżej wymienionych parametrów istotne jest właściwe usytuowanie pompy (lub układu pomp) na pogłębiarce. Usytuowanie pompy wpływa na maksymalną gęstość mieszaniny gruntowej, a tym samym na wydajność pogłębiarki oraz na maksymalną głębokość pogłębiania [12]. Artykuł przedstawia analizę wybranego układu pompowego z pompą gruntową pod kątem wpływu usytuowania pompy na głębokość pogłębiania i wydajność pogłębiarki ssącej.

2. Charakterystyka pogłębiarek ssących

Pogłębiarki ssące są zdecydowanie największą grupą pogłębiarek, charakteryzują się hydraulicznym transportem urobku. Ze względu na charakterystykę techniczną dzieli się je na dwa podstawowe rodzaje:

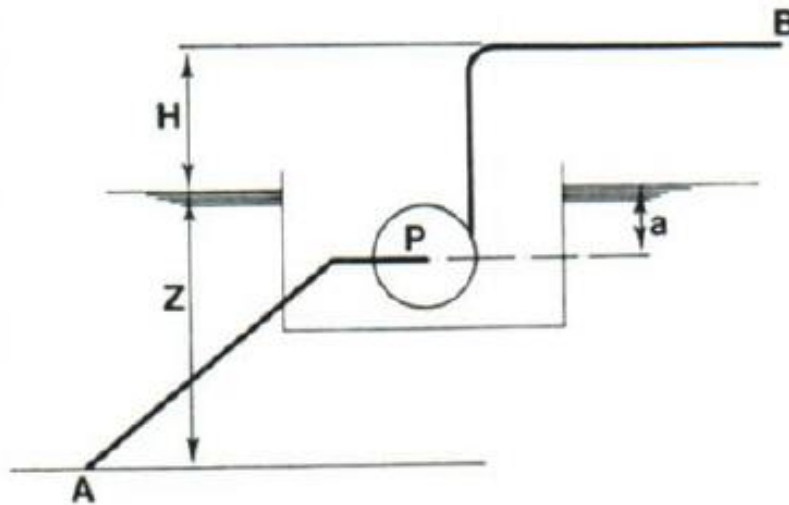
- Pogłębiarki ssące nasiębiernie charakteryzują się hydraulicznym odspajaniem gruntu, który jest transportowany do ładowni gruntowej, przy wykorzystaniu pomp gruntowych (pogłębiarskich). Pompy te zasysają mieszaninę przez 1. lub 2. zewnętrzne rury ssawne zwane smokami. Pogłębiarki ssące nasiębiernie wyposażone są zawsze we własny napęd, który zapewnia przemieszczanie się pogłębiarki w trakcie prowadzenia robót pogłębiarskich. Wymaganą wysoką

manewrowość zapewniają najczęściej dwuśrubowy układ napędowy oraz sterowanie strumieniowe. Napęd pogłębiarki umożliwia przewożenie wydobytego urobku na dowolne miejsce odkładu. Rozładunek ładowni odbywa się poprzez wypompowywanie urobku pompami gruntowymi z ładowni na ląd lub grawitacyjnie przez otwarcie klap dennych w ładowni [1, 4, 5, 14];

- Pogłębiarki frezująco-ssące charakteryzują się mechanicznym odspajaniem gruntów za pomocą głowicy frezującej, odspojony urobek jest transportowany przez pompę (lub pompy) gruntową na lądowe miejsce odkładu lub do ładowni szalandy. Zewnętrzna rura ssawna zainstalowana jest w specjalnie skonstruowanym wysięgniku zwanym często drabinie [1, 4, 6, 15].

