

## METODY POMIARU PRZEPIYU NA MAŁYCH OTWARTYCH KANAŁACH PRZEPIYWOWYCH

Andrzej MICHALSKI<sup>1,2</sup>, Jan SIENKIEWICZ<sup>1</sup>, Zbigniew WATRAL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, [jsienkiewicz@wel.wat.edu.pl](mailto:jsienkiewicz@wel.wat.edu.pl)

<sup>2</sup>) Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych

### Streszczenie

W referacie przedstawiono potrzeby oraz metody monitorowania przepływu cieczy na małych otwartych kanałach przepływowych i sposoby realizacji tych przedsięwzięć. Główną uwagę przy pomiarze przepływu zwrócono na metody: hydrauliczne, ultradźwiękowe, elektromagnetyczne i optyczne. Omówiono zasady pomiaru natężenia przepływu cieczy tymi metodami ich wady i zalety oraz ustosunkowano się do niepewności pomiaru. Omówione także metody pomiaru przepływu i wskazano na predyspozycje poszczególnych metod do konkretnych zastosowań praktycznych.

Słowa kluczowe: przepływ, pomiar przepływu, metody pomiaru.

### EVALUATION OF FLOW MONITORING METHODS IN SMALL OPEN CHANNELS

#### Summary

Presented paper describes the needs and the methods of water flow monitoring in small open channels. The main attention in the paper was paid to hydraulic, acoustic, electromagnetic and optics methods. The good points, flaws and error analysis of the described methods are presented. The practical application and comparison of described methods are given as a summary.

Keywords: flow, flow measurement, measuring methods.

## 1. WSTĘP

Pomiar natężenia przepływu wody w kanałach otwartych jest jednym z podstawowych pomiarów dokonywanych w hydrologii. Cel prowadzonych pomiarów jest wieloraki, uzyskane wyniki wykorzystywane są między innymi do: prognozowania zagrożeń (susza, stany powodziowe itp.), sterowania zapasami wody w zbiornikach retencyjnych, prognozowania stanów pracy dla energetyki wodnej i żeglugi śródlądowej, kontrolowania stanu nawodnienia terenów objętych siecią kanałów melioracyjnych, prognozowanie stanów krytycznych na terenach polderowych.

W każdym z przedstawionych powyżej przypadków wymagane są inne dokładności pomiarów. Generalnie można liczyć się z niepewnościami pomiarów w granicach od  $\pm 1\%$  do  $\pm 10\%$  w zależności od stosowanych metod. Pomimo rozwoju wielu metod pomiarowych oraz wprowadzenia udoskonalonych narzędzi pomiarowych, w wielu przypadkach uzyskiwane niepewności pomiaru nie są satysfakcjonujące. Obserwowany rozwój narzędzi pomiarowych stosowanych w szeroko rozumianej hydrologii ma przede wszystkim na celu zwiększenie dokładności prowadzonych pomiarów oraz zapewnienie ich rzetelności. Szczególnie istotne jest to w stanach awaryjnych, (np. fala powodziowa), kiedy to dotychczasowe techniki były nieskuteczne bądź

uzyskiwany wynik pomiaru był obciążony zbyt dużą niepewnością.

W ostatnich trzydziestu latach pojawiło się szereg nowych rozwiązań technicznych wykorzystujących dotychczas nie stosowane techniki pomiarowe, takie jak optyczne, elektromagnetyczne i ultradźwiękowe. Wspólną cechą tych metod, zwanych potocznie „metodami współczesnymi”, jest wykorzystywanie zaawansowanych technik przetwarzania sygnałów w procedurze pomiarowej.

Stosowane w pomiarach przepływu metody można podzielić ze względu na ich cechy charakterystyczne na dwie podstawowe grupy wieloparametrowe i jednoparametrowe. W ramach tych grup zazwyczaj dokonuje się dodatkowego podziału uwzględniającego częstotliwość pomiarów, na metody dorywcze i ciągłe. Wśród metod wieloparametrowych dominującą metodą, zarówno w grupie pomiarów ciągłych jak i dorywczych, jest metoda *prędkość - powierzchnia*. W metodach dorywczych poza metodą *prędkość - powierzchnia* wyróżnia się metody *pływakowe* oraz metodę *spadek-powierzchnia*. W pomiarach ciągłych, w grupie metod *prędkość - powierzchnia* coraz istotniejszą rolę pełnią metody *ultradźwiękowa*, *elektromagnetyczna* oraz *optyczna* [1].

W metodach jednoparametrowych stosuje się analogiczny podział na metody dorywcze i ciągłe. W grupie metod dorywczych wyróżnia się dwie metody, metodę *rozcieńczenia wskaźnika* i metodę

objętościową. Do grupy pomiarów ciągłych zalicza się metody hydrauliczne spiętrzeniowe i zwężkowe. W ramach tej podgrupy, występujący podział związany jest z rodzajem wykorzystywanej budowli hydrologicznej: przelewy miernicze cienkościenne, przelewy miernicze o szerokiej koronie, zwężkowe koryta pomiarowe i przelewy swobodne.

