

Pomiar przepływu strumienia ścieków za pomocą przepływomierza zwężkowego o regulowanym przewężeniu

Streszczenie. Ścieki wymagają zastosowania przepływomierzy o dużym zakresie pomiarowym. Ze względu na przepływ frakcji stałych powinny to być metody odporne na osadzanie się frakcji stałych w przestrzeni pomiarowej przepływomierza. W pracy przedstawiono rozwiązanie przepływomierza, które może mieć zastosowanie do pomiaru ścieków w kanałach otwartych i zamkniętych w szerokim zakresie pomiarowym. Rozwiązanie umożliwia samooczyszczanie kanału pomiarowego.

Abstract. Wastewater requires the use of flow meters with a large measuring range. Due to the flow of solids, these methods should be resistant to deposition of solids in the measuring space of the flowmeter. The paper presents a flow meter solution that can be used to measure sewage in open and closed channels in a wide measuring range. Moreover, this solution enables the use of a self-cleaning mechanism for the measuring channel. (*Wastewater flow measurement with adjustable sludge flow meter*)

Słowa kluczowe: pomiar strumienia ścieków, przepływomierz zwężkowy, pomiar strumienia w kanały otwartych i zamkniętych.

Keywords: wastewater flow measurement, orifice flow meter, flow measurement in open and closed channels.

Wstęp

Ścieki stanowią zużyte ciecze, roztwory, koloidy lub zawiesiny, które powstały po zaopatrzeniu mieszkańców lub podmiotów gospodarczych w wodę. Powstają one w wyniku działalności produkcyjnej człowieka lub działań bytowych człowieka. Ścieki dzieli się ze względu na źródło pochodzenia na: bytowe, przemysłowe, opadowe i komunalne [1].

Różnicowanie ścieków pod względem składu chemicznego powoduje, że rozróżnia się ścieki toksyczne i agresywne chemicznie. Ponadto ścieki niejednokrotnie zawierają frakcje stałe o zróżnicowanej wielkości i kształcie (rys.1), co znacznie utrudnia skonstruowanie uniwersalnych przepływomierzy. Dużym utrudnieniem jest przemieszczanie się cząstek stałych. W zależności od wielkości i gęstości frakcji stałej, frakcja ta może poruszać się wraz z cieczą w kanałach poziomych na różnych wysokościach zanurzenia. Cząstki o dużych wymiarach i dużej gęstości zazwyczaj poruszają się przy dnie rurociągu przelatując się ze znacznie mniejszą prędkością niż średnia prędkość poruszającej się cieczy. Duże cząstki o gęstości mniejszej od gęstości cieczy poruszają się przy powierzchni cieczy lub na niej pływają, ich prędkość także różni się od prędkości cieczy. Cząstki stanowiące zawiesinę lub częściowo rozpuszczone w cieczy zazwyczaj poruszają się w całej objętości cieczy z prędkością zbliżoną do prędkości cieczy.



Rys.1. Podział frakcji stałej w ściekach

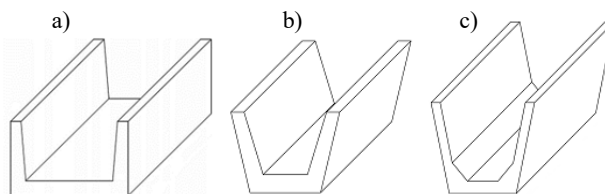
Duże zróżnicowanie ścieków wymusza potrzebę poszukiwania uniwersalnych metod pomiarowych [2]. Szczególnie ważne jest poszukiwanie metod do pomiaru strumienia ścieków zawierających cząstki stałe o różnych wymiarach i gęstościach. W pracy zaproponowano rozwiązanie umożliwiające pomiar tego rodzaju ścieków w szerokim zakresie pomiarowym.

Przepływ ścieków w szczególności komunalnych charakteryzuje się bardzo dużym zakresem przepływu. W różnych godzinach w ciągu doby przepływ może zanikać

prawie do zera lub osiągać graniczne dopuszczalne wartości. Przepływomierze powinny umożliwiać zmianę zakresu pomiarowego bez konieczności zatrzymywania przepływu w kanałach ściekowych.