3. Pogłębiarska instalacja pompowa

Pogłębiarska instalacja pompowa schematycznie została przedstawiona na rys. 1. Pompa gruntowa P zainstalowana jest w kadłubie pogłębiarki, króciec ssący pompy znajduje się o wartość a poniżej linii wodnej. Koniec zewnętrznej rury ssawnej A wyposażony jest w głowicę frezującą (w przypadku pogłębiarek frezująco-ssących) lub w spulchniacz hydrauliczny (w przypadku pogłębiarek ssących nasiębiernych). Głębokość pogłębianego akwenu oznaczona jest Z , zaś H jest wysokością podniesienia końcówki rurociągu tłoczącego B nad linią wodną. Końcówka rurociągu tłocznego może być nad ładownią gruntową pogłębiarki (nasiębiernej), nad ładownią szalandy bądź na odkładzie lądowym (pogłębiarki bez ładowni gruntowej).



Rys. 1. Schemat pogłębiarskiej instalacji pompowej

Usytuowanie możliwe jest również poza kadłubem pogłębiarki w zewnętrznej rurze ssawnej, wtedy mówimy o tzw. pompie zanurzonej.

4. Analiza wpływu usytuowania pompy gruntowej na parametry eksploatacyjne pogłębiarki ssącej

Na mniejszych pogłębiarkach frezująco-ssących pompy gruntowe znajdują się w kadłubie pogłębiarki i wartość a (pokazana na rys. 1, zwana wysokością napływu) jest bliska zeru. Na większych pogłębiarkach tego typu wartość a zawiera się w przedziale 1–1,5 m i więcej [2]. W przypadku pogłębiarek ssących nasiębiernych wartość a wynosi, w zależności od wielkości pogłębiarki, od 1–5 m na początku załadunku ładowni do 3–8 m pod koniec załadunku [2].

Pogłębiarki ssące nasiębiejne charakteryzują się zmiennością zanurzenia podczas załadunku ładowni urobkiem, stąd zmienność wartości a .

Wymagania odnośnie usytuowania pompy są związane najczęściej w wystąpieniem zjawiska kawitacji. Aby nie wystąpiło parowanie cieczy na wejściu do wirnika pompy musi istnieć nadwyżka wysokości ciśnienia na ssaniu zwana zapasem antykawitacyjnym lub wymaganą nadwyżką antykawitacyjną, którą określamy z zależności [13]:

$$NPSH_r = \frac{p_s}{\gamma} - \frac{p_n}{\gamma} + \frac{c_s^2}{2g} \quad (1)$$

Gdzie:

p_s – ciśnienie na króćcu ssawnym pompy,

p_n – ciśnienie nasycenia wody w danej temperaturze,

c_s – prędkość przepływu wody w króćcu ssawnym pompy,

γ – ciężar właściwy wody.

Wartość $NPSH_r$ jest indywidualną cechą każdej pompy, zależną od jej konstrukcji, określa się ją na podstawie badań i podawana jest przez producenta w katalogu pomp.

Rozporządzalna nadwyżka antykawitacyjna związana z układem pompowym określana jest z zależności [13]:

$$NPSH_a = \frac{p_b}{\gamma} - \frac{p_n}{\gamma} - H_s - \sum \Delta h_s + \frac{c_s^2}{2g} \quad (2)$$

Gdzie:

p_b – ciśnienie atmosferyczne,

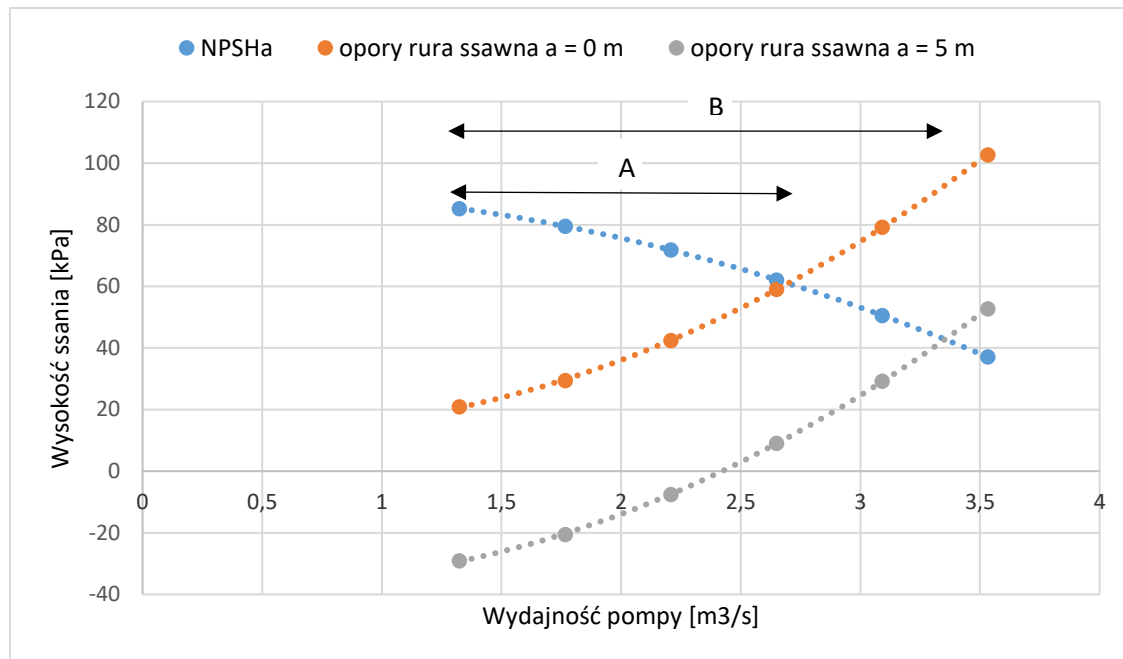
$\sum \Delta h_s$ – suma oporów przepływu w rurociągu ssawnym,

H_s – wysokość ssania, równa wartości a na rys. 1.

Aby nie wystąpiło zjawisko kawitacji rozporządzalna nadwyżka antykawitacyjna musi być większa od wymaganej nadwyżki antykawitacyjnej.

Powyższe wymaganie określa maksymalną wydajność pompy. Minimalna wydajność pompy związana jest z prędkością krytyczną mieszaniny gruntowej (wody z gruntem). Prędkość krytyczna jest minimalną prędkością przepływu mieszaniny gruntowej w rurociągu poziomym przy której nie zachodzi jeszcze osadzanie się ziaren gruntu na dnie rurociągu. Dla mieszaniny gruntowej z piaskiem średnioziarnistym wartość $Q_{min} = 1,36 \text{ m}^3/\text{s}$.

Dla zobrazowania zakresu stosowalności pompy gruntowej ($Q_{min} \div Q_{max}$) posłużono się przykładem instalacji pogłębiarskiej z rurociągiem ssawnym o długości 23 m i o średnicy 750 mm i z pompą gruntową IHC 175-37,5-75/5. Przyjęto głębokość pogłębiania równą 15 m. Obliczenia przeprowadzono dla mieszaniny wody z piaskiem średnioziarnistym (średnia średnica ziaren 0,235 mm, gęstość objętościowa piasku w miejscu zalegania 1950 kg/m³). Na rys. 2 przedstawiono wykres zależności $NPSH_a = f(Q)$ oraz charakterystyki rur ssawnych (opory przepływu dla tych rur w funkcji wydajności pompy) dla dwóch wartości usytuowania pompy ($a = 0 \text{ m}$ oraz $a = 5 \text{ m}$). Dodatkowo zaznaczono dwa zakresy A i B, są to zakresy stosowalności tej pompy, dla dwóch różnych wartości a (A dla wartości $a = 0 \text{ m}$ oraz B dla wartości $a = 5 \text{ m}$). Jak wynika z rys. 2 obniżenie położenia pompy (czyli wzrost wartości a) spowoduje zwiększenie zakresu $Q_{min} \div Q_{max}$.



Rys. 2. Zakres stosowalności pompy IHC 175-35-75/5 dla dwóch wartości usytuowania pompy ($a = 0$ m, $a = 5$ m) – piasek średnioziarnisty, głębokość pogłębiania 15 m

Dla wartości $a = 0$ m zakres stosowalności pompy wynosi $Q_{PG} = 1,36 \div 2,7$ m³/s zaś dla $a = 5$ m zakres ten zwiększył się do $Q_{PG} = 1,36 \div 3,32$ m³/s. Dla gruntów cięższych (piaski o większej średnicy ziaren, żwiry) zakres stosowalności pompy $Q_{min} \div Q_{max}$ będzie się zmieniał, Q_{min} będzie rosło zaś Q_{max} będzie malało.