Zakres stosowności omawianych metod jest bardzo różny: od bardzo małych cieków naturalnych lub sztucznych kanałów przepływowych do rzek o szerokościach niekiedy osiągających setki metrów. Wybór metody dla danego stanowiska pomiarowego związany jest zawsze z określeniem oczekiwań związanych z jakością prowadzonych obserwacji.

Wśród tzw. współczesnych metod pomiaru przepływu wyróżnia się trzy podstawowe grupy metod: ultradźwiękową, optyczną i elektromagnetyczną. Wszystkie te metody należą do grupy metod *prędkość – powierzchnia*. Wśród tych metod dwie znajdują szerokie zastosowanie zarówno w praktyce terenowej jak i laboratoryjnej, są to metoda elektromagnetyczna i metoda ultradźwiękowa. Grupa metod optycznych znajduje się na początkowym etapie rozwoju, w zastosowaniu do cieków naturalnych, szczególnie, jeżeli analizuje się technikę PIV (ang. *Particle Image Velocimetry*). Dotychczas metody optyczne znajdowały główne swoje zastosowanie w pomiarach pól prędkości w sztucznych, laboratoryjnych kanałach przepływowych. Ostatnie 5 lat pokazuje, że można je z powodzeniem stosować w aplikacjach terenowych, na dużych rzekach lub naturalnych kanałach przepływowych.

Wszystkie wspomniane grupy metod pozwalają na ciągły pomiar prędkości medium, który jest dalej wykorzystywana w obliczeniach przepływu. Zasadnicza różnica pomiędzy nimi wynika ze zdolności do integracji pola prędkości. W tym aspekcie bezkonkurencyjna jest metoda elektromagnetyczna, której jedną z istotniejszych zalet jest naturalna możliwość integracji pionowej i poziomej pola prędkości w ustalonej strefie pomiarowej. Metoda ultradźwiękowa nie zapewnia integracji prędkości w całym przekroju pomiarowym kanału przepływowego, a jedynie uśrednia mierzoną prędkość na drodze ścieżki ultradźwiękowej w pionie lub w poziomie. Metoda optyczna ze swojej zasady mierzy prędkość punktową niezależnie od techniki LDA (ang. *Laser Doppler Anemometry*) czy PIV. Jednak wykorzystując zaawansowane algorytmy przetwarzania sygnałów pomiarowych (PIV) lub odpowiedni osprzęt pomiarowy (LDA) uzyskuje się możliwość przestrzennej integracji pola prędkości. Cechą wspólną wszystkich trzech wspomnianych metod jest elektryczna postać wyjściowego sygnału pomiarowego, co znacznie zwiększa możliwości ich wykorzystania w z informatyzowanych systemach kontrolno – pomiarowych [2].

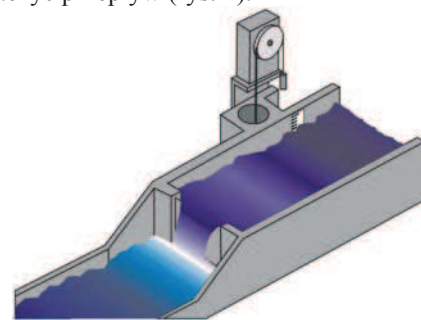
Przedstawiony w artykule opis metod pomiaru przepływu w kanałach otwartych ma na celu

przeprowadzenie analizy przydatności każdej z omawianych metod do pomiaru przepływu w małych kanałach przepływowych, którymi mogą być kanały irygacyjne, małe ciek naturalne czy kanały dolotowe w oczyszczalniach ścieków.

## 2. METODY HYDRAULICZNE POMIARU PRZEPLYWU

Metody hydrauliczne pomiaru natężenia przepływu wykorzystują zależności przepustowości przelewu, kanału ze zwężką lub innej budowli od jego napełnienia. Metody te znajdują główne zastosowanie w pomiarach na małych ciekach, kanałach melioracyjnych, przemysłowych kanałach zrzutowych itp. Pomiar wysokości spiętrzenia ponad krawędzią lub koroną przelewu daje informację o aktualnym przepływie w danym przekroju pomiarowym. W praktyce pomiarowej wyróżnia się cztery podstawowe typy konstrukcji przepływomierzy hydraulicznych: przelewy miernicze cienkościenne, przelewy z profilem praktycznym, zwężkowe kanały pomiarowe i swobodne przelewy [3, 4].