W typowych instalacjach ściekowych stosuje się zróżnicowane kształty kanałów [3]. Kanały ściekowe mogą być zamknięte i otwarte. Ponieważ spływ ścieków zazwyczaj jest grawitacyjny to przekroje kanałów zamkniętych są dobierane z dużym nadmiarem co powoduje, że rzadko ścieki płyną całym przekrojem poprzecznym kanału. Najczęściej jest to przepływ z powierzchnią swobodną. Zaproponowana w pracy metoda pomiarowa może mieć zastosowanie zarówno do kanałów zamkniętych z przepływem ścieków w całej objętości kanału lub przepływem z powierzchnią swobodną oraz w kanałach otwartych.

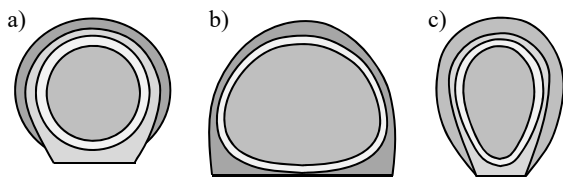
W praktyce do budowy kanałów otwartych najczęściej stosuje się różnego rodzaju prefabrykaty (rys.2). Koryta o przekroju prostokątnym (rys.2a) są stosowane do przepływu dużych strumieni ścieków, gdyż przy małych prędkościach ruchu cieczy, na dnie kanału osadza się duża ilość cząstek stałych tworząc zatory. Koryta o przekroju trapezowym (rys.2b) w pewnym stopniu redukują tę niedogodność, jednak w dalszym ciągu występuje tu osiadanie cząstek stałych przy małych strumieniach przepływu. Trudniejsze do wykonania są kanały typu Krakowskiego (rys.2c), jednak o znacznie lepszych własnościach dla małych strumieni przepływu ścieków.



Rys.2. Typowe prefabrykaty stosowane do budowy kanałów otwartych

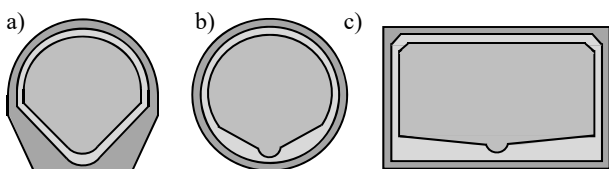
Typowe kształty kanałów zamkniętych przedstawiono na rysunku 3. Ścieki w takich kanałach prawie nigdy nie płyną całym przekrojem kanału. Dla małych przepływów stosuje się kanały o przekroju kołowym (rys.4a). Z kolei dla większych przepływów, w celu zmniejszenia oporów stosuje się kanały o kształcie dzwonowym (rys.4b). W obu przypadkach, dno kanału jest sferyczne, co zapobiega

osiadaniu cząstek stałych przy mniejszych strumieniach ścieków. Natomiast, dla przepływów, w których występują duże zróżnicowania w strumieniu przepływu ścieków, stosuje się kanały o kształcie jajowatym (rys.4c).



Rys.3. Typowe kształty kanałów zamkniętych

W zastosowaniu do ścieków o bardzo zróżnicowanych wartościach strumieni, szczególnie ścieków komunalnych stosuje się kształty kanałów zamkniętych przedstawione na rysunku 4. W celu zapobiegania osadzaniu się frakcji stałej przy małych strumieniach ścieków mają zastosowanie kanały o przekroju kołowo-trójkątnym (rys.4a). Jednak przyrost wysokości wypełnienia kanału jest bardzo duży wraz ze zmianą strumienia. Ogranicza to możliwość zastosowanie tego rodzaju kanałów w szerokim zakresie strumieni płynących ścieków. Z tego względu dużą popularnością cieszą się kanały z kinetą (rys.4b) i (rys.4c).



