



DOBÓR PARAMETRÓW POGŁĘBIARKI FREZUJĄCO-SSĄCEJ

Damian Bocheński

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

Streszczenie

Artykuł przedstawia metodykę doboru parametrów pogłębiarek frezująco-ssących. Najważniejszym parametrem charakteryzującym pogłębiarki frezująco-ssące jest jej wydajność. Przedstawiana jest ona wykreślnie dla różnych rodzajów gruntu i odległości refulowania. Decydujący wpływ na wydajność pogłębiarki mają parametry instalacji pogłębiarskiej. Praca przedstawia dobór podstawowych parametrów pogłębiarki frezująco-ssącej w tym parametrów instalacji pogłębiarskiej.

***Słowa kluczowe:** pogłębiarki frezująco-ssące, parametry pogłębiarki, pompy pogłębiarskie*

1. Wprowadzenie

Pogłębiarki frezująco-ssące są obok pogłębiarek ssących nasiębiernych najczęściej stosowanym rodzajem pogłębiarek. Są przeznaczone głównie do gruntów średnich i ciężkich. W porównaniu z pogłębiarkami wieloczerpakowymi charakteryzują się większymi wydajnościami, mniejszymi gabarytami. Stosowane są zarówno w dużych pracach inwestycyjnych jak również w mniejszych pracach typu konserwacyjnego (m.in. utrzymywanie głębokości akwenów). Pierwszym etapem projektowania pogłębiarek jest zawsze określenie jej podstawowych parametrów projektowych. Parametry te obejmują głównie podstawowe parametry instalacji pogłębiarskiej. Artykuł jest propozycją sposobu przeprowadzenia analizy pozwalającej na określenie podstawowych parametrów wielkościowych pogłębiarki i jej instalacji pogłębiarskiej.

2. Charakterystyka pogłębiarek frezująco-ssących

Pogłębiarki frezująco-ssące (rys. 1) charakteryzują się mechanicznym odspajaniem gruntu, przy wykorzystaniu głowicy frezującej, który następnie jest hydraulicznie transportowany na ląd (refulacja) lub do ładowni gruntowej szalandy. Wykorzystuje się w tym pompy gruntowe. Pompy te zasysają mieszaninę przez jedną zewnętrzną rurę ssawną zainstalowaną na specjalnej konstrukcji wysięgniku (drabinie). Stosuje się od 1 do 3 pomp połączonych szeregowo, zależnie od głębokości pogłębiania i odległości refulowania. Manewry robocze nad miejscem wykopu pogłębiarki wykonują przy użyciu kotwicznych wciągarek manewrowych i urządzenia szczudłowego. Własny napęd, który służy tylko do przemieszczania się pogłębiarki z portu na miejsce pracy i odwrotnie, instaluje się dość rzadko i tylko na większych pogłębiarkach [2, 4, 11].

Pogłębiarki tego typu są budowane w szerokim zakresie wielkości. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi pogłębiarki frezująco-ssące są: łączna moc zainstalowanych silników spalinowych, która zawiera się w przedziale 600÷44200 kW, średnica smoka oraz liczba pomp gruntowych. Powszechnie jest stosowany podział pogłębiarek frezująco-ssących na 4 wielkości (tab. 1) [4, 11].



Rys. 1. Pogłębiarka frezująco-ssąca Al. – Mifra podczas przerzucania kotwic

Tablica 1

Wielkości pogłębiarek frezująco-ssących nasiębiernych i parametry je charakteryzujące

Wielkość pogłębiarki	Łączna moc silników spalinowych	Liczba pomp gruntowych	Średnica smoka	Maksymalna odległość refulacji	Maksymalna głębokość pogłębiania	Własny napęd
	kW	–	mm	km	m	
małe	< 3000	1	< 800	2 – 3	14 – 18	brak
średnie	3000 – 12500	2 lub 3	< 900	5 – 6	25 – 35	rzadko
duże	12500 – 27500	3	< 1000	8 – 10	25 – 35	często
b. duże	do 44200	3	< 1300	ponad 10	do 45	zawsze

