

Marek Kalenik

Badania modelowe strumienia objętości piasku i wody w podnośniku powietrznym

Podnośnik powietrzny nie ma części ruchomych i jest wykorzystywany do podnoszenia cieczy lub mieszaniny cieczy i ciał stałych. Urządzenie to zbudowane jest z pionowej rury częściowo zanurzonej w cieczy, do której w dolnej części wprowadzane jest powietrze pod ciśnieniem. Podczas wprowadzania powietrza we wnętrzu pionowej rury tworzy się mieszanina dwufazowa (ciecz–powietrze) lub trójfazowa (ciecz–ciało stałe–powietrze) o gęstości mniejszej niż gęstość cieczy. Ponieważ mieszanina we wnętrzu pionowej rury staje się lżejsza niż otaczająca ją ciecz, dlatego jest wypychana przez powietrze ku górze.

Podnośniki tego typu znalazły w Polsce różnorakie zastosowanie, między innymi do transportu wody i ścieków w wodociągach i kanalizacji oraz osadów w oczyszczalniach ścieków [1], a także do podnoszenia złoża w filtrach pospiesznych [2] oraz podczas renowacji studni wierconych [3]. W innych krajach podnośniki powietrzne są ponadto wykorzystywane do napowietrzania i mieszania wody, usuwania dwutlenku węgla z wody w przemysłowej hodowli ryb [4], a także do mieszania wody w głębokich jeziorach oraz jej napowietrzania [5]. Nieskomplikowana budowa i duża niezawodność tych urządzeń powoduje, że są one stosowane także w przemyśle – do wydobycia ropy naftowej z martwych studni [6], do transportu cieczy agresywnych i toksycznych [7, 8] oraz płynów wrzących, w których zachodzi zamiana fazy ciekłej w gazową [9]. Są one również wykorzystywane w górnictwie do transportu zawieszin i podnoszenia konkrecji manganowych z dna morskiego [10].

W podnośnikach powietrznych występuje przepływ dwu- (ciecz–gaz) lub trójfazowy (ciecz–gaz–ciało stałe), który jest bardzo trudny do modelowania matematycznego [10–16]. Wielu badaczy podejmuje próby opisu struktur przepływu w układach ciecz–gaz lub ciecz–gaz–ciało stałe, mające na celu opracowanie tak zwanych map struktur przepływu oraz modeli matematycznych do symulacji przepływów wielofazowych [5–13, 17–25]. W pracy [17] badano hydrauliczne warunki pracy podnośnika powietrznego, który zbudowany był z przezroczystej pionowej rury o długości 3,75 m i średnicy wewnętrznej 25,4 mm oraz mieszacza z 56 otworami o średnicy 3 mm. Otwory w mieszaczu rozmieszczone były równomiernie na obwodzie pionowej rury w siedmiu rzędach i ośmiu kolumnach. Mieszacz był zamontowany w odległości 20 cm do dolnego końca przezroczystej pionowej rury. Badania wykonano

przyjmując wartości współczynnika zanurzenia pionowej rury (h/L) wynoszące od 0,2 do 0,75 (0,1) i wartości ciśnienia powietrza (p_p) z przedziału od $1,0 \cdot 10^4$ Pa do $2,7 \cdot 10^5$ Pa. W pierwszym etapie badano, jak zmienia się wartość strumienia objętości wody (Q_w) w podnośniku oraz jego sprawność (η) w zależności od wartości współczynnika h/L i ciśnienia powietrza (p_p) oraz jakie występują struktury przepływów dwufazowych. W drugim etapie badań zmodyfikowano model Stenninga i Martina oraz opracowano program komputerowy do symulacji wartości parametru Q_w w badanym podnośniku. Trzeci etap obejmował badania symulacyjne przeprowadzone za pomocą opracowanego programu komputerowego i porównanie uzyskanych wyników badań symulacyjnych z badaniami eksperymentalnymi. Przeprowadzone badania pokazały, że opracowany program komputerowy oparty na zmodyfikowanym modelu Stenninga i Martina może być z powodzeniem stosowany do prognozowania wartości strumienia objętości wody (Q_w) w podnośniku powietrznym z zastosowanym przez autorów mieszaczem. Jednakże program ten nie jest ogólnie dostępny, dlatego nie można go wykorzystywać do projektowania podnośników powietrznych.

Autorzy pracy [18] badali hydrauliczne warunki pracy podnośników powietrznych zbudowanych z przezroczystych pionowych rur o średnicy wewnętrznej równej 8 mm, 11 mm i 18 mm oraz mieszaczy z jednopunktowym wprowadzaniem powietrza przez dolne końce tych rur. Zakres badań obejmował trzy wartości współczynnika zanurzenia (h/L) równe 0,8, 0,9 i 1,0. W pierwszym etapie, wykorzystując opublikowane przez innych autorów wyniki badań hydraulicznych warunków pracy urządzeń, zaproponowali model teoretyczny do obliczania wydajności powietrznych podnośników cieczy. W drugim etapie wykonali badania eksperymentalne strumienia objętości wody (Q_w) w podnośniku w zależności od strumienia objętości powietrza (Q_p) i rozpoznali struktury przepływów dwufazowych, jakie występują w pionowych rurach przy zadawanych wartościach Q_p . Uzyskane wyniki pomiarów wartości parametru Q_w porównano następnie z wynikami obliczeń wykonanych za pomocą opracowanego modelu teoretycznego. W zakresie badanych średnic i współczynników zanurzenia pionowych rur, model teoretyczny nie dał dobrej zgodności parametru Q_w z wynikami doświadczalnymi. Uzyskane wyniki pomiarów pokazały, że wartość parametru Q_w zależała od średnicy pionowej rury, natomiast wyniki uzyskane z modelu teoretycznego pokazały, że średnica pionowej rury w powietrznym podnośniku nie miała wpływu na wartość Q_w . W związku z tym zaproponowany przez autorów model teoretyczny do obliczania Q_w w podnośniku

powietrzny należy poprawić, żeby uwzględnił wpływ średnicy pionowej rury. Jednocześnie wykazano, że średnica pionowej rury i współczynnik jej zanurzenia w powietrznym podnośniku nie miał wpływu na rodzaje występujących struktur przepływów dwufazowych mieszaniny wody i powietrza. Rodzaje struktur przepływów dwufazowych w powietrznych podnośnikach zależą przede wszystkim od wartości strumienia objętości powietrza, przy czym wraz z jego wzrostem zmieniają się struktury przepływów dwufazowych w podnośnikach. Zależności te potwierdzili również inni badacze w pracach [6, 11], stwierdzając występowanie przepływów pęcherzykowego, korkowego, kipiącego i pierścieniowego.