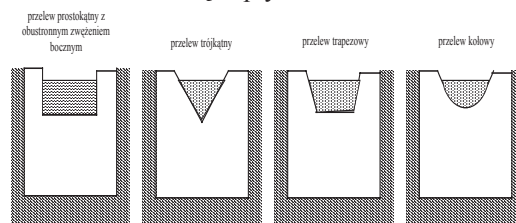
Przelewy miernicze cienkościenne wykonane są w postaci cienkiej płyty ustawionej prostopadle do dna, nad krawędzią, której przepływa woda. Mierząc wysokość poziomu wody ponad krawędzią można wyznaczyć przepływ (rys. 1).



Rys. 1. Przelew z ostrą krawędzią

Rozróżnia się pięć podstawowych typów przelewów cienkościennych: prostokątny bez zwężenia bocznego, prostokątny z obustronnym zwężeniem bocznym, trójkątny, trapezowy i półokrągły (rys. 2).

Przelew podlega laboratoryjnemu wzorcowaniu, w wyniku, którego uzyskuje się empiryczną relację pomiędzy wysokością spiętrzenia ponad krawędzią przelewu a wartością odpływu.

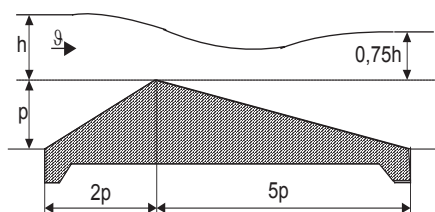


Rys. 2. Przelewy miernicze cienkościenne

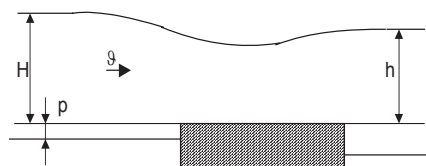
Przelewy miernicze cienkościenne są stosowane w kanałach o szerokości do 5 m i głębokości do 1 m. Zakres mierzonych przepływów wynosi od zera do kilku metrów sześciennych na sekundę. Niepewność pomiaru przepływu nie przekracza  $\pm 1\%$  (dla przelewu trójkątnego).

Spośród przelewów z tzw. profilem praktycznym do pomiarów przepływu wody najszersze zastosowanie znajdują dwa typy, przelew o przekroju trójkątnym typu Crumpa oraz przelew o szerokiej koronie (rys. 3). Podstawową zaletą przelewu Crumpa jest stałość współczynnika wydatku w dużym przedziale pomiarowym, wysoki współczynnik zatopienia oraz duża zdolność tranzytu rumowiska dennego. Na większych ciekach, w celu otrzymania dostatecznej dokładności pomiaru przelewem Crumpa, jest stosowany w praktyce podział całego przelewu na kilka sekcji, których korony znajdują się na różnych poziomach. Sekcje te oddzielone są od siebie betonowymi przegrodami.

a)



b)



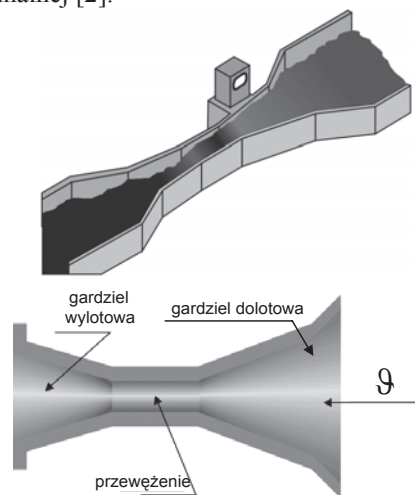
Rys. 3. Przelewy z profilem praktycznym

a) przelew trójkątny Crumpa, b) przelew o szerokiej koronie (p – wysokość przelewu)

Przelewy o szerokiej koronie są stosunkowo rzadko stosowane w praktyce pomiarowej.

W praktyce pomiarowej metod zwężkowych wykorzystuje się trzy typy zwężkowych kanałów pomiarowych, Venturiego, Parshalla oraz Saniiri (rys. 4.) Wprowadzając w sposób sztuczny zwężenie ścian kanału przepływowego uzyskuje się spiętrzenie stanu wody powyżej zawężenia koryta. Wartość przepływu jest określana w oparciu o pomiar poziomu wody powyżej miejsca zawężenia. Relacja pomiędzy poziomem i przepływem jest ustalana teoretycznie oraz metodą wzorcowania. Koryta te budowane są o prostokątnym lub trapezowym przekroju zwężki. Zakres pomiarowy koryt wynosi od  $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$  do kilku  $\text{m}^3/\text{s}$  w zależności od rozmiarów koryta. Jeden rozmiar koryta Parshalla ma zakres pomiarowy 1: 30, zaś koryta Venturiego 1: 100.

Kanały pomiarowe mają pewną zdolność tranzytu rumowiska dennego oraz wysoki współczynnik zatopienia do 75%. Najbardziej rozpowszechnione są kanały Venturiego, głównie w pomiarach przemysłowych oraz gospodarce komunalnej [2].



