

Marek Kalenik

## Badania modelowe sprawności powietrznego podnośnika cieczy

Podnośniki powietrzne najczęściej stosowano do transportu cieczy zarówno w systemach wodociągowych, jak i kanalizacyjnych. Obecnie w Polsce urządzenia te stosowane są do podnoszenia ścieków i osadów w małych przydomowych i dużych grupowych oczyszczalniach ścieków, a także do podnoszenia złoza w filtrach pospiesznych ze złożem samoregenerującym [1–3] lub też do renowacji studni wierconych [4]. W innych krajach świata powietrzne podnośniki cieczy mają natomiast o wiele większe zastosowanie. Są wykorzystywane na przykład do napowietrzania i mieszania wody oraz usuwania dwutlenku węgla z wody w przemysłowej hodowli ryb [5], a także do mieszania wody w głębokich jeziorach, stawach i jej napowietrzania poprzez transport wody z dna jeziora/stawu na jego powierzchnię [6,7]. Prosta budowa i wysoka niezawodność powietrznych podnośników cieczy powoduje, że są wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu – szczególnie w petrochemii do wydobycia ropy naftowej z martwych studni [8], w przemyśle chemicznym do transportu cieczy korozyjnych, radioaktywnych, żrących i toksycznych [9, 10] oraz pompowania wrzących płynów, w których następuje zmiana fazy ciekłej w fazę gazową [11]. Urządzenia te są również wykorzystywane do transportu zawieszin w górnictwie i podnoszenia konkrecji manganowych z głębokiego dna morskiego (4000÷6000 m) [10].

W powietrznych podnośnikach cieczy występuje przepływ dwu- (ciecz–gaz) lub trójfazowy (ciecz–gaz–ciało stałe), który jest bardzo trudny do modelowania pod względem matematycznym, ponieważ zależy od wielu czynników i zmiennych [12–16]. Hydrauliczne warunki dwu- i trójfazowego przepływu w powietrznych podnośnikach cieczy są mało rozpoznane [10]. Podejmowane są próby opisu struktur przepływu występujących w różnych warunkach przepływu ciecz–gaz lub ciecz–gaz–ciało stałe i następnie opracowania tak zwanych map struktur przepływu oraz modeli matematycznych do symulacji występujących w nich przepływów wielofazowych [6, 8–11, 17–25]. Prowadzone były również badania powietrznych podnośników cieczy wykonanych z rur prostokątnych [26] i zakrzywionych [27]. Wykonane badania powietrznych podnośników cieczy z zakrzywionymi rurami za mieszaczem powietrzno-wodnym pokazują, że w tak skonstruowanych podnośnikach znacznie maleje wydajność pompowania ciał stałych, natomiast gdy pompowana jest sama ciecz, to zakrzywienie rury powietrznego podnośnika cieczy nie

ma wpływu na jego wydajność [20]. Z przeprowadzonych badań wynika, że powietrzne podnośniki cieczy charakteryzują się małą sprawnością działania w porównaniu do konwencjonalnych pomp [10, 17, 28]. W dostępnej literaturze naukowo-technicznej mało jest informacji na temat zasad ich wymiarowania i budowy [29, 30]. W szczególności brakuje informacji, jak należy zaprojektować mieszacz powietrzno-wodny, aby uzyskać jak najlepsze parametry pracy powietrznego podnośnika cieczy.

Do wyznaczenia sprawności badanego w niniejszej pracy powietrznego podnośnika cieczy zastosowano wzór wyznaczony przez Nicklina [31]:

$$\eta = \left( \frac{\rho_w g Q_w (L-h)}{p_b Q_p \ln \left( \frac{p_p}{p_b} \right)} \right) 100 \quad (1)$$

w którym:

$\eta$  – sprawność powietrznego podnośnika cieczy, %

$Q_w$  – natężenie przepływu wody, m<sup>3</sup>/s

$Q_p$  – natężenie przepływu powietrza, m<sup>3</sup>/s

$p_p$  – ciśnienie powietrza, N/m<sup>2</sup>

$\rho_w$  – gęstość cieczy, kg/m<sup>3</sup>

$p_b$  – ciśnienie barometryczne, N/m<sup>2</sup>

$h$  – głębokość zanurzenia rurociągu tłocznego, m

$L$  – długość rurociągu tłocznego do wylotu, m

$g$  – przyspieszenie ziemskie, m/s<sup>2</sup>

Z dotychczas przeprowadzonych badań wynika, że typ mieszacza powietrzno-wodnego i średnica rurociągu tłocznego zastosowanego w powietrznym podnośniku cieczy ma wpływ na jego wydajność i hydrauliczne warunki jego pracy [6, 11, 14, 32]. Liczba, średnica i sposób rozmieszczenia otworów w mieszaczu powietrzno-wodnym ma bardzo duży wpływ na rodzaj struktur przepływów dwufazowych cieczy i gazu w powietrznym podnośniku cieczy. W artykułach [14, 32] przedstawiono analizę wyników badań powietrznych podnośników cieczy z rurociągami tłocznymi o średnicy wewnętrznej 0,05 m [32] i 0,04 m [14] oraz z trzema typami mieszaczy powietrzno-wodnych. Pierwszy typ mieszacza w obu badanych konstrukcjach powietrznych podnośników cieczy miał jednopunktowe zasilanie w postaci stalowej, zewnętrznie gwintowanej, końcówki o średnicy wewnętrznej 0,013 m [14, 32]. W drugim typie mieszacza wewnątrz komory mieszania, na odcinku rurociągu tłocznego, nawierconych było odpowiednio 71 otworów o średnicy 0,005 m rozmieszczonych w siedmiu kolumnach i trzynastu rzędach [32] oraz 70 otworów

o średnicy 0,004 m w pięciu kolumnach i w czternastu rzędach [14]. Otwory były umieszczone na połowie obwodu rurociągu tłocznego, na wprost stalowej końcówki, którą włączano powietrze do podnośnika. W trzecim typie mieszacza liczba nawierconych otworów i ich średnica w obu badanych konstrukcjach była identyczna jak w mieszaczu drugiego typu [14, 32]. Różnica w budowie trzeciego typu mieszacza w stosunku do drugiego typu polegała na umieszczeniu otworów po drugiej stronie obwodu rurociągu tłocznego w stosunku do stalowej końcówki, którą włączano powietrze do powietrznego podnośnika cieczy. Pomiar wydajności powietrznych podnośników cieczy wykonywano przy wysokości podnoszenia wody (H) odpowiednio 0,40 m, 0,80 m, 1,20 m, 1,60 m i 2,00 m [32] oraz 0,45 m, 0,90 m, 1,35 m, 1,80 m i 2,25 m [14], mierząc od poziomu zwierciadła wody w zbiorniku.