Autorzy pracy [9] badali wpływ mieszaczy na wydajność podnośnika powietrznego zbudowanego ze stalowej pionowej rury o długości 200 cm i średnicy wewnętrznej 25,4 mm i dziewięciu typów mieszaczy z nawierconymi otworami do wtryskiwania powietrza (1, 2, 3, 4, 6, 15, 25, 34 i 48) oraz czterech wartości współczynnika zanurzenia pionowej rury (h/L) równych 0,5, 0,6, 0,7 i 0,75. Wyniki badań wykazały, że rodzaj mieszacza i zanurzenie pionowej rury miały znaczący wpływ na wydajność i sprawność podnośnika. Największą wydajność, prawie przy wszystkich wartościach współczynnika h/L , badany podnośnik uzyskał z mieszaczem, w którym nawiercono trzy otwory do włączania powietrza. Ponadto stwierdzono, że mieszacz z trzema otworami przy wszystkich wartościach współczynnika h/L zapewniał największą prędkość przepływu wody.

W pracy [26] badano wpływ wartości współczynnika zanurzenia pionowej rury na prędkość przepływu wody i sprawność pracy podnośnika zbudowanego z przezroczystej rury o długości 3,1 m i średnicy wewnętrznej 33 mm. Zakres badań obejmował dziesięć wartości współczynnika h/L wynoszących 0,26, 0,40, 0,52, 0,58, 0,65, 0,71, 0,78, 0,84, 0,90 i 0,94. Wykazano, że wraz ze wzrostem wartości współczynnika h/L zwiększała się prędkość przepływu wody w podnośniku. Również wraz ze wzrostem wartości tego współczynnika do $h/L=0,75$ wzrastała jego sprawność, natomiast przy większej wartości jego sprawność znacząco malała. Z kolei maksymalne wartości sprawności podnośnika powietrznego nie odpowiadały maksymalnej prędkości przepływu wody. Autorzy określili optymalny zakres wartości współczynnika h/L , który wyniósł od 0,40 do 0,75.

Autorzy pracy [6] techniką wizualną badali występujące struktury przepływów dwufazowych w podnośniku powietrznym zbudowanym z pionowej przezroczystej rury o długości 6 m i średnicy wewnętrznej 50 mm. Podczas badań powietrze do pionowej rury było wtryskiwane za pomocą mieszacza z 108 otworami o średnicy 0,5 mm. Zakres badań obejmował siedem wartości współczynnika zanurzenia pionowej rury (h/L) równych 0,25, 0,34, 0,42, 0,50, 0,58, 0,67 i 0,75. Autorzy rozpoznali i opisali cztery rodzaje struktur przepływów dwufazowych, jakie występowały w badanym powietrznym podnośniku. Wykazano, że rodzaje struktur przepływów dwufazowych w powietrznym podnośniku zmieniały się w zależności od wartości strumienia objętości powietrza. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem jego wartości najpierw występował przepływ pęcherzykowy, później korkowy, po nim kipiący, a na końcu pierścieniowy. Jednakże przy małych wartościach współczynnika h/L przepływ pęcherzykowy nie był w stanie podnieść wody do góry ze względu na małą siłę wyporu pojedynczych pęcherzyków. Jedynie przy dużych wartościach współczynnika h/L przepływ pęcherzykowy podnosił wodę

do góry, podczas gdy pozostałe rodzaje struktur przepływu podnosiły wodę do góry w całym zakresie badanych wartości współczynnika h/L . Autorzy pracy wywnioskowali, że w przypadku powietrznego podnośnika cieczy najbardziej odpowiedni był przepływ korkowy.

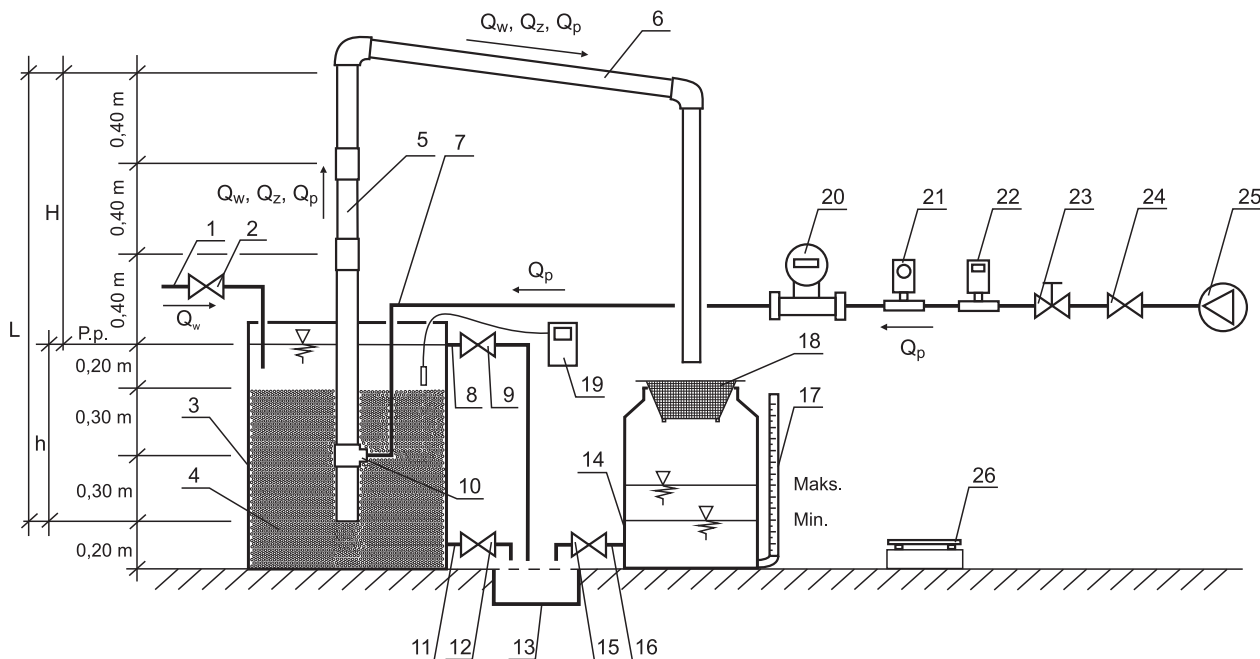
Prowadzone były również badania podnośników powietrznych wykonanych z rur prostokątnych [27] i zakrzywionych [28], które wykazały, że w tak skonstruowanych podnośnikach znacznie maleje wydajność pompowania ciał stałych, natomiast gdy pompowana jest tylko ciecz, wówczas zakrzywienie rury podnośnika nie miało wpływu na jego wydajność [20]. Z wielu badań wynika, że powietrzne podnośniki charakteryzują się małą sprawnością działania w porównaniu do konwencjonalnych pomp [8, 10, 11, 17, 26].