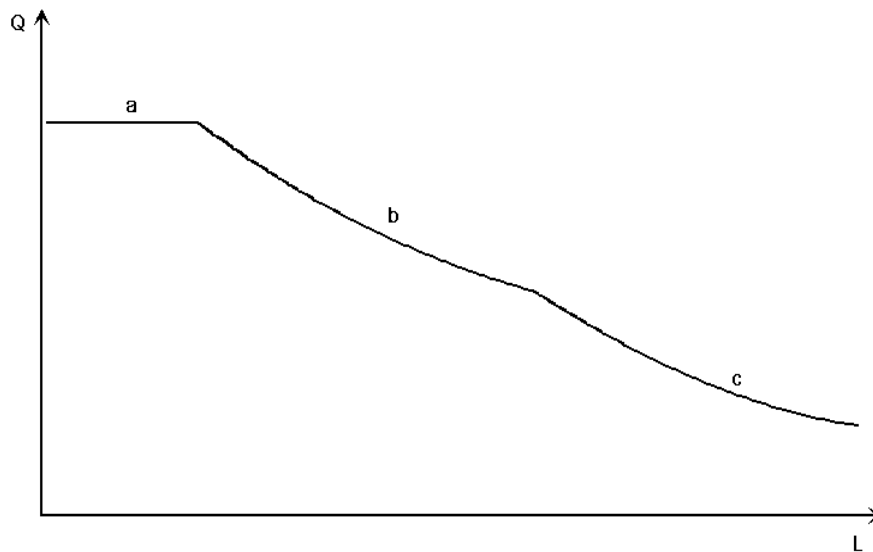
3. Określanie parametrów głównych odbiorników

Główne odbiorniki pogłębiarki frezująco-ssącej to: głowica frezująca (nożowa lub kołowa), układ dwóch wciągarek manewrowych oraz pompa (pompy) pogłębiarska [1, 11].

Podstawową daną wejściową do określania parametrów pogłębiarek frezująco-ssących jest założona wydajność pogłębiarki. Wydajność projektową pogłębiarki określa się dla założonego rodzaju gruntu. Dla tego gruntu przeprowadzane zostaną obliczenia określające parametry głównych urządzeń instalacji pogłębiarskiej. Poza tym zakłada się maksymalną głębokość pogłębiania oraz maksymalną odległość refulowania (hydraulicznego odprowadzenia urobku pogłębiarskiego).

Głowica frezująca charakteryzuje się wydajnością odspajania gruntu. Wydajność tą określa się dla założonych wymiarów geometrycznych głowicy, prędkości obrotowej i prędkości motykowania (prędkość poruszania się pogłębiarki z lewej do prawej strony lub odwrotnie). Nominalne wydajności odspajania głowicy określa się dla założonego gruntu. Określenie mocy głowicy a następnie dobór jej układu napędowego dokonywany jest dla przyjętego rodzaju gruntu.

Wydajność pogłębiarki frezująco-ssącej uwzględnia współpracę głowicy frezującej z pompą gruntową. Odspajany przez głowicę grunt nigdy nie jest w całości zasysany przez pompę. Ilość gruntu niezassanego przez pompę w efekcie jego rozlewania zależy m.in. od jego rodzaju. Średnio wynosi ona około 10–30% odspojonego gruntu [7, 9]. W przypadku refulowania wydajność nominalna maleje wraz ze wzrostem długości rurociągu refulacyjnego. Spowodowane jest to ograniczeniami dobranego układu silnik – pompa pogłębiarska. Rys. 2 przedstawia przebieg charakterystyki wydajności nominalnej pogłębiarki frezująco-ssącej. Takie charakterystyki tworzy się dla kilku rodzajów gruntu, które będą urabiane przez daną pogłębiarkę (rys. 4). Zakłada się maksymalne głębokości pogłębiania i geometryczne wysokości tłoczenia. Przy tworzeniu tych charakterystyk przyjmuje się wartość zagęszczenia objętościowego mieszaniny (C_v) na poziomie od 15 do nawet 30%.



Rys. 2. Charakterystyka nominalna pogłębiarki frezująco-ssącej; Q – wydajność pogłębiarki, L – długość rurociągu refulacyjnego, a – maksymalna wydajność ograniczona możliwościami głowicy frezującej lub spulchniacza hydraulicznego, b – wydajność ograniczona maksymalnym momentem (lub mocą) silnika napędzającego pompę, c – wydajność ograniczona maksymalną prędkością obrotową pompy [3, 5, 7, 11]

Celem obliczenia wydajności odspajania gruntu przez głowicę frezującą wykorzystuje się zależność [7, 8, 9]:

$$Q_{GF} = \frac{N_{GF}^{sr}}{E_{UG}} \quad [m^3 / s] \quad (1)$$

gdzie:

$$N_{GF}^{sr} \text{ – moc średnia głowicy nożowej, najczęściej zakłada się: } \frac{N_{GF}^{max}}{N_{GF}^{sr}} = 1,1 \div 1,3 \text{ [9]}$$

E_{UG} – jednostkowa energia potrzebna do odspojenia gruntu, kJ/m³ lub kPa.