Rys.4. Typowe kształty kanałów zamkniętych stosowane do przepływu ściekowych komunalnych

Standardowe zwężkowe metody pomiarowe

Metody zwężkowe polegają na wprowadzeniu do kanału mierniczego elementu zmniejszającego miejscowo pole przekroju poprzecznego kanału. W wyniku zmniejszenia przekroju poprzecznego na długości przewężenia powstaje wzrost prędkości ruchu płynu oraz wzrost ciśnienia. Wartość ciśnienia różnicowego przed i za przewężeniem stanowi miarę strumienia przepływającego płynu. Strumień oblicza się na podstawie zmierzonego ciśnienia różnicowego uwzględniając: aktualne parametry płynu, wymiary geometryczne rurociągu i przewężenia oraz współczynnik przepływu:

$$(1) \quad q_v = AC \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

gdzie: q_v – strumień objętościowy płynu, A – pole przekroju poprzecznego przewężenia, C – współczynnik przepływu, Δp – ciśnienie różnicowe, ρ – gęstość płynu.

Rozwiązanie to można stosować zarówno do kanałów otwartych jak i zamkniętych (rys.5). W kanałach zamkniętych często stosuje się różnego rodzaju kryzy segmentowe lub asymetryczne [4] (rys.5a). Otwór w kryzie najczęściej znajduje się przy dnie kanału, aby cząstki stałe mogły swobodnie przepływać nie tworząc zatorów. W przypadku cieczy, w których jest dużo cząstek unoszonych na powierzchni, dopuszczalne jest montowanie kryz w odwrotny sposób. Rozwiązanie to jednak nie nadają się do pomiaru ścieków o nieznanym rozkładzie frakcyjnym i sposobie przemieszczania się frakcji.

W przypadku kanałów otwartych najczęściej stosuje się różnego rodzaju przewężenia najczęściej na powierzchni bocznej kanału [5] (rys.5b). Niejednokrotnie do obliczenia strumienia zamiast pomiaru różnicy ciśnień mierzy się

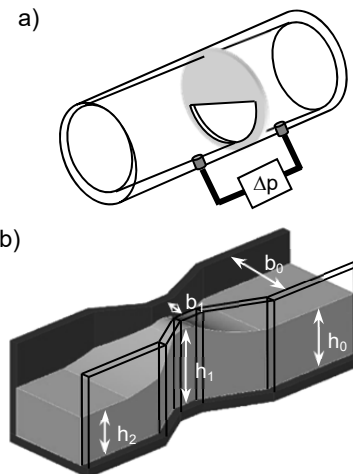
wysokość spiętrzenia cieczy, która jest proporcjonalna do zmian ciśnienia różnicowego [6].

$$(2) \quad Q = \frac{c}{\sqrt{1-m^2}} b_1 h_1 \sqrt{2g(h_1 - h_0)}$$

gdzie:

$$(3) \quad m = \frac{b_1 h_1}{b_0 h_0}$$

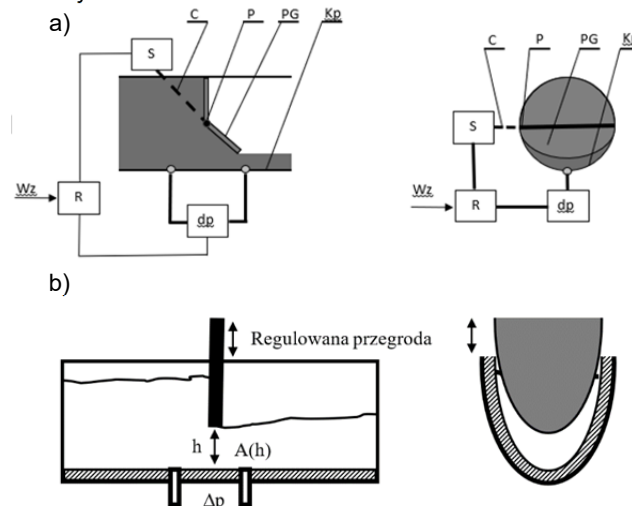
Generalną wadą metod zwężkowych jest stosunkowo wąski zakres pomiarowy.