W literaturze naukowo-technicznej brakuje informacji, jak należy obliczać wartość strumienia objętości piasku (Q_z) i wody (Q_w) w podnośniku powietrznym, który jest stosowany do podnoszenia złoża filtracyjnego (piasku) w filtrze pospiesznym ze złożem samoregenerującym [29, 30] – w tego typu podnośnikach występuje przepływ trójfazowy (woda–piasek–powietrze). Brakuje również informacji, jakiej konstrukcji powinien być mieszacz, aby można było uzyskać jak najlepsze parametry pracy podnośnika powietrznego. Z dotychczas przeprowadzonych badań wynika, że typ mieszacza i średnica rurociągu tłoczego zastosowanego w powietrznym podnośniku cieczy ma wpływ na jego wydajność i hydrauliczne warunki pracy [5, 9, 11, 12]. Liczba, średnica i sposób rozmieszczenia otworów w mieszaczu ma bardzo duży wpływ na rodzaje struktur przepływów dwufazowych cieczy i gazu w podnośniku powietrznym.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę wyników badań wydajności podnośnika powietrznego, którym transportowane są piasek i woda. Zakres badań obejmował wyprowadzenie wzorów do obliczania wartości strumienia objętości piasku (Q_z) i wody (Q_w) w podnośniku powietrznym zbudowanym z tworzywa sztucznego o średnicy wewnętrznej rurociągu tłoczego $d=0,04$ m, przy założonej wysokości podnoszenia mieszaniny piasku i wody (H) równej 0,40 m, 0,80 m oraz 1,20 m.

Stanowisko pomiarowe

Na rysunku 1 przedstawiono budowę i zasadę działania stanowiska badawczego do badania hydraulicznych warunków pracy podnośnika powietrznego. Wodę do zbiornika (3), wypełnionego piaskiem (4), doprowadzano rurociągiem (1) po otwarciu zaworu kulowego (2). W trakcie pomiarów zbiornik (3) był stale wypełniony wodą do wysokości 1 m. Nadmiar wody dopływającej do zbiornika (3) był odprowadzany przelewem (8), po otwarciu zaworu kulowego (9), do kanalizacji przez wpust podłogowy (13). Do opróżniania zbiornika (3) z wody, po otwarciu zaworu kulowego (15), służył rurociąg spustowy (16). Wewnątrz zbiornika (3), na wysokości 0,20 m nad jego dnem, zamontowano rurociąg tłoczny (5) z tworzywa sztucznego o średnicy wewnętrznej 0,04 m. Pomiar wydajności powietrznego podnośnika wykonywano przy trzech wysokościach podnoszenia mieszaniny wody i piasku (H) równych 0,40 m, 0,80 m i 1,20 m, mierząc od poziomu zwierciadła wody w zbiorniku (3). W rurociągu tłoczonym (5), na wysokości 0,30 m nad jego dolną krawędzią, zamontowano mieszacz (10). Do pomiaru temperatury wody w zbiorniku (3) zastosowano termometr elektroniczny (19).



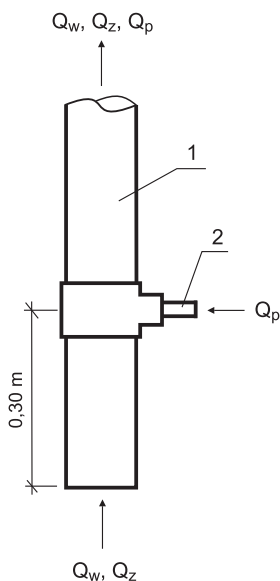
Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego do badania podnośnika powietrznego (1 – rurociąg doprowadzający wodę, 2, 9, 12, 15, 24 – odcinające zawory kulowe, 3 – zbiornik z wodą i piaskiem, 4 – piasek, 5 – rurociąg tłoczny, 6 – rurociąg odprowadzający wodę, piasek i powietrze, 7 – rurociąg doprowadzający powietrze, 8 – przelew, 10 – mieszacz, 11, 16 – rurociągi spustowe, 13 – wpust podłogowy, 14 – zbiornik pomiarowy, 17 – wodowskaz ze skalą, 18 – koszyk, 19, 22 – elektroniczne termometry, 20 – elektroniczny przepływomierz powietrza, 21 – elektroniczny manometr, 23 – zawór grzybkowy, 25 – sprężarka, 26 – waga, h – długość zanurzenia rurociągu tłoczego, L – długość rurociągu tłoczego do wylotu, H – wysokość podnoszenia mieszaniny piasku i wody)
 Fig. 1. Schematic diagram of the air lift pump testing stand (1 – water supplying pipe, 2, 9, 12, 15, 24 – ball cut-off valves, 3 – tank with water and sand, 4 – sand, 5 – delivery pipe, 6 – water, sand and air channeling pipe, 7 – air supplying pipe, 8 – overfall, 10 – air injector, 11, 16 – draining pipes, 13 – floor inlet, 14 – measuring container, 17 – scaled water level gauge, 18 – basket, 19, 22 – electronic thermometers, 20 – electronic air flow meter, 21 – electronic manometer, 23 – poppet valve, 25 – compressor, 26 – scales, h – delivery pipe submergence length, L – delivery pipe length-to-outlet, H – water-sand mix delivery head)

Na rysunku 2 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne badanego mieszacza w postaci stalowej, zewnętrznie gwintowanej, końcówki (2) o średnicy wewnętrznej 0,01 m, na którą nałożony był elastyczny rurociąg o średnicy wewnętrznej 0,013 m (7) (rys. 1), doprowadzający powietrze ze sprężarki (25) do mieszacza (10). Na rurociągu doprowadzającym powietrze (7) zamontowano elektroniczny

przepływomierz powietrza (20), elektroniczny manometr (21), elektroniczny termometr do pomiaru temperatury powietrza (22) oraz zawór grzybkowy (23) i odcinający zawór kulowy (24).

W badaniach wykorzystano urządzenia pomiarowe firmy Endress+Hauser. Zakres pomiarowy elektronicznego przepływomierza powietrza (20) wynosił od zera do 30,0 m³/h, a elektronicznego manometru (20) od zera do 400 kPa. Podczas badań mierzono temperaturę wody i powietrza, ciśnienie powietrza oraz ciśnienie barometryczne, a także strumień objętości powietrza, objętość wody i czas pracy podnośnika powietrznego oraz z użyciem wagi (26) ważono piasek. Do regulacji ciśnienia powietrza wykorzystywano zawór grzybkowy (23).

Do pomiaru strumienia objętości wody (Q_w) w podnośniku zastosowano metodę naczynia pomiarowego, czyli zbiornik pomiarowy (14), który został wyskalowany, co 1 dm³. Podziałkę pojemności zbiornika pomiarowego (14) naniesiono na przezroczysty wodowskaz (17), który zamontowano z boku zbiornika pomiarowego. Takie rozwiązanie pozwalało bardzo dokładnie odczytywać objętość tłoczonych wody przez powietrzny podnośnik w jednostce czasu. Tłoczona mieszanina piasku i wody przez podnośnik powietrzny, przy danej wysokości podnoszenia (H), sphywała rurociągiem odprowadzającym (6) o średnicy wewnętrznej 0,04 m do koszyka (18) umieszczonego na wlocie do zbiornika pomiarowego (14). Podczas wykonywania pomiarów w koszyku (18) gromadził się piasek, a woda z koszyka sphywała do zbiornika pomiarowego (14). Zatrzymany w koszyku mokry piasek był ważony. W badaniach zastosowano piasek o uziarnieniu 0,8÷2,0 mm, którego gęstość w stanie mokrym wynosiła $\rho_z = 1632 \text{ kg/m}^3$.