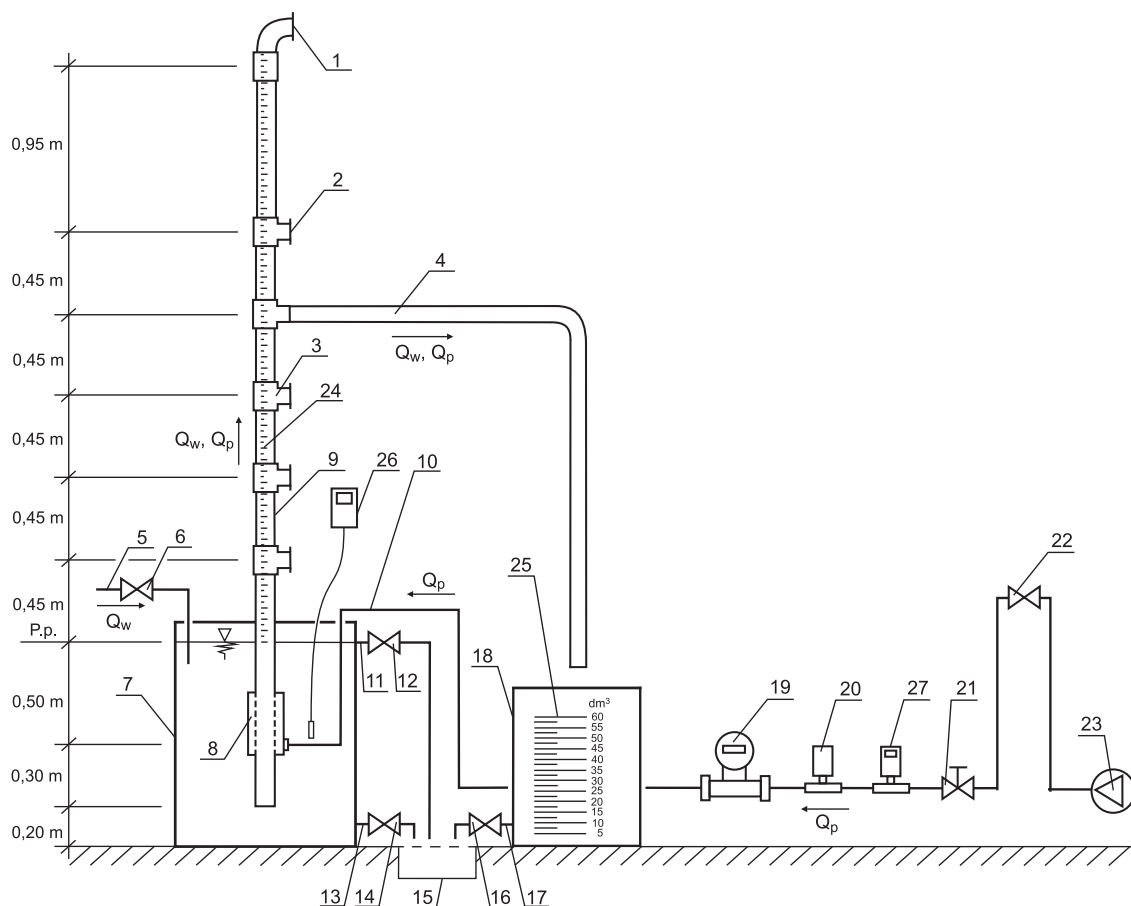
Powietrzny podnośnik cieczy z rurociągiem tłocznym o średnicy wewnętrznej 0,05 m [32], w przypadku każdego typu mieszacza, charakteryzował się dwukrotnie większym natężeniem przepływu wody w porównaniu z powietrznym podnośnikiem cieczy z rurociągiem tłocznym o średnicy wewnętrznej 0,04 m [14]. Wynikało z tego, że natężenie przepływu wody w powietrznym podnośniku cieczy zależało przede wszystkim od przyjętej średnicy rurociągu tłocznego, natomiast w badanych powietrznych podnośnikach cieczy, niezależnie od średnicy wewnętrznej rurociągu tłocznego w danym typie mieszacza, obserwowano takie same struktury dwufazowego przepływu strumienia mieszaniny wody i powietrza [14, 32]. Podczas pracy powietrznych podnośników cieczy z mieszaczami pierwszego typu w przezroczystych rurociągach tłocznych obserwowano przepływ strumienia mieszaniny wody i powietrza w postaci dużych nieregularnych pęcherzy powietrza, które podczas chaotycznego i burzliwego przepływu wyrzucały wodę na dużą wysokość. Strumień wypływającej wody z powietrznych podnośników cieczy nie był ciągły, lecz przerywany (pulsacyjny). Z kolei podczas pracy powietrznych podnośników cieczy z mieszaczami drugiego typu w przezroczystych rurociągach tłocznych obserwowano przepływ strumienia mieszaniny wody i powietrza w postaci drobnych regularnych pęcherzy powietrza, które wypełniały cały przekrój rurociągu tłocznego i równomiernie podnosiły wodę. Strumień wypływającej wody z powietrznych podnośników cieczy miał również charakter pulsacyjny, ale nie był przerywany. W przypadku pracy powietrznych podnośników cieczy z mieszaczami typu trzeciego w przezroczystych rurociągach tłocznych obserwowano przepływ strumienia mieszaniny wody i powietrza w postaci bardzo drobnych pęcherzy powietrza, które tworzyły z wodą w całym przekroju rurociągu tłocznego emulsję powietrzno-wodną. Strumień wypływającej wody z powietrznych podnośników cieczy był ciągły, z ledwo zauważalną pulsacją. Wynikało z tego, że rozwiązanie konstrukcyjne mieszaczy powietrzno-wodnych typu trzeciego zapewniało podczas włączania powietrza do mieszacza stabilizację ciśnienia w jego komorze, co przekładało się na równomierne włączanie powietrza do rurociągu tłocznego przez wszystkie otwory jednocześnie. Dlatego badane powietrzne podnośniki cieczy z mieszaczami powietrzno-wodnymi typu trzeciego charakteryzowały się najbardziej stabilnymi warunkami pracy. W związku z tym, rozwiązania konstrukcyjne mieszaczy powietrzno-wodnych typu trzeciego powinny być dalej badane i udoskonalane, ponieważ zapewniają stabilne warunki pracy powietrznego podnośnika cieczy.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę wyników badań wydajności powietrznego podnośnika cieczy trzeciego typu. Zakres badań obejmował wyprowadzenie wzorów do wyznaczania charakterystyki wydajności podnośnika o średnicy wewnętrznej rurociągu tłocznego 0,04 m, przy zadanej wysokości podnoszenia wody równej 0,45 m, 0,90 m, 1,35 m, 1,80 m oraz 2,25 m, a także określenie sprawności tego urządzenia.