Wartość jednostkowej energii do odspojenia gruntu E_{UG} zależy od rodzaju gruntu i geometrii narzędzia służącego do jego odspojenia.

Jednostkową energię do odspojenia gruntu sypkiego można określić z zależności [7, 8, 9]:

$$E_{UG} = \rho_w \cdot g \cdot (z + 10) \cdot d_1 \text{ [kPa]} \quad (2)$$

gdzie:

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – przyspieszenie ziemskie,

z – głębokość pogłębiania,

ρ_w – gęstość wody,

d_1 – współczynnik odspajania gruntu.

Wartość współczynnika d_1 określić można z zależności [7, 8]:

$$d_1 = 0,304 + 0,333 \cdot e^{0,0597\varphi} \quad \text{dla } \alpha = 45^0 \quad (3)$$

$$d_1 = 0,894 + 0,154 \cdot e^{0,0818\varphi} \quad \text{dla } \alpha = 60^0 \quad (4)$$

gdzie:

α – kąt skrawania ostrza noża głowicy, najczęściej wynosi on 50 – 55^0 ,

φ – kąt tarcia wewnętrznego, dla piasku drobnego można przyjąć 30^0 , dla średniego 35^0 a dla żwiru 40^0 [3].

Dla założonej wydajności projektowej pogłębiarki $Q_{pogł}$ określamy wymaganą wydajność odspajania głowicy frezującej Q_{GF} (zwiększając wydajność pogłębiarki o 10–30% ze względu na rozmywanie gruntu). Następnie obliczamy moc napędu głowicy frezującej N_{GF} korzystając z zależności (1) odpowiednio ją przekształcając $(N)_{GF}^{sr} = Q_{GF} \cdot E_{UG}$. Wartość jednostkowej energii potrzebnej do odspojenia założonego gruntu E_{UG} określamy wykorzystując zależności (2), (3) i (4).

Drugim urządzeniem instalacji pogłębiarskiej biorącym udział w odspajaniu gruntu są dwie wciągarki manewrowe. Wydajność odspajania gruntu możemy zapisać:

$$Q_{GF} = s \cdot h \cdot v_{mot} \quad (5)$$

gdzie:

s – szerokość warstwy odspojonego gruntu;

h – wysokość warstwy odspojonego gruntu;

v_{mot} – prędkość motylkowania (bocznego poruszania się pogłębiarki)

Najczęściej nominalne wartości v_{mot} wynoszą 15–20 m/min [2]. Zaś moc jednej wciągarki manewrowej N_{WM} można przyjąć za [11]:

$$N_{WM} = \left(\frac{1}{5} \div \frac{1}{8}\right) \cdot N_{GF} \quad (6)$$

Największymi odbiornikami mocy w instalacji pogłębiarskiej są pompy gruntowe (pogłębiarskie). Ich moc określamy z zależności:

$$N_{PG} = \frac{\Delta p_C \cdot Q_{PG}}{\eta_{PG}^m} \quad (7)$$

gdzie: Δp_C – ciśnienie zapotrzebowane przez układ pompowy,

Q_{PG} – wydajność pompy,

η_{PG}^m – sprawność pompy przepompowującej mieszaninę gruntową.

Wydajność pompy gruntowej wynika z założeń projektowych związanych m.in. z przyjętą wartością gęstości mieszaniny gruntowej ρ_m bądź alternatywnie przyjętej wartości zagęszczenia objętościowego mieszaniny C_V .

Zagęszczenie objętościowe mieszaniny C_V oblicza się go ze wzoru [5, 6, 10]:

$$C_V = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_{zp} - \rho_w} \quad (8)$$

gdzie:

ρ_m - gęstość mieszaniny gruntowej,

ρ_w - gęstość wody,

ρ_{zp} - gęstość właściwa gruntu (można przyjąć 2,65 t/m³).

W celu określenia wydajności pompy (pomp) pogłębiarskiej można wykorzystać zależność [5, 10]:

$$Q_{PG} \cdot C_V = Q_{pogl} \cdot (1-n) \quad (9)$$

gdzie:

Q_{PG} - wydajność pompy pogłębiarskiej,

Q_{pogl} - wydajność pogłębiarki podana w m³ gruntu zalegającego na dnie/ godz.,

n - porowatość gruntu zalegającego na dnie.