W celu przeanalizowania jak usytuowanie pompy wpływa na dwa bardzo istotne parametry eksploatacyjne pogłębiarki ssącej: maksymalną gęstość mieszaniny gruntowej (bezpośrednio związanej w wydajnością pogłębiarki) oraz maksymalną głębokość pogłębianego akwenu, wykorzystano zależność [7, 13]:

$$(1 + \epsilon) \frac{v_m^2 \rho_m}{2g \rho_w} + \Delta h_{poch} + (Z - a) \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} - 1 \right) = a + H_s \quad (3)$$

Gdzie:

ϵ – sumaryczny współczynnik strat miejscowych w instalacji;

v_m – prędkość przepływu mieszaniny gruntowej;

Z – głębokość pogłębiania;

a – wysokość napływu;

ρ_m – gęstość mieszaniny gruntowej;

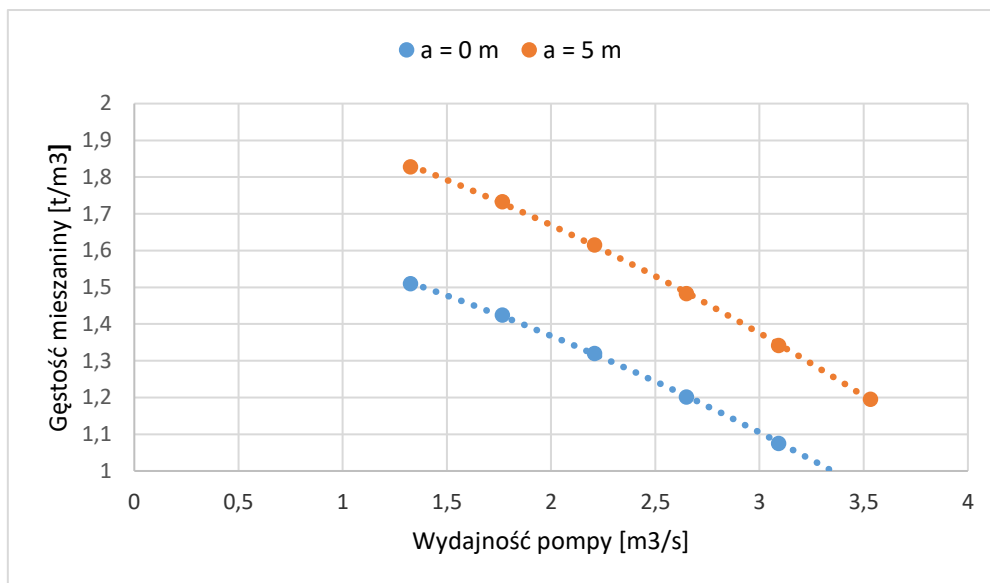
ρ_w – gęstość wody;

H_s – wysokość ssania;

Δh_{poch} - opory przepływu w pochyłym rurociągu ssawnym, można je obliczyć wykorzystując zależności podane w [5, 6, 8, 9].

Obliczenia oporów przepływu przeprowadzono dla piasku średnioziarnistego (parametry wcześniej podane). Przyjęto instalację pogłębiarską z rurociągiem ssawnym o długości 23 m i średnicy 750 mm oraz z pompą gruntową IHC 175-37,5-75/5.

Na rys. 3 przedstawiono zmianę maksymalnej gęstości mieszaniny gruntowej w zależności od wydajności pompy dla dwóch przypadków usytuowania pompy gruntowej ($a = 0$ m, $a = 5$ m). Jak widać maksymalna gęstość mieszaniny gruntowej gdy $a = 0$ m wynosi około 1,5 t/m³ (przy wydajności 1,36 m³/s), zaś gdy obniżymy pompę o 5 m maksymalna gęstość wzrośnie do wartości około 1,8 t/m³ (również dla wydajności 1,36 m³/s).