Rys.5. Przepływomierze zwężkowe a) w kanałach zamkniętych b) w kanałach otwartych

Metoda pomiaru z regulowanym przewężeniem

Zaproponowana w pracy metoda polega na wprowadzeniu do kanału przegrody umożliwiającej zmianę położenia w taki sposób, aby uzyskać różne wartości przekroju poprzecznego przewężenia (rys.6). Przegroda jest dopasowana do kształtu kanału. Rozwiązanie może mieć zastosowanie zarówno do kanałów zamkniętych jak i otwartych.



Rys.6. Metoda pomiaru z regulowanym przewężeniem kanału a) w kanałach zamkniętych b) w kanałach otwartych

W odróżnieniu od dotychczas stosowanych metod pomiarowych z zastosowaniem zwężek pomiarowych, wartością mierzoną, na podstawie której jest obliczany strumień, jest zmieniające się pole przekroju poprzecznego przewężenia. Stąd, wzór na obliczenie strumienia objętościowego płynu, będzie miał postać:

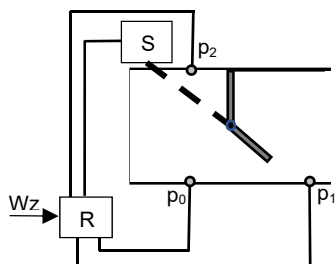
$$(4) \quad Q = B(h) A(h) \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

gdzie: $B(h)$ – zależność funkcjonalna wyznaczona eksperymentalnie dla każdego kanału, $A(h)$ – pole powierzchni otworu przepływowego w funkcji wysokości h podniesienia przegrody.

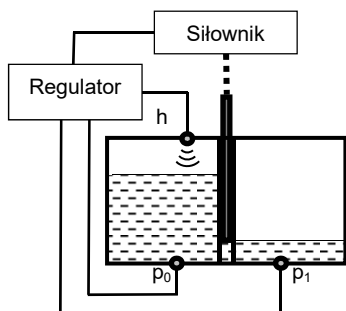
Zasada działania układu do wyznaczania strumieni ścieków polega na tym, że przegroda zawiera część nieruchomą i część ruchomą połączoną z wałem na stałe i usytuowaną przegubowo w ścianie odcinka pomiarowego kanału przepływowego (rys.6a). Część nieruchoma przegrody P połączona na stałe z kanałem przepływowym, a część ruchoma przegrody PG połączona jest z siłownikiem S za pomocą ciągną C umożliwiającym zmianę kąta wychylenia. Przegroda o kształcie dopasowanym do kształtu przekroju poprzecznego odcinka pomiarowego kanału przepływowego odchylana jest kątowno w kierunku przepływu w zakresie od 0° do 90° . Siłownik wahadłowy S sterowany jest za pomocą regulatora R. Czujnik ciśnienia różnicowego Δp zamontowano w dolnej części kanału przepływowego K_p , tak, aby mierzył on różnicę ciśnień przed i za przegrodą.

Podobnie ma to miejsce w kanałach otwartych, z tą różnicą, że regulacja przewężenia polega na podnoszeniu przegrody (rys.6b). Pomiar polega na takim regulowaniu przesuwnej przegrody, aby uzyskać stałą wartość ciśnienia różnicowego, niezależnie od wartości strumienia płynu. Takie rozwiązanie znacznie poszerza zakres pomiarowy. W celu zmiany zakresu pomiarowego, wystarczy jedynie zmienić zadaną wartość ciśnienia różnicowego Δp , co prowadzi do zmiany wysokości przegrody.

a)



b)



Rys.7. Schemat układu sterowania a) w kanałach zamkniętych b) w kanałach otwartych