Przekształcając zależność (9) otrzymujemy wzór na minimalną wydajność pompy pogłębiarskiej:

$$Q_{PG} = Q_{pogl} \cdot (1-n) / C_V$$

Porowatość gruntu zależy od jego rodzaju oraz od stopnia jego zagęszczenia [7, 8]. Najczęściej wartość porowatości gruntu jest na poziomie:

$$n = 0,33 - 0,45$$

Ciśnienie zapotrzebowane przez układ pompowy określamy z zależności [6]:

$$\Delta p_C = \Delta p_{st} + \Delta p_m + \Delta p_{p,r} + \Delta p_L \quad (10)$$

gdzie: Δp_{st} – wysokość statyczna instalacji,

Δp_m – straty miejscowe,

$\Delta p_{p,r}$ – straty ciśnienia w pochylonym rurociągu,

Δp_L – straty ciśnienia w rurociągu poziomym.

Składowe strat ciśnienia w instalacji pogłębiarskiej można wyznaczyć z zależności [5, 6]:

$$\Delta p_{st} = [\rho_m \cdot g \cdot (z+h)] - \rho_w \cdot g \cdot z \quad (11)$$

$$\Delta p_m = \xi \cdot \frac{v_m^2}{2} \cdot \rho_m \quad (12)$$

$$\Delta p_{p,r} = I_{m\omega} \cdot \rho_w \cdot g \cdot L_{p,r} \quad (13)$$

$$\Delta p_L = I_m \cdot \rho_w \cdot g \cdot L_R \quad (14)$$

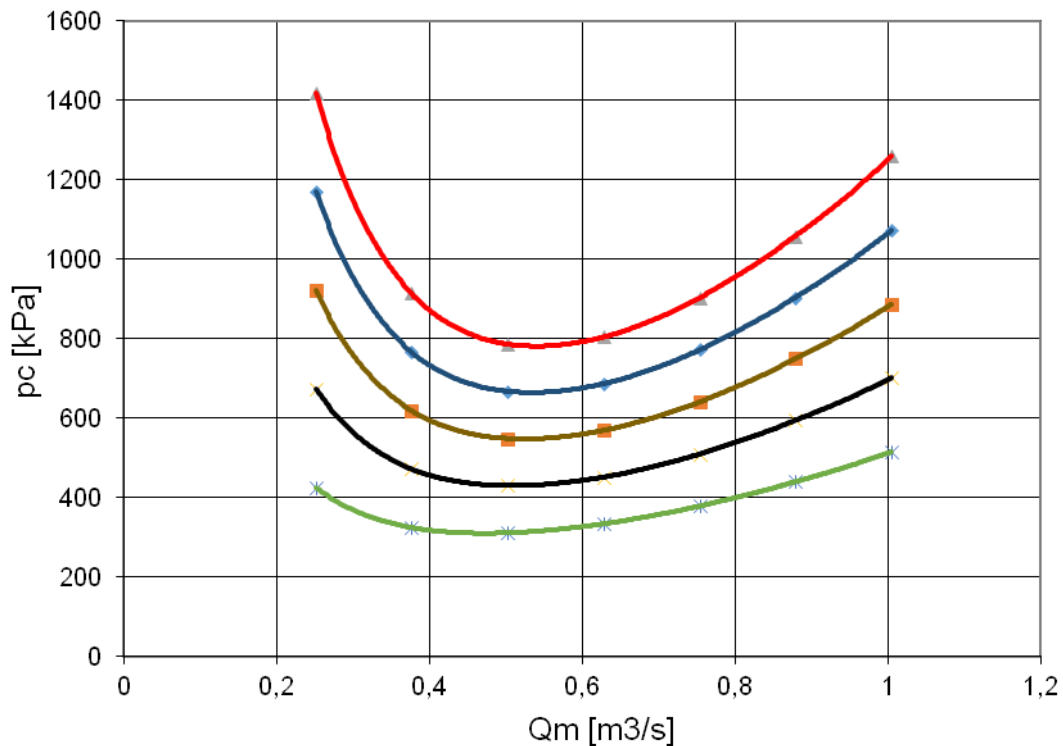
gdzie: z – głębokość pogłębiania,

h – wysokość tłoczenia,

ξ – sumaryczny współczynnik strat miejscowych w instalacji,

- v_m – prędkość przepływu mieszaniny gruntowej,
- ρ_m – gęstość mieszaniny gruntowej,
- $L_{p,r}$ – długość pochyłonego rurociągu (zewnątrznej rury ssącej),
- L_R – długość rurociągu refulacyjnego,
- I_m – gradient dla przepływu mieszaniny,
- $I_{m\omega}$ – gradient dla mieszaniny przepływającej w rurociągu pochyłym.