Rys. 2. Schemat konstrukcyjny mieszacza (1 – rurociąg tłoczny, 2 – stalowa końcówka do podłączenia rurociągu doprowadzającego powietrze)
 Fig. 2. Construction scheme of the air injector (1 – delivery pipe, 2 – steel tip to connect an air supplying pipe)

Sposób wyprowadzenia równania strukturalnego

Biorąc pod uwagę różne rodzaje struktur przepływu strumienia mieszanki cieczy i powietrza oraz bardzo dynamiczną i zmienną w czasie pracę podnośnika powietrznego [6, 9–12, 17, 18] należy stwierdzić, że bardzo trudno jest opracować klasyczny model matematyczny do wyprowadzenia wzorów na obliczanie strumienia piasku i wody w podnośniku. W związku z tym do wyznaczenia właściwych wzorów zastosowano analizę wymiarową [31–33]. Na podstawie przeglądu literatury i wyników pomiarów na stanowisku badawczym przyjęto założenie, że wydajność podnośnika powietrznego zależy od takich zmiennych wymiarowych, jak:

- H – wysokość podnoszenia mieszanki piasku i wody, m
- Q_z – strumień objętości piasku, m^3/s
- Q_w – strumień objętości wody, m^3/s
- k – współczynnik chropowatości bezwzględnej, m
- p_b – ciśnienie barometryczne, $kg/(m \cdot s^2)$
- p_p – ciśnienie powietrza, $kg/(m \cdot s^2)$
- d – średnica wewnętrzna rurociągu tłocznego, m
- Q_p – strumień objętości powietrza, m^3/s
- ρ_w – gęstość wody, kg/m^3
- ρ_p – gęstość powietrza, kg/m^3
- ρ_z – gęstości mokrego piasku, kg/m^3
- μ_w – współczynnik lepkości dynamicznej wody, $kg/(m \cdot s)$
- μ_p – współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, $kg/(m \cdot s)$
- g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2

W rozważaniach tych uwzględniono również współczynnik chropowatości bezwzględnej (k), który w przypadku rur z tworzywa sztucznego wynosi 0,02 mm. W warunkach technicznych rurociągi tłoczne podnośników powietrznych są stosowane bez izolacji cieplnej, w związku z czym temperatura cieczy (woda), gazu (powietrze) i ciał stałych (piasek) jest zbliżona do temperatury otoczenia. Można przyjąć, że temperatura cieczy, gazu i ciał stałych jest jednakowa wzdłuż rurociągu tłocznego, a przepływ strumieni cieczy, gazu i ciał stałych jest izotermiczny, zatem $p/\rho_w = \text{const}$, $p/\rho_p = \text{const}$ i $p/\rho_z = \text{const}$. Wraz ze wzrostem wysokości podnoszenia mieszanki piasku i wody (H) maleją wartości strumienia piasku (Q_z) i strumienia wody (Q_w). Biorąc pod uwagę te założenia, można zapisać równanie wymiarowe opisujące rozważane zjawisko w postaci:

$$f\left(\frac{Q_z}{H}, \frac{Q_w}{Hk}, p_b, \frac{p_p}{\rho_w}, \frac{p_p}{\rho_p}, \frac{p_p}{\rho_z}, \mu_w, \mu_p, d, Q_p, g\right) = 0 \quad (1)$$

W równaniu tym występuje $n=11$ wielkości, których wymiary zawierają $i=3$ jednostki podstawowe – m, kg oraz s. Zgodnie z twierdzeniem II Buckinghama, równanie to można przekształcić do związku $n-i=8$ wzajemnie niezależnych bezwymiarowych parametrów π . Wybrano trzy wielkości – μ_p , d oraz Q_p , które zawierają podane jednostki podstawowe i następnie sprawdzono ich wymiarową niezależność:

$$[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]^{a_1} \cdot [m]^{a_2} \cdot [m^3 \cdot s^{-1}]^{a_3} = b \quad (2)$$

$$kg^{a_1} \cdot m^{-a_1} \cdot s^{-a_1} \cdot m^{a_2} \cdot m^{3a_3} \cdot s^{-a_3} = b \quad (3)$$

$$m^{-a_1+a_2+3a_3} \cdot kg^{a_1} \cdot s^{-a_1-a_3} = [m]^0 \cdot [kg]^0 \cdot [s]^0 \quad (4)$$

$$-a_1 + a_2 + 3a_3 = 0 \rightarrow a_2 = 0 \quad (5)$$

$$a_1 = 0 \quad (6)$$

$$-a_1 - a_3 = 0 \rightarrow a_3 = 0 \quad (7)$$

stąd $a_1 = a_2 = a_3 = 0$ oraz $b = 1$, czyli są wymiarowo niezależne.

Łącząc kolejno pozostałe osiem wielkości wymiarowych z iloczynem potęg wybranych wielkości wymiarowo niezależnych, wyznaczono postaci bezwymiarowych parametrów $\pi_1 - \pi_8$:

$$\pi_1 = (Q_z/H) \mu_p^{a_1} d^{a_2} Q_p^{a_3} \quad (8)$$

$$\pi_2 = (Q_w/Hk) \mu_p^{b_1} d^{b_2} Q_p^{b_3} \quad (9)$$

$$\pi_3 = p_b \mu_p^{c_1} d^{c_2} Q_p^{c_3} \quad (10)$$

$$\pi_4 = (p_p/\rho_w) \mu_p^{d_1} d^{d_2} Q_p^{d_3} \quad (11)$$

$$\pi_5 = (p_p/\rho_p) \mu_p^{e_1} d^{e_2} Q_p^{e_3} \quad (12)$$

$$\pi_6 = (p_p/\rho_z) \mu_p^{f_1} d^{f_2} Q_p^{f_3} \quad (13)$$

$$\pi_7 = \mu_w \mu_p^{g_1} d^{g_2} Q_p^{g_3} \quad (14)$$

$$\pi_8 = g \mu_p^{h_1} d^{h_2} Q_p^{h_3} \quad (15)$$

Podstawiając wymiary poszczególnych wielkości i porównując wykładniki potęg przy jednostkach podstawowych obu stron kolejnych równań (analogicznie jak przy sprawdzaniu niezależności wymiarowej wielkości), wyznaczono ich wartości:

$$\pi_1 = (Q_z d)/(H Q_p) \quad (16)$$

$$\pi_2 = (Q_w d^2)/(Hk Q_p) \quad (17)$$

$$\pi_3 = (p_b d^3)/(\mu_p Q_p) \quad (18)$$

$$\pi_4 = (p_b d^4)/(\rho_w Q_p^2) \quad (19)$$

$$\pi_5 = (p_b d^4)/(\rho_p Q_p^2) \quad (20)$$

$$\pi_6 = (p_b d^4)/(\rho_z Q_p^2) \quad (21)$$

$$\pi_7 = \mu_w/\mu_p \quad (22)$$

$$\pi_8 = g d^5/Q_p^2 \quad (23)$$

Zgodnie z twierdzeniem II Buckinghama, równanie wymiarowe (1) można zapisać w postaci bezwymiarowej zależności parametrów $\pi_1 - \pi_8$:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8) = 0 \quad (24)$$

stąd w przypadku strumienia objętości piasku:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8) \quad (25)$$

a w przypadku strumienia objętości wody:

$$\pi_2 = f(\pi_1, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8) \quad (26)$$