Rys. 4. Zwężkowe koryta pomiarowe

### 3. METODY ULTRADŹWIĘKOWE

Metoda ultradźwiękowa, zwana również metodą akustyczną, bazuje na analizie wpływu strumienia mierzonej cieczy na warunki propagacji fali ultradźwiękowej transmitowanej w strefie pomiarowej kanału przepływowego. Metoda ta wyróżnia się na tle innych metod szeregiem niezaprzeczalnych zalet:

- Nie wprowadza do przekroju pomiarowego żadnych zakłóceń w postaci struktur technicznych utrudniających potencjalną żeglugę, nie deformuje bryły przepływu poprzez obecność urządzeń pomiarowych.
- Umożliwia pomiar ciągły przy zapewnieniu integracji prędkości punktowych występujących na drodze ścieżki przelotu fali ultradźwiękowej oraz co wynika bezpośrednio z ciągłości pracy, jest naturalnie przystosowana do monitorowania chwilowych zmian prędkości (np. wezbrań).
- Umożliwia pomiar w bardzo szerokich granicach mierzonych prędkości, począwszy od milimetrów na sekundę, przy jednoczesnym braku jednoznacznie określonej granicy górnej mierzonej prędkości.
- Może być wykorzystywana do pomiaru przepływów cechujących się występowaniem zmiennego kierunku (np. spowodowanego występowaniem cofki).
- Zapewnia dobrą dokładność pomiaru, np. dla kanału przemysłowego niepewność pomiaru nie przekracza 0,5%, dla cieku naturalnego ok. 1%.
- Nie wymaga okresowej kalibracji.
- Wielkością wyjściową proporcjonalną do mierzonej prędkości jest sygnał elektryczny, co w sposób oczywisty ułatwia wykorzystanie

metody w terytorialnie rozproszonych komputerowych systemach kontrolno – pomiarowych.

- Koszt instalacji nie zależy od szerokości kanału przepływowego.

Szerokość kanałów przepływowych, które mogą być objęte ultradźwiękowym pomiarem prędkości, jest limitowana jedynie tłumiennością środowiska, w którym propagowana jest fala ultradźwiękowa. Typowym miejscem aplikacji ultradźwiękowej metody pomiaru przepływu, podobnie jak ma to miejsce w przypadku metody elektromagnetycznej, jest przekrój, gdzie brak jest zdeterminowanej relacji poziom – przepływ oraz istnieje możliwość występowania przepływów zwrotnych, nie ma możliwości, lub jest to ekonomicznie nieuzasadnione, budowy konstrukcji hydrotechnicznych. Jednak jak każda inna metoda nie jest pozbawiona wad. Jednym z zasadniczych problemów jest wpływ występujących gradientów temperatury lub stopnia zasolenia wzdłuż drogi przebiegu wiązki ultradźwiękowej na dokładność pomiaru. Dodatkowo sygnał ultradźwiękowy może być tłumiony przez zawiesiny występujące w przekroju hydrometrycznym, zaś ruchome dno w ciekach naturalnych może zmieniać charakterystykę przekroju pomiarowego, co w efekcie doprowadza do błędów w wyznaczaniu przepływu [5].

Wykorzystanie fali ultradźwiękowej do pomiaru przepływu (prędkości przepływu) opiera się na czterech podstawowych metodach:

- metodzie wykorzystującej różnicę czasów przejścia impulsu ultradźwiękowego w kierunku zgodnym i przeciwnym do kierunku płynącej wody,
- metodzie wykorzystującej zjawisko Dopplera,
- metodzie wykorzystującej zjawisko unoszenia impulsu ultradźwiękowego przez poruszające się środowisko,
- metodzie wykorzystującej zjawisko skorelowania szumów w dwóch odległych od siebie miejscach.

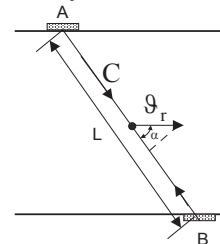
Pierwsza z metod wykorzystuje zmiany prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych (w kierunku innym niż prostopadły) w ośrodku poruszającym się z prędkością  $\mathcal{Q}_r$  (rys. 5). Zmierzony czas przejścia impulsu na znanej długości drogi będzie różnił się od czasu jego przejścia w wodzie stojącej o tej samej temperaturze, zasoleniu, koncentracji rumowiska i głębokości. W metodzie tej informacja pomiarowa o prędkości mierzonego medium może być zawarta w różnicy czasów przebiegu fali ultradźwiękowej pod prąd i z prądem mierzonego medium, w różnicy faz odbieranych sygnałów lub w różnicy częstotliwości powtarzania impulsów (metoda krążącego impulsu).