## Stanowisko pomiarowe

Na rysunku 1 przedstawiono budowę i zasadę działania stanowiska do badań hydraulicznych warunków pracy powietrznego podnośnika cieczy. Wodę do zbiornika (7), o pojemności 450 dm<sup>3</sup>, wykonanego z tworzywa sztucznego, doprowadzano rurociągiem (5) po otwarciu zaworu kulowego (6). W trakcie pomiarów zbiornik (7) był stale wypełniony wodą do wysokości 1,0 m. Nadmiar wody dopływającej do zbiornika (7) był odprowadzany przelewem (11), po otwarciu zaworu kulowego (12), do kanalizacji przez wpust podłogowy (15). Do opróżniania zbiornika (7) z wody, po otwarciu zaworu kulowego (14), służył rurociąg spustowy (13). Wewnątrz zbiornika (7), na wysokości 0,20 m nad jego dnem, zamontowano rurociąg tłoczny (9) z przezroczystego tworzywa sztucznego o średnicy wewnętrznej 0,04 m i wysokości 4,0 m, na którym umieszczono podziałkę (24) do pomiaru wysokości podnoszenia wody. Do pomiaru wydajności powietrznego podnośnika cieczy w rurze tłocznej (9) zamontowano pięć trójników pomiarowych (3) na wysokościach 0,45 m, 0,90 m, 1,35 m, 1,80 m i 2,25 m, mierząc od poziomu zwierciadła wody w zbiorniku (7). Górny odcinek rurociągu tłocznego (9) zamknięto korkiem (1). W rurociągu tłocznym (9), na wysokości około 0,30 m nad jego dolną krawędzią, zamontowano mieszacz powietrzno-wodny (8). Do pomiaru temperatury wody w zbiorniku (7) zastosowano termometr elektroniczny (26).

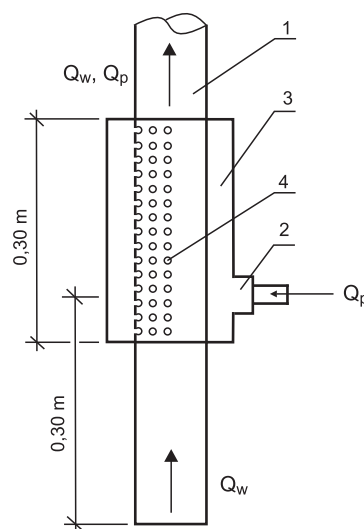
Na rysunku 2 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne badanego typu mieszacza powietrzno-wodnego. Mieszacz ten miał postać komory (3) o średnicy wewnętrznej 0,08 m, szczelnie osadzonej na rurociągu tłocznym (1) o średnicy zewnętrznej 0,05 m. Komora mieszania (3), wraz z uszczelnieniem wewnętrznym, miała na zewnątrz wysokość 0,30 m, a wewnątrz 0,25 m. Jej szerokość wynosiła 0,03 m, mierząc od zewnętrznej ściany rurociągu tłocznego (1) do wewnętrznej ściany komory mieszania (3). Wewnątrz komory mieszania (3), na odcinku rurociągu tłocznego (1), nawiercono 75 otworów (4) o średnicy równej 0,004 m, w pięciu kolumnach i w piętnastu rzędach. Otwory (4) rozmieszczono na połowie obwodu rurociągu tłocznego (1), po przeciwnej stronie stalowej końcówki (2), którą włączano powietrze do podnośnika. Jak wynikało z dotychczas przeprowadzonych badań [14, 32], taki układ powodował w momencie włączania powietrza do mieszacza stabilizację ciśnienia w jego komorze, co przekładało się na równomierne włączanie powietrza przez wszystkie otwory (4) jednocześnie. Zastosowana stalowa końcówka (2), przez którą było włączane powietrze do komory mieszania (3), miała średnicę 0,015 m. Na stalową końcówkę (2) nałożony był elastyczny rurociąg o średnicy wewnętrznej 0,015 m (10) (rys. 1), doprowadzający powietrze ze sprężarki (23) do mieszacza powietrzno-wodnego (8).



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego do badania powietrznego podnośnika cieczy  
 (1 – zamknięty korkiem rurociąg tłoczny, 2 – zamknięty korkiem trójnik pomiarowy, 3 – trójnik pomiarowy, 4 – rurociąg odprowadzający wodę i powietrze, 5 – rurociąg doprowadzający wodę, 6, 12, 14, 16, 22 – odcinające zawory kulowe, 7 – zbiornik, 8 – mieszacz powietrzno-wodny, 9 – przezroczysty rurociąg tłoczny, 10 – rurociąg doprowadzający powietrze, 11 – przelew, 13, 17 – rurociągi spustowe, 15 – wpust podłogowy, 18 – zbiornik pomiarowy, 19 – elektroniczny przepływomierz powietrza, 20 – manometr elektroniczny, 21 – zawór grzybkowy, 23 – sprężarka, 24, 25 – podziałki, 26, 27 – termometry elektroniczne)  
 Fig. 1. Scheme of the measuring station (1 – delivery pipe closed with a plug, 2 – measuring pipe tee closed with a plug, 3 – measuring pipe tee, 4 – water-and-air-carrying pipe, 5 – water supplying pipe, 6, 12, 14, 16, 22 – ball cut-off valves, 7 – tank, 8 – air-water mixer, 9 – transparent delivery pipe, 10 – air supplying pipe, 11 – overfall, 13, 17 – draining pipes, 15 – floor inlet, 18 – measuring container, 19 – electronic air-flow meter, 20 – electronic manometer, 21 – poppet valve, 23 – compressor, 24, 25 – scales, 26, 27 – electronic thermometers)

Na rurociągu (10) zamontowano elektroniczny przepływomierz powietrza (19), elektroniczny manometr (20), elektroniczny termometr do pomiaru temperatury powietrza (27) oraz zawór grzybkowy (21) i odcinający zawór kulowy (22).

W badaniach wykorzystano urządzenia pomiarowe firmy Endress+Hauser. Zakres pomiarowy elektronicznego przepływomierza powietrza (19) wynosił  $0,0 \div 25,0 \text{ m}^3/\text{h}$ , a elektronicznego manometru (20) –  $0,0 \div 400,0 \text{ kPa}$ . Podczas badań mierzono temperaturę wody i temperaturę powietrza, ciśnienie powietrza oraz ciśnienie barometryczne, a także natężenie przepływu powietrza oraz objętość wody podnoszonej w jednostce czasu. Do regulacji ciśnienia powietrza wykorzystywano zawór grzybkowy (21). Do pomiaru ilości wody podnoszonej przez powietrzny podnośnik cieczy wykorzystywano zbiornik (18) z tworzywa sztucznego o pojemności  $80 \text{ dm}^3$ , który został wyskalowany do pojemności  $60 \text{ dm}^3$  (co  $1,0 \text{ dm}^3$ ). Podnoszona woda, przepływając przez trójnik pomiarowy (3), sphywała do zbiornika pomiarowego (18) rurociągiem odprowadzającym wodę i powietrze (4) o średnicy wewnętrznej  $0,04 \text{ m}$ . Podczas wykonywania pomiarów z wykorzystaniem danego trójnika pomiarowego (3), pozostałe trójniki były zamknięte korkami (2).