Podstawiając za $\pi_1 - \pi_8$ wyrażenia opisane zależnościami (16)–(23), po uporządkowaniu otrzymuje się równanie strukturalne, które w przypadku strumienia objętości piasku ma postać:

$$Q_z = f\left(\frac{Q_w d^2}{Hk Q_p}, \frac{p_b d^3}{\mu_p Q_p}, \frac{p_p d^4}{\rho_w Q_p^2}, \frac{p_p d^4}{\rho_p Q_p^2}, \frac{p_p d^4}{\rho_z Q_p^2}, \frac{\mu_w}{\mu_p}, \frac{g d^5}{Q_p^2}\right) \frac{H Q_p}{d} \quad (27)$$

natomiast w przypadku strumienia objętości wody ma następującą postać

$$Q_w = f\left(\frac{Q_z d}{H Q_p}, \frac{p_b d^3}{\mu_p Q_p}, \frac{p_p d^4}{\rho_w Q_p^2}, \frac{p_p d^4}{\rho_p Q_p^2}, \frac{p_p d^4}{\rho_z Q_p^2}, \frac{\mu_w}{\mu_p}, \frac{g d^5}{Q_p^2}\right) \frac{Hk Q_p}{d^2} \quad (28)$$

Po wyprowadzeniu równań strukturalnych przeprowadzono eksperymenty doświadczalne mające na celu wyznaczenie wartości poszczególnych współczynników liczbowych tych równań.

Metody badania podnośnika powietrznego

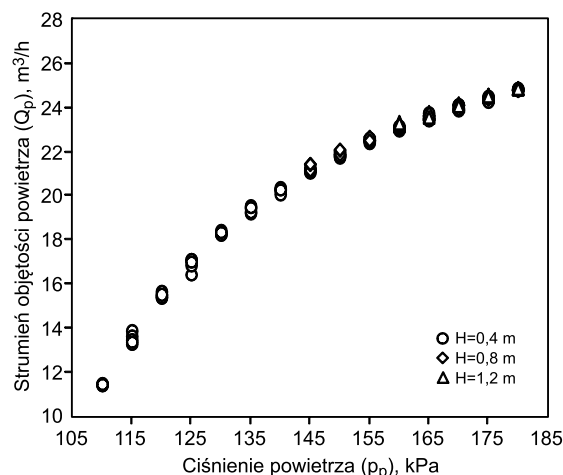
Przed rozpoczęciem każdej serii pomiarowej na stanowisku badawczym (rys. 1) mierzono za pomocą elektronicznego manometru (21) wartości ciśnienia barometrycznego (p_b). Następnie na podziałce wodowskazu (17), połączonego ze zbiornikiem pomiarowym (14), zaznaczano przedział minimalnej wysokości zwierciadła wody w zbiorniku pomiarowym (14), przy którym będzie włączany stoper i maksymalną wysokość zwierciadła wody w zbiorniku pomiarowym (14), przy której stoper będzie wyłączany. Zaznaczony przedział na podziałce wodowskazu (17) odpowiadał określonej objętości wody (V_w).

Pomiar wartości strumienia objętości piasku (Q_z) i wody (Q_w) rozpoczynano od otwarcia zaworów (2) i (9), napełnienia zbiornika (3) z piaskiem (4) wodą, włączenia sprężarki (25) i otwarcia zaworu (24) na rurociągu doprowadzającym powietrze (7) do mieszacza (10). Następnie ustawiano na elektronicznym manometrze (21) żadaną wartość ciśnienia powietrza (p_p) za pomocą zaworu grzybkowego (23). Po ustawieniu określonego ciśnienia powietrza pewna ilość piasku i wody, w zależności od wydajności podnośnika, wypływała ze zbiornika (3). Aby pomiar był miarodajny, poziom wody w zbiorniku (3) musiał być stały. Zmiana stopnia zanurzenia mieszacza (10) lub zmiana poziomu wody w zbiorniku (3) powodowała znaczne zmiany wydajności podnośnika. Stały poziom wody w zbiorniku (3) utrzymywano za pomocą zaworu (2), znajdującego się na rurociągu doprowadzającym wodę (1) do zbiornika (3). Każdorazowo zawór (2) ustawiano w położeniu, które równoważyło wypływ wody z rurociągu odprowadzającego (6) przy danej wartości ciśnienia powietrza. Obserwację i regulację wysokości wody w zbiorniku (3) wykonywano względem poziomu przelewu (8), przez który odpływał nadmiar wody. Po wykonaniu tych czynności i ustabilizowaniu się warunków pracy podnośnika powietrznego rozpoczynano pomiar. Najpierw, przy zadanej wartości ciśnienia powietrza, z elektronicznego przepływomierza powietrza (20) odczytywano wartość strumienia objętości powietrza (Q_p), a z elektronicznych termometrów temperaturę powietrza (22) i temperaturę wody (19). Kiedy w zbiorniku pomiarowym (14) na podziałce wodowskazu (17) zwierciadło wody osiągnęło zaznaczony poziom minimalny, to pod rurociąg odprowadzający piasek i wodę (6) na wlocie do zbiornika pomiarowego (14) umieszczany był koszyk (18) i włączany stoper, który mierzył czas (t) napełnienia zbiornika pomiarowego (14) do momentu, gdy zwierciadło wody na podziałce wodowskazu (17) osiągnęło zaznaczony poziom maksymalny. Wówczas stoper wyłączano i zakręcano zawór grzybkowy (23), który odcinał dopływ powietrza do mieszacza (10). Podczas wykonywanych badań w koszyku (18) gromadził się piasek, a woda z koszyka spływała do zbiornika pomiarowego (14). Po odczytaniu czasu napełnienia wodą zbiornika pomiarowego (14), wazono (26) zgromadzony piasek w koszyku (18). Po zważeniu piasek z koszyka (18) był z powrotem wrzucany do zbiornika (3). Następnie zbiornik pomiarowy (14) opróżniano i ustawiano na elektronicznym manometrze (21) kolejną wartość ciśnienia powietrza i rozpoczynano kolejny pomiar. Pomiar wykonywano przy zadanym ciśnieniu powietrza (p_p) od 110 kPa do 180 kPa (co 5 kPa). Wartość strumienia objętości wody (Q_w) obliczano dzieląc objętość wody (V_w) znajdującej się w zbiorniku pomiarowym (14) przez czas jego napełnienia (t), a wartość strumienia objętości piasku (Q_z) obliczano dzieląc ciężar zgromadzonego

piasku (C_z) w koszyku (18) przez czas jego napełnienia (t) i gęstość mokrego piasku (ρ_z). W trakcie badań wykonano po pięć serii pomiarowych przy zadanej wartości ciśnienia powietrza (p_p) oraz wszystkich trzech wysokościach podnoszenia mieszaniny piasku i wody (H), to jest 0,40 m, 0,80 m i 1,20 m, mierzonych względem położenia zwierciadła wody w zbiorniku (3).