Regulacja przegrodą wymaga zastosowania odpowiedniego układu sterowania. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowy schemat blokowy takiego układu. Wysokość podniesienia przegrody jest regulowana siłownikiem, którego nastawy określa regulator. Regulatorem może być sterownik PLC. Wysokość ustawienia przegrody określana jest na podstawie zmierzonych wartości ciśnień p_0 i p_1 . W modelowym rozwiązaniu zastosowano układ regulacji trójstanowej z 5% histerezą. Po ustabilizowaniu się przepływu oblicza się

strumień przepływającego płynu, na podstawie ustawionej wysokości przegrody (wzór 4). W równaniu tym konieczna jest znajomość gęstości przepływającej cieczy. W przypadku ścieków zawierających znaczną ilość zanieczyszczeń gęstość może znacząco różnić się od gęstości wody. Ponadto gęstość ścieków ulega zmianie w czasie pomiaru. Z tego powodu zachodzi konieczność określania gęstości cieczy na bieżąco. W przypadku kanałów zamkniętych całkowicie wypełnionych cieczą i o znanej wysokości kanału h , gęstość cieczy wyznacza się na podstawie różnicy ciśnień Δp w punktach p_0 i p_2 . Gęstość jest obliczana na podstawie wzoru:

$$(5) \quad \rho = \frac{\Delta p}{g h}$$

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie.

Dla kanałów otwartych wysokość słupa cieczy przed przegrodą zmienia się w zależności od strumienia przepływającej cieczy z tego względu wymagany jest pomiar wysokości. Zaproponowano pomiar wysokości słupa cieczy przed przegrodą metodą ultradźwiękową. Gęstość oblicza się z wzoru:

$$(6) \quad \rho = \frac{p_0}{g h}$$

Procedura pomiarowa polega na wprowadzeniu zadanej wartości ciśnienia różnicowego Wz do regulatora R. Następnie regulator tak steruje siłownikiem S aby uzyskać odpowiednią wartość różnicy ciśnień przed i za przegrodą. Takie rozwiązanie umożliwia wykonanie pomiaru strumienia przepływających ścieków z jednoczesnym regulowaniem przepływu. Zmiana przepływu ścieków następuje poprzez zmianę zadanej wartości ciśnienia różnicowego. Jest to szczególnie korzystne w przypadku kontrolowanego przepływu ścieków z i do zbiorników retencyjnych. Zaproponowane rozwiązanie łączy dwie istotne funkcje regulację i pomiar przepływu, co znacznie obniża koszty instalacji ściekowej.

Zapewnienie odpowiedniej szczeliny przy dnie kanału powoduje, że na długości przegrody zapewniona jest dostatecznie duża prędkość ruchu cieczy zapobiegająca osadzaniu się cząstek stałych. Jest to szczególnie istotne w okresach małego napływu ścieków (np. w godzinach nocnych dla ścieków komunalnych).

Nie wszystkie cząstki stałe znajdujące się w ściekach posiadają gęstość większą od gęstości cieczy. W przypadku cząstek o gęstości mniejszej od gęstości cieczy poruszają się one przy powierzchni cieczy i mogą tworzyć zatory w górnej części odcinka pomiarowego. Z tego względu system pomiarowy powinien być wyposażony w mechanizm samooczyszczania. Można to zrealizować w ten sposób, że w okresie przepływu ścieków o strumieniu znacznie niższym od dopuszczalnego nastąpi całkowite otwarcie kanału przepływowego umożliwiając swobodny wypływ zanieczyszczeń z przestrzeni przed przegrodą.

W przypadku kanałów otwartych regulator podnosi przegrodę na maksymalną wysokość. W kanałach zamkniętych stosuje się mechanizm zmiany położenia przegrody stałej, odchylając ją w osi kanału. W ten sposób umożliwia się swobodny odpływ zanieczyszczeń znajdujących się w górnej części kanału.

Ponieważ samooczyszczanie kanału pomiarowego przerywa pomiar, proces ten powinien być zaplanowany i uwzględniony w oprogramowaniu regulatora. W przypadku ścieków komunalnych może ono być ustalone ze stałym zadaniem krokiem czasowym z wyłączeniem okresów, w których napływ ścieków jest większy od dopuszczalnego, co uniemożliwia całkowite otwarcie przegrody.