Rys. 2. Konstrukcja mieszacza powietrzno-wodnego  
 (1 – przezroczysty rurociąg tłoczny, 2 – stalowa końcówka do podłączenia elastycznego rurociągu powietrznego, 3 – komora mieszania, 4 – otwory)

Fig. 2. The air-water mixer structure (1 – transparent delivery pipe, 2 – steel pipe end cap for joining the elastic air supplying pipe, 3 – mixing chamber, 4 – holes)



## Sposób wyprowadzenia równania strukturalnego

Biorąc pod uwagę tak różne rodzaje struktury przepływu strumienia mieszaniny cieczy i powietrza, bardzo dynamiczną i zmienną w czasie pracę powietrznego podnośnika cieczy [8, 10, 14, 17, 18, 32] należy stwierdzić, że bardzo trudno jest opracować klasyczny model matematyczny do wyprowadzenia wzoru na obliczanie natężenia przepływu cieczy w podnośniku powietrznym. W związku z tym do określenia właściwego wzoru zastosowano analizę wymiarową [33–35]. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury i wykonanych pomiarów na stanowisku badawczym (rys. 1) przyjęto założenie, że wydajność powietrznego podnośnika zależy od następujących zmiennych:

- $Q_w$ : natężenie przepływu wody,  $m^3/s$ ,
- $p_b$ : ciśnienie barometryczne,  $kg/(m \cdot s^2)$ ,
- $p_p$ : ciśnienie powietrza,  $kg/(m \cdot s^2)$ ,
- $d$ : średnica wewnętrzna rurociągu tłocznego,  $m$ ,
- $Q_p$ : natężenie przepływu powietrza,  $m^3/s$ ,
- $\rho_w$ : gęstość wody,  $kg/m^3$ ,
- $\rho_p$ : gęstość powietrza,  $kg/m^3$ ,
- $\mu_w$ : współczynnik lepkości dynamicznej wody,  $kg/(m \cdot s)$ ,
- $\mu_p$ : współczynnik lepkości dynamicznej powietrza,  $kg/(m \cdot s)$ ,
- $g$ : przyspieszenie ziemskie,  $m/s^2$ .

W rozważaniach tych nie uwzględniono współczynnika chropowatości bezwzględnej ( $k$ ), ponieważ rurociągi tłoczne stosowane w powietrznych podnośnikach cieczy wykonane są z tworzyw sztucznych (PVC lub PE), których współczynnik chropowatości bezwzględnej jest bardzo mały (PVC –  $k=0,02$  mm, PE –  $k=0,01$  mm) i będzie miał bardzo mały wpływ na wydajność powietrznego podnośnika cieczy. W warunkach technicznych rurociągi tłoczne powietrznych podnośników cieczy są stosowane bez izolacji cieplnej, w związku z tym temperatura gazu (powietrza) i cieczy (wody) jest zbliżona do temperatury otoczenia. Można więc przyjąć, że temperatura gazu i cieczy jest jednakowa wzdłuż rurociągu, a przepływ strumienia cieczy i powietrza jest izotermiczny, zatem  $p/\rho_p = \text{const}$  oraz  $p/\rho_w = \text{const}$ . Biorąc pod uwagę powyższe założenia, można zapisać równanie wymiarowe opisujące rozważane zjawisko w postaci:

$$f\left(Q_w, p_b, \frac{p_p}{\rho_w}, \frac{p_p}{\rho_p}, \mu_w, \mu_p, d, Q_p, g\right) = 0 \quad (2)$$

W równaniu tym występuje  $n=9$  wielkości, których wymiary zawierają  $k=3$  jednostki podstawowe –  $m$ ,  $kg$  oraz  $s$ . Zgodnie z twierdzeniem II Buckinghama, równanie to można przekształcić do związku  $n-k=6$  wzajemnie niezależnych bezwymiarowych parametrów  $\pi$ . Wybrano trzy wielkości –  $\mu_p$ ,  $d$  oraz  $Q_p$ , które zawierają podane jednostki podstawowe i sprawdzono ich wymiarową niezależność:

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

$$kg^{a_1} \cdot m^{-a_1} \cdot s^{-a_1} \cdot m^{a_2} \cdot m^{3a_3} \cdot s^{-a_3} = b \quad (4)$$

$$m^{-a_1+a_2+3a_3} \cdot kg^{a_1} \cdot s^{-a_1-a_3} = m^0 \cdot kg^0 \cdot s^0 \quad (5)$$

$$-a_1 + a_2 + 3a_3 = 0 \rightarrow a_2 = 0 \quad (6)$$

$$a_1 = 0 \quad (7)$$

$$-a_1 - a_3 = 0 \rightarrow a_3 = 0 \quad (8)$$

stąd  $a_1=a_2=a_3=0$ ,  $b=1$  (są wymiarowo niezależne).

Łącząc kolejno pozostałe pięć wielkości wymiarowych z iloczynem potęg wybranych wielkości wymiarowo niezależnych, wyznaczono postać bezwymiarowych parametrów  $\pi$ :

$$\pi_1 = Q_w \mu_p^{a_1} d^{a_2} Q_p^{a_3} \quad (9)$$

$$\pi_2 = p_b \mu_p^{b_1} d^{b_2} Q_p^{b_3} \quad (10)$$

$$\pi_3 = (p_p/\rho_w) \mu_p^{c_1} d^{c_2} Q_p^{c_3} \quad (11)$$

$$\pi_4 = (p_p/\rho_p) \mu_p^{d_1} d^{d_2} Q_p^{d_3} \quad (12)$$

$$\pi_5 = \mu_w \mu_p^{e_1} d^{e_2} Q_p^{e_3} \quad (13)$$

$$\pi_6 = g \mu_p^{f_1} d^{f_2} Q_p^{f_3} \quad (14)$$

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:

$$\pi_1 = Q_w/Q_p \quad (15)$$

$$\pi_2 = (p_b d^3)/(\mu_p/Q_p) \quad (16)$$

$$\pi_3 = (p_p d^4)/(\rho_w/Q_p^2) \quad (17)$$

$$\pi_4 = (p_p d^4)/(\rho_p/Q_p^2) \quad (18)$$

$$\pi_5 = \mu_w/\mu_p \quad (19)$$

$$\pi_6 = (g d^5)/Q_p^2 \quad (20)$$

Zgodnie z twierdzeniem II Buckinghama, równanie wymiarowe (2) można zapisać w postaci bezwymiarowej zależności parametrów  $\pi$ :

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = 0 \quad (21)$$

skąd:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) \quad (22)$$

Podstawiając za wartości  $\pi$  wyrażenia (15)–(20), po uporządkowaniu otrzymuje się równanie strukturalne w postaci:

$$Q_w = f\left(\frac{p_b d^3}{\mu_p Q_p}, \frac{p_p d^4}{\rho_w Q_p^2}, \frac{p_p d^4}{\rho_p Q_p^2}, \frac{\mu_w}{\mu_p}, \frac{g d^5}{Q_p^2}\right) Q_p \quad (23)$$

Po wyprowadzeniu równania strukturalnego przeprowadzono eksperymenty doświadczalne w celu wyznaczenia jego współczynników liczbowych.