Dyskusja wyników badań

Na rysunku 3 przedstawiono rozkład wartości strumienia objętości powietrza (Q_p) w podnośniku powietrznym w zależności od ciśnienia powietrza (p_p) i wysokości podnoszenia mieszaniny piasku i wody (H). Analizując uzyskane wyniki pomiarów można stwierdzić, że wartość strumienia objętości powietrza w podnośniku zwiększała się wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza, natomiast wzrost wysokości podnoszenia mieszaniny piasku i wody, przy stałym zanurzeniu mieszacza i danych wartościach ciśnienia powietrza, miał bardzo mały wpływ na spadek wartości strumienia objętości powietrza (Q_p). Niezależnie od wysokości podnoszenia mieszaniny piasku i wody (H), wartości Q_p , przy danym ciśnieniu, były porównywalne, co wynikało z dużej ilości powietrza.

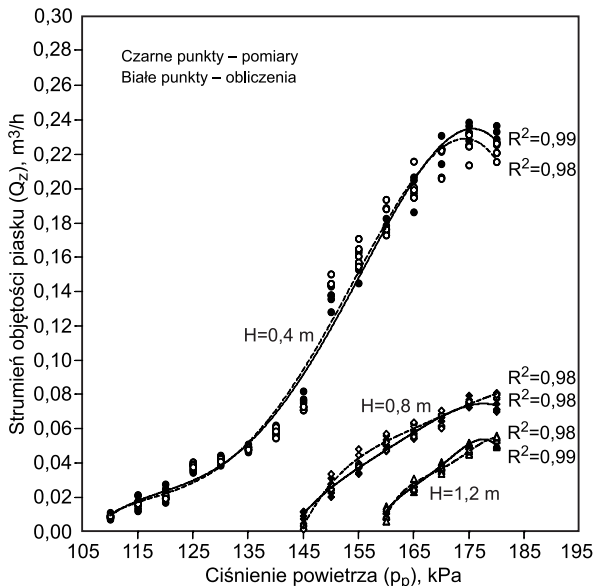


Rys. 3. Zależność strumienia objętości powietrza (Q_p) w podnośniku powietrznym od ciśnienia powietrza (p_p) i wysokości podnoszenia mieszaniny piasku i wody (H)

Fig. 3. Correlation between air flow rate (Q_p) in the air lift pump and air pressure (p_p) as well as sand-water mix delivery head (H)

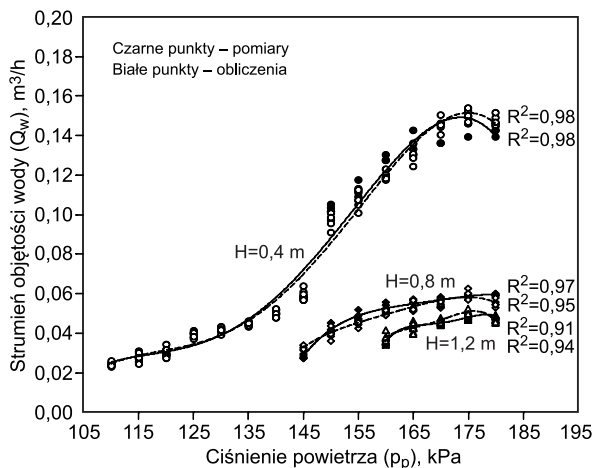
Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wyniki pomiarów wartości strumienia objętości piasku (Q_z) i wody (Q_w) w zależności od ciśnienia powietrza (p_p) i wysokości podnoszenia mieszaniny piasku i wody (H), a także wyniki obliczeń wykonanych za pomocą wzorów (29) i (30). W badanej konstrukcji podnośnika powietrznego, przy danych wartościach wysokości podnoszenia mieszaniny piasku i wody, wartości strumienia objętości wody były mniejsze w stosunku do wartości strumienia objętości piasku. Wartości strumienia objętości piasku i wody malały wraz ze wzrostem wysokości podnoszenia mieszaniny piasku i wody, a rosły wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza osiągając maksimum, a następnie malały.

Aby piasek o uziarnieniu 0,8÷2,0 mm mógł wypływać z podnośnika powietrznego na wymaganej wysokości podnoszenia, musi być zapewnione odpowiednie minimalne ciśnienie powietrza, które wymusza odpowiednią wartość strumienia objętości powietrza w rurociągu tłocznym. Wraz ze wzrostem wysokości podnoszenia mieszaniny piasku



Rys. 4. Zależność strumienia objętości piasku (Q_z) od ciśnienia powietrza (p_p) według pomiarów i obliczeń

Fig. 4. Correlation between sand flow rate (Q_z) and air pressure (p_p) according to the measurements and calculations



Rys. 5. Zależność strumienia objętości wody (Q_w) od ciśnienia powietrza (p_p) według pomiarów i obliczeń

Fig. 5. Correlation between water flow rate (Q_w) and air pressure (p_p) according to the measurements and calculations

i wody wzrastało minimalne wymagane ciśnienie powietrza, a tym samym minimalna wartość strumienia objętości powietrza w rurociągu tłocznym. W badanej konstrukcji podnośnika, przy wysokości podnoszenia mieszanki piasku i wody równej 0,40 m, wymagane minimalne ciśnienie powietrza wynosiło 110 kPa, któremu odpowiadała wartość minimalna strumienia objętości powietrza równa 11,5 m³/h. Przy wysokościach podnoszenia mieszanki piasku i wody równych 0,80 m i 1,20 m wartości te wynosiły odpowiednio 145 kPa i 21,3 m³/h oraz 160 kPa i 23,3 m³/h.

Przy zadanych wysokościach podnoszenia mieszanki wody i piasku, gdy ciśnienie powietrza przekroczyło 175 kPa, któremu odpowiadała średnia wartość strumienia objętości powietrza równa 24,5 m³/h, wartości strumienia objętości piasku i wody dalej już nie wzrastały, lecz zaczęły maleć. Zjawisko to jest opisane w literaturze i oznacza, że w przypadku badanego podnośnika powietrznego z zastosowanym mieszaczem (rys. 2), maksymalne wymagane ciśnienie powietrza nie powinno przekraczać 175 kPa [6, 9–12, 17, 23].

Do określenia przepustowości powietrznego podnośnika wyprowadzono odpowiednie zależności. W tym celu, wykorzystując wyniki pomiarów wykonanych na stanowisku badawczym (rys. 1 i 2), z równań strukturalnych na Q_z (27) i Q_w (28) obliczono wartości bezwymiarowych parametrów π_1 – π_8 opisanych równaniami (16)–(23). W zależności od wartości pomierzonej temperatury wody i powietrza, na podstawie tablic [34] określono wartości gęstości wody (ρ_w) i powietrza (ρ_p) oraz współczynników lepkości dynamicznej wody (μ_w) i powietrza (μ_p). Następnie zbudowano odpowiednie tablice danych i stosując metodę regresji wielokrotnej za pomocą programu STATISTICA wyznaczono wartości współczynników liczbowych do wzorów na obliczanie Q_z i Q_w . Po podstawieniu wyznaczonych wartości tych współczynników do równań strukturalnych (27) i (28) oraz zmniejszeniu w nich liczby cyfr znaczących, ze względu na uproszczenie w korzystaniu ze wzorów, otrzymano ostatecznie następujące wzory do obliczania wartości strumienia objętości piasku i wody w podnośniku powietrznym:

$$Q_z = \left(-7,93 \cdot 10^{-5} + 8,01 \cdot 10^{-4} \frac{Q_w d^2}{HkQ_p} + 2,43 \cdot 10^{-13} \frac{p_b d^3}{\mu_p Q_p} + 2,08 \cdot 10^{-5} \frac{p_p d^4}{\rho_w Q_p^2} - 6,2 \cdot 10^{-8} \frac{p_p d^4}{\rho_p Q_p^2} + 5,61 \cdot 10^{-5} \frac{p_p d^4}{\rho_z Q_p^2} + 8,17 \cdot 10^{-6} \frac{\mu_w}{\mu_p} - 2,86 \cdot 10^{-3} \frac{g d^5}{Q_p^2} \right) \frac{HQ_p}{Q_p^2} \quad (29)$$

$$Q_w = \left(1,04 + 1239 \frac{Q_z d}{HQ_p} - 2,49 \cdot 10^{-10} \frac{p_b d^3}{\mu_p Q_p} - 2,72 \cdot 10^{-2} \frac{p_p d^4}{\rho_w Q_p^2} + 7,54 \cdot 10^{-5} \frac{p_p d^4}{\rho_p Q_p^2} - 6,63 \cdot 10^{-2} \frac{p_p d^4}{\rho_z Q_p^2} - 1,1 \cdot 10^{-2} \frac{\mu_w}{\mu_p} + 3,64 \frac{g d^5}{Q_p^2} \right) \frac{HkQ_p}{d^2} \quad (30)$$

Zależność funkcyjna między strumieniem objętości piasku (rys. 4) i wody (rys. 5) a ciśnieniem powietrza miała tendencję nieliniową w zakresie wartości Q_z i Q_w otrzymanych z pomiarów i obliczeń za pomocą wzorów (29) i (30). Odchyłki wartości Q_z i Q_w otrzymanych z obliczeń w stosunku do wartości otrzymanych z pomiarów, przy badanych wysokościach podnoszenia mieszanki piasku i wody, były małe. Typ trendu (regresji) był wielomianem czwartego stopnia w zakresie wartości strumienia objętości piasku i wody otrzymanych z obliczeń za pomocą wzorów oraz wartości otrzymanych z pomiarów. Linie trendu przy wartościach Q_z i Q_w otrzymanych z obliczeń były nieznacznie przesunięte w stosunku do linii trendu wartości otrzymanych z pomiarów. Na rysunkach 4 i 5 zamieszczono także pary współczynników determinacji z próby (R^2). Większe wartości współczynnika R^2 dotyczą pomierzonych wartości Q_z i Q_w , a wartości mniejsze – obliczonych za pomocą wzoru (29) i (30). Wartości współczynnika R^2 były powyżej 0,91, co wskazuje, że wartość strumienia objętości piasku i wody w powietrznym podnośniku w co najmniej 91% zależała od ciśnienia powietrza, a tym samym wartości strumienia objętości powietrza i wysokości podnoszenia mieszanki piasku i wody, a tylko w 9% od pozostałych czynników, takich jak gęstość wody, piasku i powietrza czy przyspieszenia ziemskiego.

Aby ocenić dokładność wzorów (29) i (30) porównano obliczone wartości Q_z i Q_w z wartościami pomierzonymi na stanowisku pomiarowym. Stwierdzono, że w następujących zakresach wartości poszczególnych parametrów:

$$d=0,04 \text{ m} \quad (31)$$

$$110 \text{ kPa} \leq p_p \leq 180 \text{ kPa} \quad (32)$$

$$7,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h} \leq Q_z \leq 2,37 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3/\text{h} \quad (33)$$

$$2,37 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h} \leq Q_w \leq 1,46 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3/\text{h} \quad (34)$$

$$11,43 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q_p \leq 24,89 \text{ m}^3/\text{h} \quad (35)$$

$$1,3321 \text{ kg}/\text{m}^3 \leq \rho_p \leq 2,1890 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (36)$$

$$999,3692 \text{ kg}/\text{m}^3 \leq \rho_w \leq 999,6006 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (37)$$

$$\rho_z = 1632,0 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (38)$$

$$1,1832 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) \leq \mu_w \leq 1,2066 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) \quad (39)$$

$$1,7730 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) \leq \mu_p \leq 1,7855 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) \quad (40)$$

średnia odchyłka wartości Q_z nie przekraczała 7% przy wysokości podnoszenia mieszaniny piasku i wody $H=0,40 \text{ m}$, 12% przy $H=0,80 \text{ m}$ oraz 8% przy $H=1,20 \text{ m}$, natomiast średnia odchyłka wartości Q_w nie przekraczała 4% przy $H=0,40 \text{ m}$, 6% przy $H=0,80 \text{ m}$ oraz 5% przy $H=1,20 \text{ m}$. Analiza wzorów (29) i (30) wykazała, że wymiary obu stron wzorów były zgodne.

Podsumowanie

W analizowanym podnośniku powietrznym wartość strumienia objętości powietrza (Q_p) zwiększała się wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza (p_p). Również wartość strumienia objętości piasku (Q_z) i wody (Q_w) rosła wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza, osiągając maksimum, a następnie malała. Wraz ze wzrostem wysokości podnoszenia mieszaniny piasku i wody (H) wartość strumienia objętości piasku i wody malała, natomiast wartości strumienia objętości wody (Q_w) były mniejsze w stosunku do wartości strumienia objętości piasku (Q_z). W przypadku badanego podnośnika powietrznego o średnicy wewnętrznej rurociągu tłoczego równej $0,04 \text{ m}$, z zastosowanym mieszaczem, wartość strumienia objętości piasku i wody zwiększała się wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza od 110 kPa do 175 kPa , natomiast w przypadku wyższych ciśnień powietrza wartość strumienia objętości piasku i wody zaczynała maleć. W związku z tym zaleca się, aby ciśnienie powietrza w tym urządzeniu nie było mniejsze niż 110 kPa i nie przekraczało 175 kPa .

Wartości strumienia objętości piasku i wody, obliczone za pomocą wyprowadzonych wzorów (29) i (30), bardzo dobrze pokrywały się z wartościami wyznaczonymi z bezpośrednich pomiarów. W związku z tym wzory te mogą być wykorzystywane do projektowania podnośników powietrznych z mieszaczem przedstawionym na rysunku 2.