Rys. 3. Zmiana maksymalnej gęstości mieszaniny gruntowej dla instalacji z pompą IHC 175-37,5-75/5 dla dwóch wartości usytuowania pompy ($a = 0$ m, $a = 5$ m), głębokość pogłębiania 15 m

Wydajność pogłębiarki $Q_{pogł}$ (m^3 gruntu/godz.) określamy wykorzystując zależność [9, 10, 13, 14]:

$$Q_{pogł} \cdot (1 - n) = Q_{PG} \cdot C_V \quad (4)$$

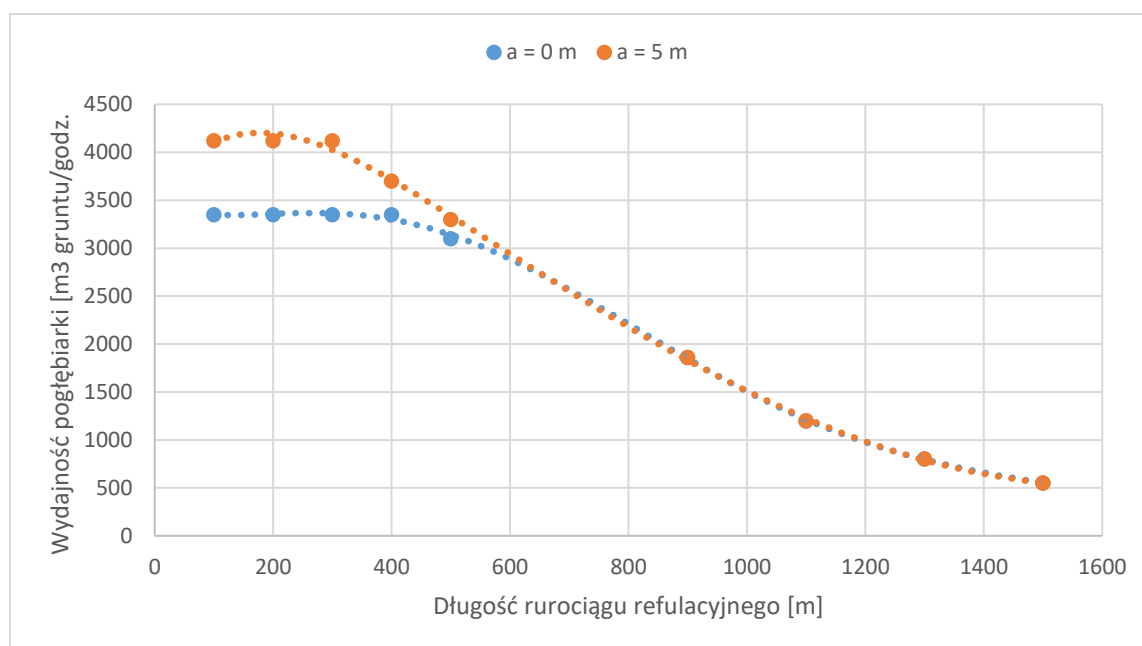
Gdzie:

n – porowatość gruntu, dla piasków średnioziarnistych $n = 0,42$;

Q_{PG} – wydajność pompy gruntowej;

C_V – zagęszczenie objętościowe mieszaniny gruntowej (zależy od gęstości mieszaniny).