## Metoda badania powietrznego podnośnika cieczy

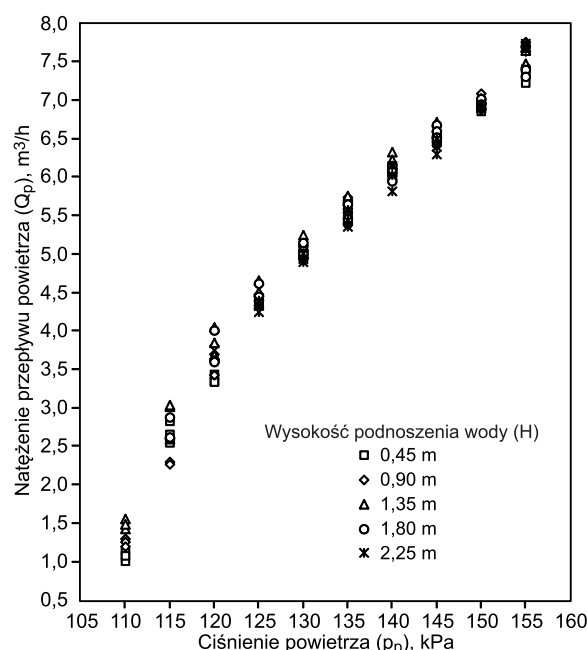
Przed rozpoczęciem każdej serii pomiarowej na stanowisku badawczym (rys. 1) mierzono za pomocą elektronicznego manometru (20) wartość ciśnienia barometrycznego. Pomiar wydajności powietrznego podnośnika cieczy rozpoczynano od otwarcia zaworów (6) i (12), napełnienia zbiornika (7) wodą, włączenia sprężarki (23) i otwarcia zaworu (22) na rurociągu doprowadzającym powietrze (10) do mieszacza (8). Następnie ustawiano na elektronicznym manometrze (20) żadaną wartość ciśnienia powietrza za pomocą zaworu grzybkowego (21). Po ustawieniu określonego ciśnienia powietrza pewna ilość wody, w zależności od wydajności podnośnika, wpływała ze zbiornika (7). Aby pomiar był miarodajny, poziom wody w zbiorniku (7) musiał pozostawać stały. Zmiana stopnia zanurzenia mieszacza lub zmiana poziomu wody w zbiorniku (7) powoduje znaczne zmiany wydajności powietrznego podnośnika

cieczy. Stały poziom wody w zbiorniku (7) utrzymywano za pomocą zaworu (6) znajdującego się na rurociągu doprowadzającym wodę (5) do zbiornika (7). Każdorazowo zawór (6) ustawiano w położeniu, które równoważyło wypływ wody przez określony trójnik pomiarowy (3). Obserwację i regulację wysokości cieczy w zbiorniku (7) wykonywano względem poziomu zaznaczonego poziomą kreską na jego wewnętrznej ścianie. Po wykonaniu tych czynności i ustabilizowaniu się warunków pracy powietrznego podnośnika cieczy, rozpoczynano pomiar. Najpierw, przy zadanej wartości ciśnienia powietrza, z elektronicznego przepływomierza powietrza (19) odczytywano natężenie przepływu powietrza, a z elektronicznych termometrów temperaturę powietrza (27) i temperaturę wody (26). Następnie pod rurociąg odprowadzający wodę (4) podstawiano zbiornik pomiarowy (18), a podnoszona woda rurociągiem (4) spływała do zbiornika pomiarowego (18). Czas jego napełniania, czyli czas pomiaru, ustalono na jedną minutę. Po upływie minuty zbiornik pomiarowy (18) odsuwano spod rurociągu odprowadzającego wodę (4) i wykonywano odczyt objętości wody z podziałki (25). Następnie zbiornik pomiarowy (18) opróżniano otwierając zawór kulowy (16). Po opróżnieniu zbiornika (18) zamykano zawór kulowy (16) i ustawiano na elektronicznym manometrze (20) kolejną wartość ciśnienia powietrza i rozpoczynano kolejny pomiar. Pomiar wykonywano przy zadanym ciśnieniu powietrza w zakresie od 110 kPa do 155 kPa, co 5 kPa. Natężenie przepływu wody obliczano dzieląc objętość wody znajdującej się w zbiorniku (18) przez czas jego napełniania. W trakcie badań wykonano po trzy serie pomiarowe przy zadanej wartości ciśnienia powietrza oraz wszystkich pięciu trójników pomiarowych (3). Wydajność powietrznego podnośnika badano przy pięciu wartościach wysokości podnoszenia wody równych 0,45 m, 0,90 m, 1,35 m, 1,80 m oraz 2,25 m, mierzonych względem położenia zwierciadła wody w zbiorniku (7).

## Dyskusja wyników badań

Podczas pracy powietrznego podnośnika cieczy z mieszaczem powietrzno-wodnym (rys. 2) w przezroczystym rurociągu tłocznym obserwowano przepływ strumienia mieszaniny wody i powietrza w postaci drobnych pęcherzy powietrza, które wraz z wodą występowały w całym przekroju rurociągu tłocznego, tworząc emulsję powietrzno-wodną. Strumień wypływającej wody z powietrznego podnośnika cieczy był prawie ciągły z niedużą pulsacją. Na rysunku 3 przedstawiono rozkład natężenia przepływu powietrza ( $Q_p$ ) w powietrznym podnośniku cieczy w zależności od ciśnienia powietrza ( $p_p$ ) i wysokości podnoszenia wody ( $H$ ). Analizując uzyskane wyniki pomiarów można stwierdzić, że w powietrznym podnośniku cieczy natężenie przepływu powietrza zwiększało się wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza, natomiast wzrost wysokości podnoszenia wody, przy stałym zanurzeniu mieszacza powietrzno-wodnego i danych wartości ciśnienia powietrza, miał bardzo mały wpływ na spadek natężenia przepływu powietrza. Niezależnie od wysokości podnoszenia wody, wartości natężenia przepływu powietrza, przy jego danym ciśnieniu, były porównywalne, co wynikało z dużej ściśłości powietrza.