Dla metody różnic czasów przebiegu fali ultradźwiękowej, czas przejścia impulsu

ultradźwiękowego  $t^+$  w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wody (rys. 5 A → B) będzie krótszy niż w przypadku pokonania takiej samej odległości w wodzie stojącej

$$t^+ = \frac{L}{C_w + \mathcal{Q}_r \cos \alpha} \quad (1)$$

gdzie:  $L$  – długość ścieżki akustycznej (rys. 5),  $C_w$  – prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w wodzie (ok. 1500 m/s),  $\mathcal{Q}_r$  – średnia prędkość medium (wody) w strefie pomiarowej,  $\alpha$  – kąt, jaki tworzy ścieżka akustyczna z kierunkiem przepływu.



Rys. 5. Idea metody ultradźwiękowej pomiaru prędkości wody

Czas przejścia impulsu na tej samej drodze w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wody (rys. 5 B → A)  $t^-$  będzie dłuższy niż w przypadku pokonania takiej samej odległości w wodzie stojącej.

$$t^- = \frac{L}{C_w - \mathcal{Q}_r \cos \alpha} \quad (2)$$

Różnica czasów przejścia impulsu ultradźwiękowego  $t^-$  i  $t^+$  jest wprost proporcjonalna do poszukiwanej wartości prędkości  $\mathcal{Q}_r$

$$\Delta t = t^- - t^+ = \frac{L}{C_w - \mathcal{Q}_r \cos \alpha} - \frac{L}{C_w + \mathcal{Q}_r \cos \alpha} = \frac{2L \mathcal{Q}_r \cos \alpha}{C_w^2} \quad (3)$$

ponieważ  $C_w^2 \gg (\mathcal{Q}_r \cos \alpha)^2$ .

Wyznaczając czas średni przejścia impulsu ultradźwiękowego  $t = \frac{t^+ + t^-}{2}$  można uzyskać

zależność na  $\mathcal{Q}_r$ , nie będącą funkcją prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w wodzie.

$$t = \frac{t^+ + t^-}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{L}{C_w - \mathcal{Q}_r \cos \alpha} + \frac{L}{C_w + \mathcal{Q}_r \cos \alpha} \right) = \frac{L}{C_w} \quad (4)$$

$$\mathcal{Q}_r = \frac{\Delta t C_w^2}{2L \cos \alpha} = \frac{\Delta t L}{2t^2 \cos \alpha} \quad (5)$$

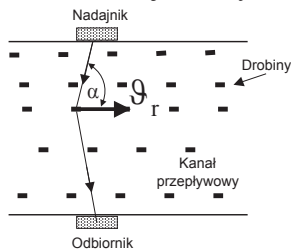
Drugą metodą wykorzystującą falę ultradźwiękową do pomiaru prędkości przepływu jest metoda wykorzystująca zjawisko Dopplera. Większość energii impulsu ultradźwiękowego w przypadku pomiaru prędkości przepływu cieczy zostaje zaabsorbowana przez zawiesiny lub odbita w kierunku innym niż źródło fali. Tylko niewielka jej część jest odbita w kierunku źródła i rejestrowana jako sygnał użyteczny. Dopplerowskie przesunięcie częstotliwości spowodowane przemieszczaniem się źródła fali ultradźwiękowej względem obserwatora może być określone zależnością (6):

$$\Delta f = 2f \cdot \left( \frac{g}{C_w} \right) \quad (6)$$

gdzie:  $\Delta f$  – przesunięcie Dopplerowskie częstotliwości [Hz],  $f$  – częstotliwość sygnału nadawanego [Hz],  $g$  – względna prędkość pomiędzy nadajnikiem i obserwatorem [m/s],  $C_w$  – prędkość dźwięku [m/s].

Jeżeli źródło fali i obserwator przemieszczają się względem ziemi, ale ich wzajemna odległość jest stała, nie występuje w tych warunkach zjawisko Dopplera. Tylko promieniowy ruch źródła dźwięku względem obserwatora powoduje występowanie efektu Dopplera.

Miarą prędkości poruszającej się drobiny (prędkości wody) jest różnica częstotliwości fali emitowanej przez nadajnik i odbieranej przez odbiornik. Typowa konfiguracja układu pomiarowego wykorzystywana w pomiarach przepływu przedstawiona jest na rys. 6.



Rys. 6. Typowa konfiguracja przepływomierza ultradźwiękowego wykorzystująca efekt Dopplera

Zależność określająca liniową relację pomiędzy zmierzoną różnicą częstotliwości a prędkością mierzonego przepływu, przy założeniu, że drobina odbijająca falę zachowuje tą samą prędkość, co strumień przepływającego medium zarówno, co do wartości jak i kierunku, przedstawiona jest wzorem:

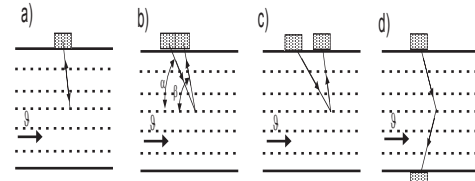
$$g_r = \frac{C \Delta f}{2f \cos \alpha} \quad (7)$$

gdzie:  $\Delta f$  – różnica pomiędzy nadawaną a odbieraną częstotliwością [Hz],  $C_w$  – prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w wodzie,  $f$  – częstotliwość sygnału nadawanego,  $\alpha$  – kąt pomiędzy wektorem prędkości wody a ścieżką ultradźwiękową.