Podsumowanie

Przedstawiona w pracy metoda przeznaczona jest do pomiaru ścieków komunalnych, dla których występują duże dobowe zmiany wartości strumienia płynących ścieków. Rozwiązanie to jest w pełni zautomatyzowane. System regulacji umożliwia automatyczne dobranie odpowiedniej zadanej różnicy ciśnienia Δp w taki sposób, aby zapewnić energooszczędną eksploatację systemu, przy zachowaniu założonej dokładności pomiaru. Ponadto taki układ, może być również stosowany do pomiaru cieczy dwufazowych w szerokim zakresie mierzonych strumieni. W porównaniu do innych metod proponowane rozwiązanie zapewnia dostateczną dokładność i niezawodność. Metoda ta nie umożliwia śledzenia ruchu frakcji stałej. Może ona być uzupełniona o system wykrywania frakcji stałej w przepływie dwufazowym. Wymaga to jednak zastosowania dodatkowego układu pomiarowego.

Dla ścieków, w których znajduje się duża ilość frakcji stałej, która porusza się z prędkością znacznie mniejszą niż ruch cieczy, można zastosować jedną z metod tomografii procesowej [7]. Rozwiązanie takie umożliwia określenie udziału objętościowego fazy stałej w cieczy oraz jej prędkość. W przypadku połączenia dwóch metod pomiarowych możliwe jest określenie zarówno strumienia płynu jak i prędkości przemieszczania się fazy stałej. W wyniku zsumowania tych strumieni można z dużą dokładnością określić strumień płynących ścieków.

Do pomiaru frakcji stałej w ściekach dobre rezultaty uzyskuje się poprzez zastosowanie objętościowej tomografii pojemnościowej [8]. Jedynym poważnym ograniczeniem jest wielkość kanału. W przypadku kanałów o dużych rozmiarach zaleca się zastosowanie absorpcyjnej tomografii radiometrycznej [9] lub metody ultradźwiękowe [10].

W celu usprawnienia procesu wyznaczanie funkcji przepływu $B(h)$, można zastosować numeryczne

modelowanie i projektowanie układów przepływowych. Przy wyznaczaniu funkcji przepływu $B(h)$ dla przepływów wielofazowych niejednokrotnie konieczne jest określenie udziału objętościowego poszczególnych frakcji.

LITERATURA

- [1] Ustawa z dnia 20 lipca 2017r. Prawo Wodne, Dz. U. 2017 poz. 1566
- [2] Piechurski F. G., Przeglądowa ocena urządzeń do pomiaru przepływu ścieków, *Napędy i sterowanie.*, (2012), No. 2, 64-70
- [3] PN-71/B-02710 z dnia 6 lipca 1971 r. Kanalizacja zewnętrzna. Przekroje poprzeczne zamkniętych kanałów ściekowych
- [4] Gondek A., Przepływomierze spiętrzające przepływ, *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, 2009
- [5] Michalski A., Sienkiewicz J., Watral Z., Metody pomiaru przepływu na małych otwartych kanałach, *Diagnostyka*, No 3 39(2006), 269–278
- [6] ISO 9826-1992 Measurement of Liquid Flow in Open Channels. Parshall and SANIIRI Flumes
- [7] Wajman R., Computer methods for non-invasive measurement and control of two-phase flows: A review study, *Information Technology and Control*, Vol. 48 (3)2019, 464-486
- [8] Banasiak R., Wajman R., Jaworski T., Fiderek P., Fidos H., Nowakowski J., Sankowski D., Study on two-phase flow regime visualization and identification using 3D electrical capacitance tomography and fuzzy-logic classification, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 58, 2014, 1-14
- [9] Zych M., Petryka L., Hanus R., Kępiński J., Pomiary prędkości przepływu mieszanin dwufazowych w kanale otwartym metodą absorpcji promieniowania gamma, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88 Nr 10a/2012, 98-100
- [10] Synowiec P., Andruszkiewicz A., Wędrychowicz W., Reguck P., Badania możliwości pomiaru strumienia objętości czynnika dwufazowego przepływomierzem ultradźwiękowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10/2015, 179–182,