Aby woda wypływała z powietrznego podnośnika cieczy na wymaganej wysokości podnoszenia musi być zapewnione odpowiednie minimalne ciśnienie powietrza, które wymusza odpowiednie natężenie przepływu powietrza



Rys. 3. Zależność natężenia przepływu powietrza w powietrznym podnośniku cieczy od ciśnienia powietrza i wysokości podnoszenia wody

Fig. 3. Correlation between the air flow rate and the air pressure as well as water delivery head in the air-lift pump

w rurociągu tłocznym. Wraz ze wzrostem wysokości podnoszenia wody wzrastało minimalne wymagane ciśnienie powietrza i tym samym minimalne natężenie przepływu powietrza w rurociągu tłocznym. W badanej konstrukcji powietrznego podnośnika cieczy, przy wysokościach podnoszenia równych 0,45 m, 0,90 m oraz 1,35 m, wymagane minimalne ciśnienie powietrza wynosiło 110 kPa, któremu odpowiadało minimalne natężenie przepływu powietrza równe 1,25 m³/h. Przy wysokościach podnoszenia równych 1,80 m i 2,25 m wartości te wynosiły odpowiednio 115 kPa i 2,50 m³/h oraz 125 kPa i 4,25 m³/h. Przy założonych wartościach wysokości podnoszenia wody, gdy ciśnienie powietrza przekroczyło 145 kPa (któremu odpowiadało średnie natężenie przepływu powietrza równe 6,50 m³/h) wydajność powietrznego podnośnika cieczy nie wzrastała dalej, lecz zaczynała się zmniejszać. Zjawisko to jest opisane w literaturze [8, 11, 17, 23] i oznacza, że w przypadku badanego powietrznego podnośnika cieczy z zastosowanym typem mieszacza (rys. 2) maksymalne wymagane ciśnienie powietrza nie powinno przekraczać wartości 145 kPa.

Do określania przepustowości powietrznego podnośnika cieczy wyprowadzono odpowiednie zależności. W tym celu, wykorzystując wyniki pomiarów na stanowisku badawczym (rys. 1 i 2), z wyznaczonego równania strukturalnego (23) obliczono bezwymiarowe parametry  $\pi$  równań (15)–(20). W zależności od pomierzonej temperatury wody i powietrza, na podstawie tablic [36] określono wartości gęstości wody i powietrza oraz współczynnika lepkości dynamicznej wody i powietrza. Następnie zbudowano odpowiednie tablice danych i stosując metodę regresji wielokrotnej za pomocą programu STATISTICA [37], wyznaczono współczynniki liczbowe do wzorów przy założonej wysokości podnoszenia wody. Po podstawieniu wyznaczonych współczynników liczbowych do równania strukturalnego (23) i zmniejszeniu w nich liczby cyfr znaczących (ze względu na uproszczenie w korzystaniu ze wzorów), otrzymano ostatecznie następujące wzory do obliczania natężenia przepływu wody w powietrznym podnośniku cieczy:

– przy wysokości podnoszenia wody  $H=0,45\text{ m}$ :

$$Q_w = \left( 9,0 \cdot 10^{-2} + 9,5 \cdot 10^{-10} \frac{p_b d^3}{\mu_p Q_p} - 2,73 \cdot 10^{-3} \frac{p_p d^4}{\rho_w Q_p^2} + 2,575 \cdot 10^{-6} \frac{p_p d^4}{\rho_p Q_p^2} - 8,8 \cdot 10^{-4} \frac{\mu_w}{\mu_p} + 0,157 \frac{g d^5}{Q_p^2} \right) Q_p \quad (24)$$

– przy wysokości podnoszenia wody  $H=0,90\text{ m}$ :

$$Q_w = \left( -0,25 + 3,8 \cdot 10^{-10} \frac{p_b d^3}{\mu_p Q_p} - 4,79 \cdot 10^{-4} \frac{p_p d^4}{\rho_w Q_p^2} + 1,98 \cdot 10^{-6} \frac{p_p d^4}{\rho_p Q_p^2} + 4,3 \cdot 10^{-3} \frac{\mu_w}{\mu_p} - 0,32 \frac{g d^5}{Q_p^2} \right) Q_p \quad (25)$$

– przy wysokości podnoszenia wody  $H=1,35\text{ m}$ :

$$Q_w = \left( 7,7 \cdot 10^{-2} + 2,1 \cdot 10^{-10} \frac{p_b d^3}{\mu_p Q_p} - 1,01 \cdot 10^{-3} \frac{p_p d^4}{\rho_w Q_p^2} + 3,15 \cdot 10^{-6} \frac{p_p d^4}{\rho_p Q_p^2} - 1,14 \cdot 10^{-4} \frac{\mu_w}{\mu_p} - 0,443 \frac{g d^5}{Q_p^2} \right) Q_p \quad (26)$$

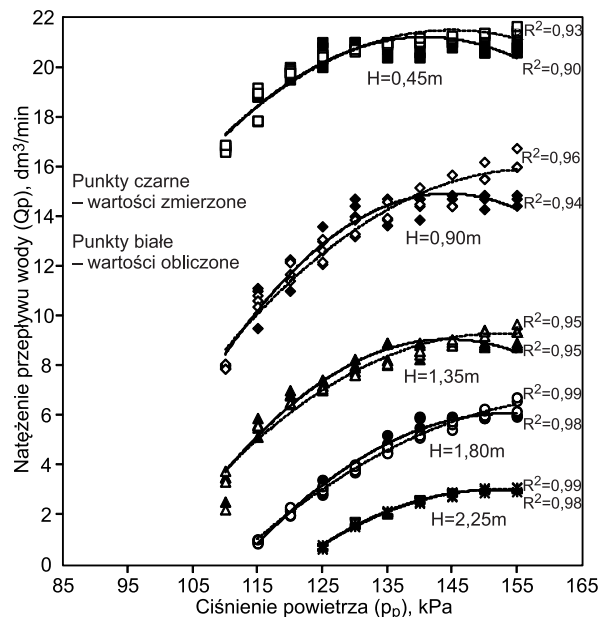
– przy wysokości podnoszenia wody  $H=1,80\text{ m}$ :

$$Q_w = \left( 6,3 \cdot 10^{-2} - 2,04 \cdot 10^{-11} \frac{p_b d^3}{\mu_p Q_p} + 1,745 \cdot 10^{-3} \frac{p_p d^4}{\rho_w Q_p^2} + 6,2 \cdot 10^{-7} \frac{p_p d^4}{\rho_p Q_p^2} - 9,8 \cdot 10^{-4} \frac{\mu_w}{\mu_p} - 0,642 \frac{g d^5}{Q_p^2} \right) Q_p \quad (27)$$