Szczegółowa procedura obliczeń zapotrzebowanego ciśnienia pompowej instalacji pogłębiarskiej przedstawiona jest w [5, 6]. Przykładowe obliczenia ciśnienia w instalacji pompowej przedstawiono na rys. 3. Rysunek ten dla przyjętych wartości z i h oraz C_V przedstawia charakterystyki rurociągów o różnych długościach. Charakterystyki przedstawione są w szerokim zakresie zmian wydajności (natężenia przepływu mieszaniny gruntowej). Charakterystyki te są podstawą do przyjęcia odpowiedniego układu pomp pogłębiarskich (określenia liczby i wielkości pomp).



Rys. 3. Charakterystyki rurociągów dla mieszaniny wody z żwirem ($C_V=0,15$) przy różnych długościach rurociągu: 500 m – kolor czerwony; 400 m – kolor niebieski; 300 m – kolor brązowy; 200 m – kolor czarny; 100 m – kolor zielony

Po określeniu parametrów i doborze pomp mamy jej charakterystykę sprawnościową dla przypadku pompowania wody. Sprawność pompy pogłębiarskiej pompującej mieszaninę gruntową η_{PG}^m określamy z wzoru [5, 6, 10]:

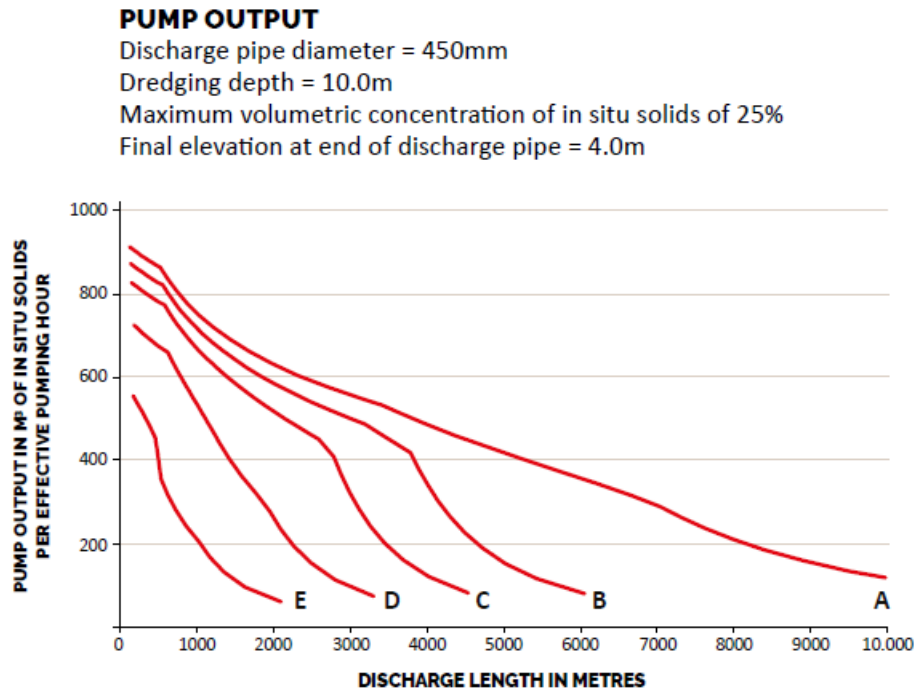
$$\eta_{PG}^m = \eta_{PG}^w \cdot \{1 - c_v [0,8 + 0,6 \cdot \log(d_{50})]\} \quad (15)$$

gdzie: η_{PG}^w – sprawność pompy pompującej wodę,

d_{50} – średnica ziaren gruntu.

Ostateczną katalogową charakterystykę wydajności projektowanej pogłębiarki otrzymujemy przyjmując przedział długości rurociągów refulacyjnych $L_R^{min} \div L_R^{max}$ i dla

przyjętych rodzajów gruntów, które mogą być urabiane przez pogłębiarkę, wykreślamy charakterystyki wydajności projektowych pogłębiarki (rys. 4).