Przepływomierze dopplerowskie są wykorzystywane do pomiaru prędkości w cieczach niejednorodnych zawierających cząstki stałe lub pęcherzyki gazu. Jedną z głównych zalet tego typu przepływomierzy jest brak konieczności precyzyjnego określania długości ścieżki ultradźwiękowej. Najczęściej spotykany zakres częstotliwość fali wynosi  $0,3 \div 3$  MHz. Spotyka się również przepływomierze dopplerowskie o częstotliwości generacji powyżej 1 MHz przeznaczone do pomiaru cieczy o bardzo małym stężeniu zawieszin. W tym wypadku odbicia fali ultradźwiękowej występują od naturalnie obecnych w polu przepływu zawirowań. Przy tej częstotliwości koncentracja zawieszin nie powinna przekraczać 0,05% ponieważ dla wysokich

częstotliwości zdecydowanie maleje zdolność penetracji ośrodka przez wiązkę ultradźwiękową.

Na rys. 7 przedstawiono możliwe konfiguracje głowic przepływomierza ultradźwiękowego pracującego wg metody Dopplera.

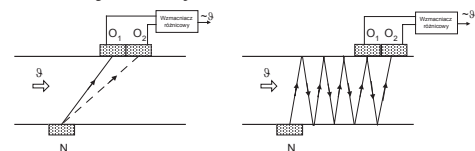


Rys. 7. Możliwe konfiguracje przepływomierza ultradźwiękowego pracującego wg metody Dopplera:

- z pojedynczą głowicą nadawczo-odbiorczą,
- z podwójną głowicą nadawczo-odbiorczą,
- z dwoma głowicami zlokalizowanymi po tej samej stronie kanału,
- z dwoma głowicami zlokalizowanymi po obu stronach kanału

Zastosowanie dopplerowskich przepływomierzy ultradźwiękowych w pomiarach przepływu w kanałach otwartych jest ograniczone jedynie do specyficznych, małych kanałów przemysłowo-odwiadczalnych. W pomiarach przepływów metodą prędkość - powierzchnia w ciekach naturalnych nie znajdują one praktycznego zastosowania. Ich główne zastosowanie to pomiary przepływu w rurociągach i w diagnostyce medycznej [6].

Trzecia metoda wykorzystywana w przepływomierzach ultradźwiękowych wykorzystuje unoszenie wiązki ultradźwiękowej przez płynący strumień. Idea tej metody przedstawiona jest na rys. 8.

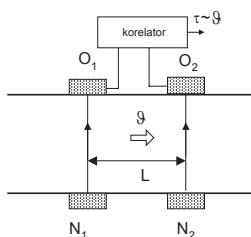


Rys. 8. Idea pomiaru prędkości przepływu metodą ultradźwiękową wykorzystującą zjawisko unoszenia fali ultradźwiękowej

W metodzie tej impulsy ultradźwiękowe wysyłane przez głowicę nadawczą są odbierane przez dwie głowice odbiorcze znajdujące się po drugiej stronie kanału przepływowego. W przypadku prędkości przepływu mierzonego medium równego zero, wartość sygnałów odbieranych przez dwie głowice odbiorcze są stałe. W miarę zwiększania prędkości przepływu amplituda sygnału odbieranego w głowicy  $O_1$  (rys. 8) maleje, natomiast amplituda sygnału odbieranego w głowicy  $O_2$  wzrasta. W przypadku wąskich koryt pomiarowych w celu zwiększenia długości ścieżki ultradźwiękowej wykorzystuje się wielokrotne odbicie wiązki od brzożegów kanału przepływowego. Informacja pomiarowa, mająca charakter bardziej informacyjny niż pomiarowy, w tego typu

przepływomierzach jest zawarta w różnicy amplitud sygnałów odbieranych przez głowice  $O_1$  i  $O_2$  lub w kącie odchylenia wiązki ultradźwiękowej, który zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości przepływu. W praktyce pomiarowej metoda ta jest bardzo rzadko stosowana ze względu na trudność dokładnego pomiaru kąta odchylenia wiązki ultradźwiękowej i konieczności stosowania dużej liczby głowic odbiorczych dla zwiększenia rozdzielczości pomiaru.