– przy wysokości podnoszenia wody  $H=2,25\text{ m}$ :

$$Q_w = \left( -0,125 + 5,43 \cdot 10^{-10} \frac{p_b d^3}{\mu_p Q_p} + 6,9 \cdot 10^{-4} \frac{p_p d^4}{\rho_w Q_p^2} - 1,9 \cdot 10^{-7} \frac{p_p d^4}{\rho_p Q_p^2} + 1,24 \cdot 10^{-3} \frac{\mu_w}{\mu_p} - 0,33 \frac{g d^5}{Q_p^2} \right) Q_p \quad (28)$$

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiarów wydajności powietrznego podnośnika cieczy ( $Q_w$ ) w zależności od ciśnienia powietrza ( $p_p$ ) przy badanych wysokościach podnoszenia ( $H$ ), a także wyniki obliczeń wykonanych za pomocą wzorów (24)–(28). Zależność funkcyjna między natężeniem przepływu wody a ciśnieniem powietrza miała tendencję nieliniową w zakresie wartości  $Q_w$  otrzymanych z pomiarów i obliczeń za pomocą wzorów (24)–(28). Odchyłki wartości  $Q_w$  otrzymanych z obliczeń w stosunku do wartości otrzymanych z pomiarów przy badanych wysokościach podnoszenia były małe. Typ trendu (regresji) był wielomianem drugiego stopnia w zakresie wartości natężenia przepływu wody otrzymanych z obliczeń za pomocą wzorów oraz wartości otrzymanych z pomiarów. Linie trendu przy wartościach  $Q_w$  otrzymanych z obliczeń były nieznacznie przesunięte w stosunku do linii trendu wartości otrzymanych z pomiarów. Na tym rysunku zamieszczono także pary współczynników determinacji z próby ( $R^2$ ). Mniejsze wartości współczynnika  $R^2$  dotyczą pomierzonych wartości  $Q_w$ , a wartości większe – obliczonych za pomocą wzorów (24)–(28). Wartości współczynnika  $R^2$  były powyżej 0,90, co wskazuje, że natężenie przepływu wody



Rys. 4. Zależność natężenia przepływu wody od ciśnienia powietrza według pomiarów i obliczeń

Fig. 4. Correlation between the water flow rate and the air pressure from the measured and calculated data

w powietrznym podnośniku cieczy w co najmniej 90% zależało głównie od ciśnienia powietrza, a tym samym natężenia przepływu powietrza i wysokości podnoszenia wody, a tylko w 10% od pozostałych czynników, takich jak gęstość wody i powietrza czy przyspieszenie ziemskie.

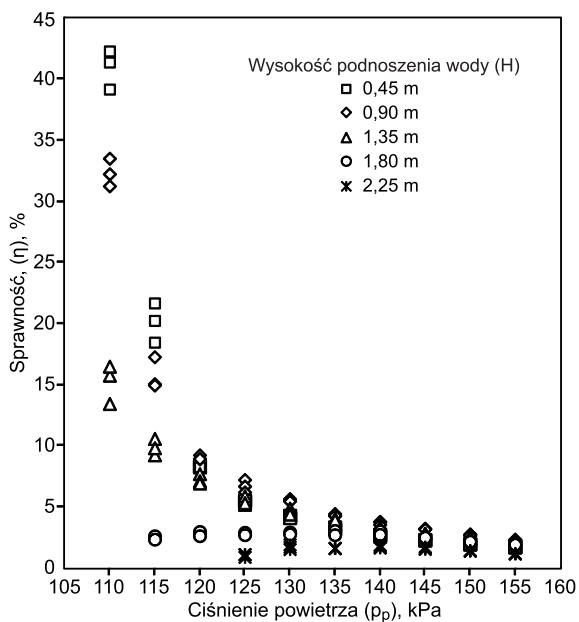
Aby ocenić dokładność wzorów (24)–(28) porównano obliczone wartości  $Q_w$  z wartościami pomierzonymi na stanowisku pomiarowym. Stwierdzono, że w następujących zakresach wartości poszczególnych parametrów:

- $d=0,04\text{ m}$ ,  $110\text{ kPa} < p_p < 155\text{ kPa}$ ,
- $0,60\text{ m}^3/\text{h} < Q_w < 21,00\text{ m}^3/\text{h}$ ,
- $1,08\text{ m}^3/\text{h} < Q_p < 7,76\text{ m}^3/\text{h}$ ,
- $1,2234\text{ kg}/\text{m}^3 < \rho_p < 1,2346\text{ kg}/\text{m}^3$ ,
- $999,0844\text{ kg}/\text{m}^3 < \rho_w < 999,5828\text{ kg}/\text{m}^3$ ,
- $1,1508 \cdot 10^{-3}\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}) < \mu_w < 1,2048 \cdot 10^{-3}\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ,
- $1,7730 \cdot 10^{-5}\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}) < \mu_p < 1,7870 \cdot 10^{-5}\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ,

średnia odchyłka wartości  $Q_w$  nie przekraczała 2% przy wysokości podnoszenia wody  $H=0,45\text{ m}$ , 5% przy  $H=0,90\text{ m}$  i  $H=1,35\text{ m}$ , 7% przy  $H=1,80\text{ m}$  oraz 6% przy  $H=2,25\text{ m}$ . Analiza wymiarów wzorów (24)–(28) wykazała, że wymiary obu stron wzorów były zgodne.

Wykorzystując wyniki pomiarów za pomocą wzoru (1) obliczono następnie sprawność powietrznego podnośnika. Analizując otrzymane wyniki (rys. 5) można stwierdzić, że sprawność ( $\eta$ ) tego podnośnika, wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza ( $p_p$ ), a tym samym i natężenia przepływu powietrza ( $Q_p$ ), malała bardzo szybko prawie do zera. Spowodowane to było tym, że gdy wzrastało ciśnienie powietrza, a tym samym natężenie przepływu powietrza, to w rurociągu tłocznym podnośnika tworzyło się więcej pęcherzyków powietrza, które zajmowały większą przestrzeń w polu przekroju rurociągu tłocznego, a wtedy malała przestrzeń, którą zajmowała woda. Jednakże zwiększenie natężenia przepływu powietrza w rurociągu tłocznym powodowało wzrost natężenia przepływu wody, co z kolei powodowało zwiększenie tarcia i spadek sprawności urządzenia. Również sprawność podnośnika cieczy malała wraz ze wzrostem wysokości podnoszenia wody, co było spowodowane wzrostem liniowych oporów hydraulicznych na długości rurociągu tłocznego i spadkiem natężenia przepływu wody.