Rys. 4. Katalogowe charakterystyki pogłębiarki IHC Beaver 45; A – piasek drobnoziarnisty ($d = 0,1$ mm, $\rho = 1900$ kg/m³), B – piasek średnioziarnisty ($d = 0,235$ mm, $\rho = 1950$ kg/m³), C – piasek gruboziarnisty ($d = 0,44$ mm, $\rho = 2000$ kg/m³), D – drobny żwir ($d = 1,3$ mm, $\rho = 2100$ kg/m³), E – żwir ($d = 7$ mm, $\rho = 2200$ kg/m³)

4. Analiza doboru podstawowych parametrów pogłębiarki – podsumowanie

W celu określenia, najkorzystniejszych pod względem ekonomicznym, parametrów charakteryzujących projektowaną (lub dobieraną) pogłębiarkę, proponuje się analizę kilku wariantów rozwiązań spełniających wymagania związane z wykonaniem konkretnej pracy pogłębiarskiej o danej kubaturze i czasie wykonania.

Najczęstszym kryterium powstawania wariantów rozwiązań dla pogłębiarek frezująco-ssących jest przyjęcia kilku rodzajów gruntów (tzw. gruntów „projektowych”) dla którego wykonuje się obliczenia projektowe. W praktyce projektowej Najczęściej gruntem „projektowym” jest piasek średnioziarnisty o średnicy ziaren $d = 0,235$ mm i gęstości objętościowej w miejscu zalegania na dnie $\rho = 1950$ kg/m³ [7, 11]. Obliczenia dla gruntu „projektowego” pozwalają dobrać urządzenia instalacji pogłębiarskiej. Dla dobranych urządzeń instalacji przeprowadza się dalsze obliczenia celem określenia katalogowych charakterystyk wydajności pogłębiarki (rys. 4). Przyjmując kilka rodzajów gruntu „projektowego” możemy uzyskać materiał do analizy, który z nich byłby najistotniejszy w danym projekcie [9, 11].

Drugim kryterium wariantowania rozwiązań mogłoby być przyjmowanie różnych rozwiązań układu pompowego pogłębiarki. Chodzi tu o liczbę i wielkość pomp pogłębiarskich. Szczególnie istotne jest to dla pogłębiarek które podczas eksploatacji mają refulować urobek na znaczne odległości (nawet powyżej 10 km). W tym przypadku analizuje się który z wariantów będzie najekonomiczniejszy dla przyjętego rozkładu czasu pracy pogłębiarki z założonymi długościami rurociągów [4].

Przeprowadzone analizy pozwolą na określenie podstawowych parametrów pogłębiarki i jej instalacji pogłębiarskiej (i dobór urządzeń). Określone na jej podstawie podstawowe parametry projektowe pogłębiarki umożliwiają dalsze etapy projektowania. M.in. dobór układu napędowo-energetycznego pogłębiarki, którego proces projektowania przedstawiony został w [1, 4].

W przypadku dużych i bardzo dużych pogłębiarek frezująco-ssących (tab. 1) ważnym zagadnieniem jest projekt układu napędu własnego pogłębiarki. Pogłębiarki tego typu wykorzystują go tylko podczas przelotu, stąd powszechnie stosowane jest rozwiązanie, w którym wykorzystuje się zainstalowaną moc silników spalinowych dobranych w celu pokrywania mocy przez urządzenia instalacji pogłębiarskiej (podczas przelotów nie pracujących). Najczęściej spotykane są dwa rozwiązania: układ spalinowo-elektryczny, w którym zespoły prądotwórcze pokrywają zapotrzebowanie energii do napędu odbiorników instalacji pogłębiarskiej i głównego układu napędowego, oraz układ spalinowo-mechaniczny napędu pomp pogłębiarskich i śrub napędowych. W obu przypadkach układ napędowy pogłębiarki zawsze będzie układem dwuśrubowym. Wynika to z obecności w kadłubie pogłębiarki dwóch szybów. W jednym zainstalowana jest drabina z wysięgnikiem smoka w drugim wózek z głównym szczydem manewrowym [4].

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. Matousek V.: *Hydraulic transport as one of the dredging processes*. Lecture notes wb3414. TUDelft 2001
6. Matousek V.: *Dredge pumps and slurry transport*. Lecture notes OE4625. TUDelft 2004
7. Miedema S. A.: *Production Estimation Based on Cutting Theories for Cutting Water Saturated Sand*. Proc. WODCON IV, November 1995, Amsterdam, The Netherlands 1995.
8. 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
9. 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.
10. Vlasblom W. J.: *Dredge pumps*. Lecture notes Wb3414, TUDelft 2004
11. Vlasblom W. J.: *Designing dredging equipment – trailing suction hopper dredgers*. Lecture notes Wb3408, TUDelft 2003-05