Czwarta metoda wykorzystująca impuls ultradźwiękowy do pomiaru prędkości przepływu bazuje na korelacji wzajemnej, jaka występuje pomiędzy szumami w dwóch odległych miejscach koryta przepływowego. Schemat ideowy ultradźwiękowego przepływomierza korelacyjnego przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Schemat ideowy ultradźwiękowego przepływomierza korelacyjnego

Funkcja korelacji wzajemnej wykorzystywana w tego typu przepływomierzach zdefiniowana jest wzorem (3.8)

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t-\tau)y(t)dt \quad \text{dla } T \gg \tau$$

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t-\tau)y(t)dt \quad (8)$$

gdzie:  $R_{xy}$  – funkcja korelacji,  $x(t)$ ,  $y(t)$  – sygnały uzyskiwane z układu głowic  $N_1-O_1$  oraz  $N_2-O_2$ .

W przypadku stosowania korelatorów cyfrowych funkcja korelacji może być wyrażona wzorem (9)

$$R_{xy}(i\Delta\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta\tau - i\Delta\tau)y(n\Delta\tau) \quad \text{jeżeli } N \gg i. \quad (9)$$

gdzie:  $\Delta\tau$  – okres próbkowania,  $i$  – punkt obliczeniowy funkcji,  $N$  – liczba próbek.

Podstawą metody korelacyjnej jest pomiar czasu przelotu znacznika pomiędzy miejscami usytuowania dwóch ścieżek ultradźwiękowych. Znacznikiem może być naturalnie występująca turbulencja lub drobina, która dostała się do strumienia w sposób naturalny, bądź została wstrzyknięta. Miarą średniej prędkości mierzonego medium jest przesunięcie czasowe odbieranych sygnałów, dla którego występuje maksimum funkcji korelacji wzajemnej i wtedy:

$$g_m = \frac{L}{\tau}$$

Sygnał pomiarowy z ultradźwiękowego przepływomierza korelacyjnego jest proporcjonalny do prędkości strugi przepływu wraz z którą porusza

się znacznik. W przypadku otwartych kanałów przepływowych o prostokątnym przekroju poprzecznym rozkład prędkości w pionie jest zdeterminowany. Ustawiając zestaw głowic na głębokości  $0,6h$  ( $h$  – głębokość kanału przepływowego), mierzona prędkość średnia będzie równa prędkości średniej liczonej za cały przekrój pomiarowy.

#### 4. OPTYCZNE METODY POMIARU PRZEPLYWU

Wykorzystanie optycznych metod pomiaru przepływu w kanałach otwartych i ciekach naturalnych jest stosunkowo ograniczone, jakkolwiek coraz częściej spotyka się urządzenia wykorzystujące zaawansowane techniki pomiarowe. Stosowane metody można podzielić na dwie zasadnicze grupy: metody bazujące na śledzeniu ruchu zawirowań, cząstek stałych, zawieszin itp. w przekroju strumienia cieczy lub na swobodnej powierzchni cieku. Wśród tej grupy najpopularniejsza jest metoda PIV (ang. Particle Image Velocimetry) oraz metody anemometrii laserowej LA (ang. Laser Anemometry), wśród których najpopularniejszą jest anemometria dopplerowska LDA (ang. Laser Doppler Anemometry). O ile pierwsza grupa metod znajduje zastosowanie zarówno w pomiarach przepływu na naturalnych ciekach jak i w kanałach sztucznych, o tyle główny obszar zastosowań laserowej anemometrii dopplerowskiej koncentruje się jednak na laboratoryjnych pomiarach przepływu w małych sztucznych kanałach przepływowych.

W metodach optycznych wykorzystuje się relacje pomiędzy naturalnym strumieniem światłym lub generowanym przez źródła zewnętrzne a zjawiskami absorpcji, rozpraszania i odbicia występujące w mierzonej strumieniu wody. Elementem niezbędnym do przeprowadzenia poprawnego pomiaru w tego typu metodach jest występowanie tzw. posiewu. Jako posiew możemy traktować wszelkie naturalnie występujące bądź spowodowane w sposób sztuczny zakłócenia struktury strumienia mierzonego medium, którymi mogą być zawirowania (fały), piana, drobiny lub zawiesziny. Idea pomiaru zakłada, że prędkość, z jaką poruszają się zakłócenia struktury strumienia jest tożsama z prędkością mierzonego medium w danym punkcie przekroju pomiarowego. Za pomocą metod optycznych pomiarowi mogą być poddawane przepływy jedno lub dwufazowe zarówno laminarne jak i turbulentne [7, 8].

Wśród metod optycznych pomiaru prędkości przepływu wykorzystujących sztuczne źródło światła dominującą rolę pełni anemometria laserowa (LA). Pozwala ona zmierzyć wartość chwilową lokalnej wartości prędkości w określonej, niewielkiej objętości przepływu i czasie. Podstawy teoretyczne anemometrii laserowej opracowano dopiero w połowie lat sześćdziesiątych, a pierwsza

komercyjnie dostępna aplikacja powstała na początku lat siedemdziesiątych.