LITERATURA

- Z. HEIDRICH, M. KALENIK, J. PODEDWORNA, G. STAŃKO: Sanitacja wsi. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2008.
- M. KALENIK: Zaopatrzenie w wodę i odprowadzanie ścieków. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2015.
- T. SOLECKI: Analiza i ocena możliwości renowacji odwiertu w uzdrowisku Polczyn. *Wiertnictwo Nafia Gaz* 2010, t. 27, nr 3, ss. 617–627.
- B. BARRUT, J.-P. BLANCHETON, J.-Y. CHAMPAGNE, A. GRASMICK: Mass transfer efficiency of a vacuum air lift – application to water recycling in aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 2012, No. 46, pp. 18–26.
- W. FAN, J. CHEN, Y. PAN, H. HUANG, C.-T.A. CHEN, Y. CHEN: Experimental study on the performance of air-lift pump for artificial upwelling. *Ocean Engineering* 2013, No. 59, pp. 47–57.
- P. HANAFIZADEH, S. GHANBARZADEH, M.H. SAIDI: Visual technique for detection of gas-liquid two-phase flow regime in the air lift pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2011, No. 75, pp. 327–335.
- F. de CACHARD, J.M. DELHAYE: A slug-churn flow model for small-diameter airlift pumps. *International Journal Multiphase Flow* 1996, Vol. 22, No. 4, pp. 627–649.
- S.Z. KASSAB, H.A. KANDIL, H.A. WARDA, W.H. AHMEDB: Experimental and analytical investigations of air-lift pumps operating in three-phase flow. *Chemical Engineering Journal* 2007, No. 131, pp. 273–281.
- M.F. KHALIL, K.A. ELSHORBAGY, S.Z. KASSAB, R.I. FAHMY: Effect of air injection method on the performance of an air lift pump. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 1999, No. 20, pp. 598–604.
- M. KALENIK: Badania modelowe sprawności powietrznego podnośnika cieczy (Model studies of air-lift pump efficiency). *Ochrona Środowiska* 2015, vol. 37 nr 4, ss. 39–46.
- M. KALENIK: Investigations of hydraulic operating conditions of air lift pump with three types of air-water mixers. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation* 2015, Vol. 47, No. 1, pp. 69–85.
- M. KALENIK, P. PRZYBYLSKI: Eksperymentalne badania hydraulicznych warunków pracy powietrznego podnośnika. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2011, nr 6, ss. 219–223.
- D.J. NICKLIN: The air lift pump: theory and optimization. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 1963, Vol. 41, pp. 29–39.
- M. KALENIK: Empirical formulas for calculation of negative pressure difference in vacuum pipelines. *Water* 2015, Vol. 7, No. 10, pp. 5284–5304.
- M. KALENIK: Experimental investigations of interface valve flow capacity in the RoeVac type vacuum sewage system. *Environment Protection Engineering* 2014, Vol. 40, No. 3, pp. 127–138.
- M. KALENIK: Experimental investigations of hydraulic resistance on lifts in pipelines of a vacuum sewage system. *Environment Protection Engineering* 2008, Vol. 34, No. 3, pp. 65–73.
- S.Z. KASSAB, H.A. KANDIL, H.A. WARDA, W.H. AHMED: Air-lift pumps characteristics under two-phase flow conditions. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2009, No. 30, pp. 88–98.
- S.H. KIM, C.H. SOHN, J.Y. HWANG: Effects of tube diameter and submergence ratio on bubble pattern and performance of air-lift pump. *International Journal of Multiphase Flow* 2014, No. 58, pp. 195–204.
- A.-F. MAHROUS: Performance of airlift pumps: single-stage vs. multistage air injection. *American Journal of Mechanical Engineering* 2014, Vol. 2, No. 1, pp. 28–33.
- A.-F. MAHROUS: Experimental study of airlift pump performance with s-shaped riser tube bend. *International Journal Engineering and Manufacturing* 2013, No. 1, 1–12.
- A.-F. MAHROUS: Performance study of an air-lift pump with bent riser tube. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics* 2013, Vol. 8, No. 2, pp. 136–145.
- A.-F. MAHROUS: Numerical study of solid particles-based airlift pump performance. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics* 2012, Vol. 7, No. 3, pp. 221–230.
- Q. MENG, C. WANG, Y. CHEN, J. CHEN: A simplified CFD model for air-lift artificial upwelling. *Ocean Engineering* 2013, No. 72, pp. 267–276.
- T. YOSHINAGA, Y. SATO: Performance of an air-lift pump for conveying coarse particles. *International Journal Multiphase Flow* 1996, Vol. 22, No. 2, 223–238.

25. E.M. WAHBA, M.A. GADALLA, D. ABUEIDDA, A. DALAQ, H. HAFIZ, K. ELAWADI, R. ISSA: On the performance of air-lift pumps: from analytical models to large eddy simulation. *Journal of Fluids Engineering* 2014, Vol. 136, No. 11, pp. 1–7.
26. H. TIGHZERT, M. BRAHIMI, N. KECHROUD, F. BENABBAS: Effect of submergence ratio on the liquid phase velocity, efficiency and void fraction in an air-lift pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2013, Vol. 110, pp. 155–161.
27. I.I. ESEN: Experimental investigation of a rectangular air lift pump. *Advances in Civil Engineering* 2010, Article ID 789547, 5 p.
28. H. FUJIMOTO, S. MURAKAMI, A. OMURA, H. TAKUDA: Effect of local pipe bends on pump performance of a small air-lift system in transporting solid particles. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2004, No. 25, pp. 996–1005.
29. F. JANKOWSKI: *Pompy i wentylatory w inżynierii sanitarnej*. ARKADY, Warszawa 1975.
30. W.A. WURTS, S.G. MCNEILL, D.G. OVERHULTS: Performance and design characteristics of air lift pumps for field applications. *World Aquaculture* 1994, Vol. 25, No. 4, pp. 51–55.
31. W. KASPRZAK, B. LYSIK: *Analiza wymiarowa. Algorytmiczne procedury obsługi eksperymentu*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988.
32. M. KOKAR: Zarys procedury formułowania praw fizycznych w języku analizy wymiarowej. *Inżynieria Chemiczna* 1979, vol. 9, nr 2, ss. 361–369.
33. L. MULLER: *Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli*. PWN, Warszawa 1983.
34. Z. ORZECZOWSKI, J. PRYWIER, R. ZARZYCKI: *Zadania z mechaniki płynów w inżynierii środowiska*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.

Kalenik, M. Model Studies of Sand and Water Flow Rate in an Air Lift Pump. *Ochrona Środowiska* 2017, Vol. 39, No. 1, pp. 45–52.

Abstract: Analysis of results from a study on sand (Q_z) and water (Q_w) flow rate in an air lift pump was presented as well as the methodology of empirical formulas derivation to calculate those parameters. A comparative analysis of the values of sand and water flow rate from direct measurements and the calculated values was carried out. The scope of laboratory research encompassed derivation of the aforementioned empirical formulas to calculate water and sand flow rate for the plastic air lift pump with internal diameter of the delivery pipe $d=0.04$ m, at fixed sand-water mix delivery heads of 0.40 m, 0.80 m and

1.20 m. Dimensional analysis and multiple regression were applied to derive the formulas. It was established that the water and sand flow rate decreased along with the increase of the delivery head, and the values of water flow rate were smaller than those of the sand flow rate. It was demonstrated that the air pressure in such devices cannot be lower than 110 kPa or exceed 175 kPa as at higher pressure values the sand and water flow rate started to fall. The values of sand and water flow rates calculated by the derived formulas coincided very well with the values determined by direct measurements using the 1:1 scale laboratory model.

Keywords: Air lift pump, air injector, three-phase flow, sand flow rate, water flow rate, delivery head, empirical formula.