Rys. 5. Zależność sprawności powietrznego podnośnika cieczy od ciśnienia powietrza i wysokości podnoszenia wody  
 Fig. 5. Correlation between efficiency of the air-lift pump and the air pressure as well as water delivery head

## Podsumowanie

W analizowanym powietrznym podnośniku cieczy natężenie przepływu powietrza zwiększało się wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza. Również natężenie przepływu wody rosło wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza i wzrostem natężenia przepływu powietrza. Im mniejsze były straty hydrauliczne powstające podczas przepływu strumienia powietrza przez mieszacz powietrzno-wodny, tym wydajność powietrznego podnośnika cieczy była większa. Wraz ze wzrostem wysokości podnoszenia wody wydajność powietrznego podnośnika cieczy malała. Wartości natężenia przepływu wody obliczone za pomocą wyprowadzonych wzorów (24)–(28) bardzo dobrze pokrywały się z wartościami wyznaczonymi z bezpośrednich pomiarów. W związku z tym wzory te mogą być wykorzystywane do projektowania powietrznych podnośników cieczy z mieszaczem powietrzno-wodnym przedstawionym na rysunku 2. Największą sprawność powietrznego podnośnika cieczy osiągnął przy wysokości podnoszenia równej 0,45 m, a najmniejszą przy 2,25 m. Sprawność podnośnika powietrznego cieczy malała wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza, natężenia przepływu powietrza i wysokości podnoszenia wody.

W przypadku badanego powietrznego podnośnika cieczy o średnicy rurociągu tłocznego równej 0,04 m, z zastosowanym mieszaczem powietrzno-wodnym, natężenie przepływu wody zwiększało się wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza od 110 kPa do 145 kPa, natomiast w przypadku wyższych ciśnień powietrza natężenie przepływu wody zaczynało spadać. W związku z tym zaleca się, aby ciśnienie powietrza w tego typu urządzeniu nie było mniejsze niż 110 kPa i nie przekraczało 145 kPa.

Ze względu na drobnopęcherzykowy charakter przepływu powietrza w rurociągu tłocznym, który wywoływany jest przez mieszacz powietrzno-wodny, powietrzne podnośniki cieczy z tego typu mieszaczami mogą być z powodzeniem wykorzystywane na przykład do mieszania i napowietrzania wody w celu usuwania dwutlenku węgla.

## LITERATURA

- Z. HEIDRICH, M. KALENIK, J. PODEDWORNA, G. STAŃKO: Sanitacja wsi. Wydawnictwo Seidel-Przywrecki, Warszawa 2008.
- M. KALENIK: Zaopatrzenie w wodę i odprowadzanie ścieków. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2015.
- J. MIKOSZ, Z. MUCHA: Weryfikacja założeń do projektu modernizacji małej oczyszczalni ścieków z uwzględnieniem nowej interpretacji wymagań prawnych (Validation of design assumptions for small wastewater treatment plant modernization in line with new interpretation of legal requirements). *Ochrona Środowiska* 2014, vol. 36, nr 1, ss. 45–49.
- T. SOLECKI: Analiza i ocena możliwości renowacji odwiertu w uzdrowisku Polczyn. *Wiertnictwo Nafta Gaz* 2010, t. 27, nr 3, ss. 617–627.
- B. BARRUT, J.-P. BLANCHETON, J.-Y. CHAMPAGNE, A. GRAMMICK: 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.
- N. C. PARKER: Airlift pumps and other aeration techniques. In: C. S. TUCKER [Ed.]: Water quality in channel catfish ponds, Southern Cooperative Series Bulletin 290, Mississippi Agriculture and Forestry Experiment Station, Mississippi State University, Mississippi 1983, pp. 24–27.
- 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.
- J. M. de CACHARD, F. 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: 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.
- 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.
- B. KAZIMIERCZAK: Modelowanie matematyczne przelewu burzowego z cylindrycznym regulatorem wirowym odpływu. *Rocznik Ochrona Środowiska* 2013, vol. 15, ss. 2158–2174.
- M. KALENIK: Empirical formulas for calculation of negative pressure difference in vacuum pipelines. *Water* 2015, Vol. 7, No. 10, pp. 5284–5304.
- 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.

19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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. I. I. ESEN: Experimental investigation of a rectangular air lift pump. *Advances in Civil Engineering* 2010, doi:10.1155/2010/789547.
27. 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.
28. H. TIGHZERT, M. BRAHIMI, N. KECHROUD, F. BENABAS: 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.
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. D. J. NICKLIN: The air lift pump: Theory and optimization. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 1963, Vol. 41, pp. 29–39.
32. M. KALENIK, P. PRZYBYLSKI: Eksperymentalne badania hydraulicznych warunków pracy powietrznego podnośnika. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2011, nr 6, ss. 219–223.
33. W. KASPRZAK, B. RYSIK: *Analiza wymiarowa. Algorytmiczne procedury obsługi eksperymentu*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988.
34. L. MULLER: *Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli*. PWN, Warszawa 1983.
35. M. KOKAR: Zarys procedury formułowania praw fizycznych w języku analizy wymiarowej. *Inżynieria Chemiczna* 1979, vol. 9, nr 2, ss. 361–369.
36. Z. ORZECZOWSKI, J. PRYWER, R. ZARZYCKI: *Zadania z mechaniki płynów w inżynierii środowiska*. WNT, Warszawa 2001.
37. STATISTICA 6. Program komputerowy. StatSoft Polska sp. z o. o., Kraków 2006.

**Kalenik, M. Model Studies of Air-Lift Pump Efficiency. *Ochrona Środowiska* 2015, Vol. 37, No. 4, pp. 39–46.**

**Abstract:** Results of model capacity studies of an air-lift pump employed in water mixing and aeration systems were discussed. The studies covered derivation of equations for the pump capacity characteristics at different water heads (H) and its efficiency ( $\eta$ ) determination. The capacity ( $Q_w$ ) studies were performed for the delivery pipe internal diameter of  $d=0.04$  m and water delivery heads of 0.45 m, 0.90 m, 1.35 m, 1.80 m and 2.25 m. The air flow rate ( $Q_p$ ) was demonstrated to increase with increasing air pressure ( $p_p$ ), while the water flow rate ( $Q_w$ ) increased with rise in both the air pressure and

air flow rate. Additionally, the lower were the hydraulic losses generated by the air flux in the air-water mixer, the higher was the air-lift pump capacity. It decreased along with the rise in the water delivery head. The highest efficiency of the air-lift pump was reached for the water delivery head of  $H=0.45$  m while the lowest – of  $H=2.25$  m. The air-lift pump efficiency decreased with the increasing air pressure, air flow rate and water delivery head. The theoretical water flow rate values calculated using the derived formulas coincided very well with the measured values.

**Keywords:** Aeration, air-lift pump, air-water mixer, water flow, air flow, air pressure.