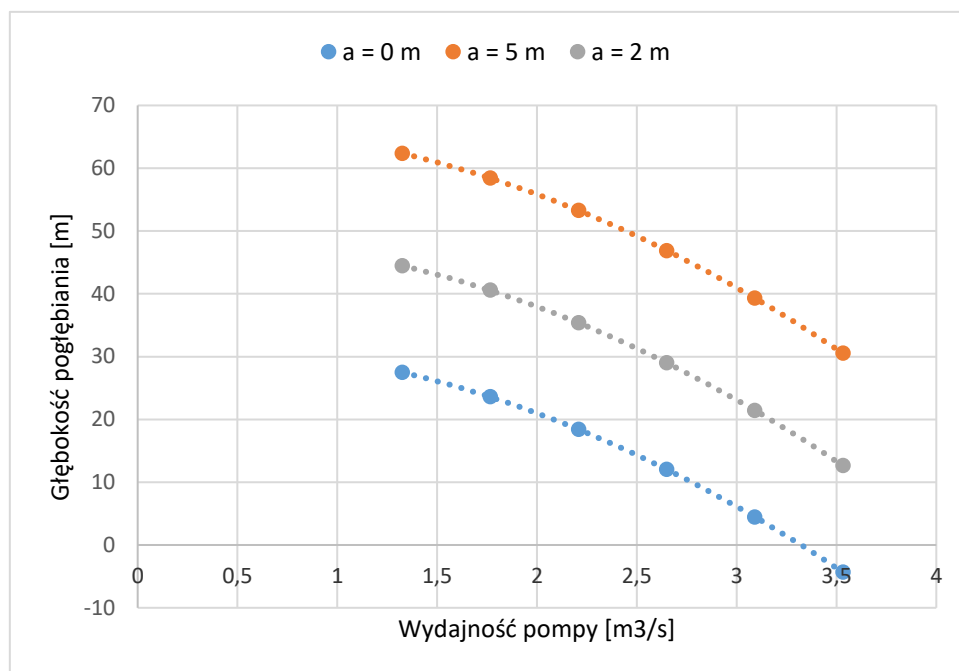
Dla pogłębiarki z pompą IHC 175-37,5-75/5, której napęd zapewnia silnik o mocy 3000 kW, przy głębokości pogłębiania 15 m, dla piasków średnioziarnistych określono charakterystyki wydajności w zależności od długości rurociągu refulacyjnego dla dwóch usytuowań pompy (rys. 4).



Rys. 4. Charakterystyki wydajności pogłębiarki dla dwóch usytuowań pompy

Z rys. 4 wynika, że zastosowanie pompy zanurzonej ($a = 5$ m) spowoduje zwiększenie wydajności pogłębiarki w zakresie krótkich rurociągów. Dla powyższego przypadku zwiększona wydajność występuje przy długościach poniżej 600 m.

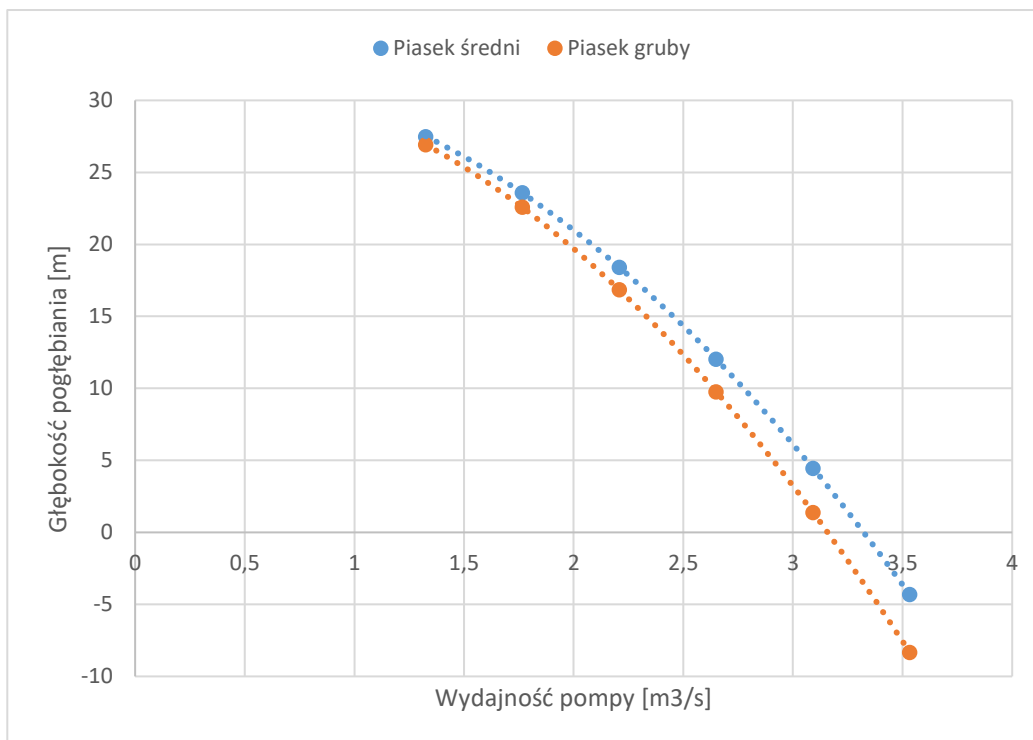
W celu przeanalizowania wpływu usytuowania pompy na wartość maksymalnej głębokości pogłębiania przyjęto wartość gęstości mieszaniny gruntowej. W większości projektów pogłębiarek ssących maksymalna gęstość mieszaniny gruntowej przyjmowana jest na poziomie $1,33$ t/m³, co odpowiada zagęszczeniu objętościowemu mieszaniny $C_V = 0,2$ [3, 10]. Rys. 5 przedstawia dla mieszaniny wody z piaskiem średnioziarnistym i założonej gęstości mieszaniny ($1,33$ t/m³) zmiany maksymalnej głębokości pogłębiania dla trzech wartości usytuowania pompy ($a = 0$ m, $a = 2$ m oraz $a = 5$ m).



Rys. 5. Zmiany maksymalnej głębokości pogłębiania dla instalacji z pompą IHC 175-37,5-75/5 dla trzech wartości usytuowania pompy ($a = 0$ m, $a = 2$ m, $a = 5$ m) – piasek średnioziarnisty, gęstość mieszaniny gruntowej $1,33$ t/m³

Z analizy wykresów przedstawionych na rys. 5 wynika, że dla usytuowania pompy w przybliżeniu równo z linią wody ($a = 0$ m) maksymalna głębokość pogłębiania wynosi $Z = 28$ m. Wartość ta osiągalna jest dla najniższej dopuszczalnej wydajności $1,36$ m³/s (dla piasków średnioziarnistych). Dla wydajności maksymalnej wynoszącej $2,7$ m³/s (rys. 2) maksymalna głębokość pogłębiania wynosi już tylko 12 m. Zwiększenie wartości a spowoduje znacząco większe głębokości pogłębiania.

W przypadku cięższych gruntów (o większych średnicach ziaren) sytuacja się będzie pogorszać. Obrazuje to rys. 6, na którym przedstawiono zmiany maksymalnej głębokości pogłębiania dla trzech wartości usytuowania pompy ($a = 0$ m, $a = 2$ m oraz $a = 5$ m) dla mieszaniny wody z piaskiem gruboziarnistym (1 mm) i identycznej gęstości mieszaniny ($1,33$ t/m³). Z obliczeń wynika, że maksymalne głębokości pogłębiania zmniejszą się dla wyższych wartości wydajności pompy prawie o 2 m. Jeszcze gorzej będzie w przypadku transportu wody z żwirem.



Rys. 6. Zmiany maksymalnej głębokości pogłębienia dla instalacji z pompą IHC 175-37,5-75/5 usytuowaną na poziomie linii wody ($a = 0$ m), dla dwóch mieszanin wody z piaskiem średnioziarnistym i piaskiem gruboziarnistym, gęstość mieszaniny $1,33 \text{ t/m}^3$

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy można sformułować następujące wnioski:

- Dla pogłębiarek ssących nasiębiernych, praktycznie nie ma uzasadnienia stosowania pomp poza kadłubem pogłębiarki (tzw. pompy zanurzone). Jak już wcześniej wspomniano pompy gruntowe na tych pogłębiarkach instalowane są poniżej linii wodnej z wartością a (czyli wysokością napływu) zawierającą się w przedziale $1 - 8$ m (zależnie od wielkości pogłębiarki oraz od tego czy jest początek czy koniec procesu załadunku). Z rys. 3 wynika jednoznacznie, że wartości minimalnej gęstości ($1,33 \text{ t/m}^3$) są bez problemu uzyskiwane dla powyższych wartości wysokości napływu. Również dla tych wartości wysokości napływu maksymalne głębokości pogłębienia (rys. 5) spełniają wymóg maksymalnej głębokości pogłębienia dla tego typu pogłębiarek (wynosi on $20 - 30$ m) [4, 5, 14];
- Dla pogłębiarek frezująco-ssących z pompą usytuowaną w kadłubie pogłębiarki (a bliskie 0 m) wartości minimalnej gęstości przyjmowanej przy projektowaniu instalacji ($1,33 \text{ t/m}^3$) są uzyskiwane przy niższych wydajnościach (rys. 3). Podobnie ma się z głębokością pogłębienia, która maleje przy większych wydajnościach (rys. 5). Można stwierdzić, że graniczne głębokości przy których dopuszczalne jest stosowanie pompy umiejscowionej w kadłubie pogłębiarki to $14 - 16$ m. Zwiększenie głębokości będzie związane z zmniejszeniem gęstości mieszaniny a co za tym idzie zmniejszeniem wydajności pogłębiarki. Dla głębokości pogłębienia powyżej 16 m uzasadnione będzie zastosowanie pompy gruntowej zanurzonej. Z rys. 4 można wywnioskować, że korzystne może być zastosowanie pompy gruntowej zanurzonej na pogłębiarce która będzie

eksploatowana na małych głębokościach. Pompa zanurzona zwiększy wydajność pogłębiarki w zakresach niższych wartości długości rurociągów refulacyjnych.

Literatura

1. Balcerski A., Bocheński D.: *Układy technologiczne i energetyczne jednostek oceanotechnicznych*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1998
2. Bocheński D.: *Baza danych DRAGA i możliwości jej wykorzystania w projektowaniu układów energetycznych pogłębiarek*. W: [Mat.] XXIII Sympozjum Siłowni Okrętowych SymSO 2002. Akademia Morska, Gdynia 2002
3. Bocheński D.: *Określenie projektowych i eksploatacyjnych wydajności pogłębiarki „Trojan”*. Opracowanie na zlec. Prozamet-System, Gdańsk 2009
4. Bocheński D.: *Projektowanie wstępne siłowni pogłębiarek z wykorzystaniem metod i modeli probabilistycznych*. Seria Monografie nr 142, Gdańsk 2013
5. Bocheński D.: *Analiza doboru parametrów pogłębiarki ssącej nasiębniernej*. Journal of Polish CIMEEAC Vol 15 no 1, 2020
6. Bocheński D.: *Analiza doboru parametrów pogłębiarki frezująco-ssącej*. Journal of Polish CIMEEAC Vol 16 no 1, 2021
7. Bree S. E. M.: *Centrifugal dredgepumps*. MTI Holland 1971
8. Matousek V.: *Hydraulic transport as one of the dredging processes*. Lecture notes wb3414. TUDelft 2001
9. Matousek V.: *Dredge pumps and slurry transport*. Lecture notes OE4625. TUDelft 2004
10. Miedema S. A.: *Production Estimation Based on Cutting Theories for Cutting Water Saturated Sand*. Proc. WODCON IV, November 1995, Amsterdam, The Netherlands 1995.
11. Miedema S. A.: *The Cutting of Water Saturated Sand, the solution*. The 2nd China Dredging Association International Conference & Exhibition, themed 'Dredging and Sustainable Development' and in Guangzhou, China, May 17-18 2006
12. Miedema S. A.: *Considerations on limits of dredging processes*. 19th Annual Meeting & Technical Conference of the Western Dredging Association. Louisville Kentucky, May 16-18, 1999.
13. Vlasblom W. J.: *Dredge pumps*. Lecture notes Wb3414, TUDelft 2004
14. Vlasblom W. J.: *Designing dredging equipment – trailing suction hopper dredgers*. Lecture notes Wb3408, TUDelft 2003-05
15. Vlasblom W. J.: *Designing dredging equipment – cutter suction dredgers*. Lecture notes Wb3408, TUDelft 2003-05