Głównymi zaletami anemometrii laserowej są: bezinwazyjność, mała objętość próbkowania, możliwość ciągłego przesuwania obszaru badanego i samo-kalibracja. Szczególne własności anemometrów laserowych sprawiły, że pomimo wysokiej ceny są chętnie wykorzystywane przede wszystkim w praktyce laboratoryjnej. Odnosząc się ogólnie do anemometrii laserowej można wymienić kilka podstawowych zalet, które determinują jej szerokie zastosowanie:

- bezkontaktowy pomiar, nie deformujący pola prędkości obecnością czujnika,
- możliwość pomiaru w środowiskach agresywnych chemicznie,
- niewrażliwość na zmiany temperatury,
- możliwość pomiaru prędkości w dowolnym kierunku,
- brak konieczności wzorcowania przyrządu.

Anemometria laserowa ma również swoje wady. Do najistotniejszych można zaliczyć:

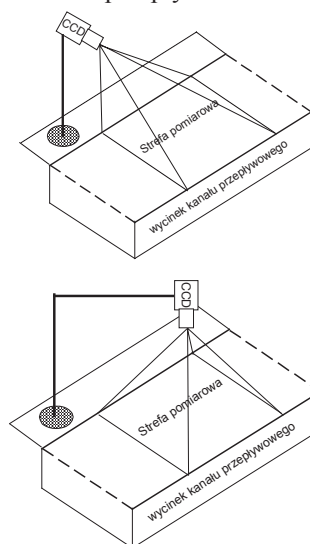
- w badanej cieczy muszą występować cząsteczki stałe, rozpraszające promień lasera; zazwyczaj wystarczają zanieczyszczenia naturalne, lecz w przypadku cieczy bardzo czystych, należy wprowadzić je sztucznie,
- medium musi być przezroczyste, co narzuca istotne ograniczenia np. dotyczące gęstości stosowanego posiewu,
- kanał przepływowy musi być wyposażony w wzierniki umożliwiające wprowadzenie promieni lasera w badany przepływ.

Wśród różnych technik stosowanych w anemometrii laserowej można wyróżnić cztery podstawowe grupy: laserową anemometrię wielogniskową (LTA – ang. Laser Transient Anemometry), laserową anemometrię wykorzystującą śledzenie ruchu cząstek (PIV), anemometrię laserową wykorzystującą indukowaną fluorescencję przepływu (RELIEF – ang. Raman Excitation Laser Induced Electronic Fluorescence) oraz dopplerowską anemometrię laserową (LDA – ang. Laser Doppler Anemometry). Zastosowanie każdej z wymienionych powyżej metod anemometrii laserowej wymaga istnienia w badanym przepływie odpowiedniej koncentracji cząstek rozpraszających. Cząstki te mogą być naturalnymi składnikami płynu lub też muszą być do niego wprowadzane sztucznie jako tzw. posiew. Oznacza to, że analizie podlega nie tyle ruch samego płynu, ile zawieszonych w nim cząstek posiewu. Zazwyczaj zakłada się, że cząstki te odwzorowują w sposób idealny ruch samego płynu.

Anemometria wielogniskowa wykorzystuje pomiar czasu przejścia cząstki posiewu przez dwa lub więcej ogniska wiązek laserowych. Aby możliwe było założenie, iż podlegające pomiarowi impulsy świetlne pochodzą od tej samej cząstki rozpraszającej, ogniska wiązek laserowych powinny być umieszczone możliwie blisko siebie. Mierzac

odstęp czasu między impulsami oraz znając odległość między ogniskami możemy w prosty sposób wyznaczyć chwilową prędkość cząstki oraz kierunek jej ruchu. Metody tej nie stosuje się do pomiaru przepływów turbulentnych, gdyż w przypadku, gdy stosunek średnicy ogniska wiązki do odstepu między kolejnymi wiązkami wynosi 20: 1, intensywność turbulencji na poziomie około 5% wystarcza, by cząstka przechodząca przez pierwsze ognisko nie trafiała w obręb drugiego, nawet, gdy oś ustawienia ognisk jest równoległa do kierunku wektora prędkości średniej. Zastosowanie ognisk poszczególnych wiązek w kształcie elipsoid o dłuższej osi normalnej do kierunku przepływu średniego pozwala na pomiar w przypadku większych poziomów turbulencji, jednak nadal właściwym obszarem zastosowań LTA pozostają przepływy o niskim i umiarkowanym poziomie turbulencji [9].

W ciekach naturalnych i innych typach kanałów otwartych, technika PIV znajduje zastosowanie w pomiarach pola prędkości powierzchniowej. Pomiar przepływu w ciekach w warunkach normalnych jak i krytycznych spowodowanych np. falą powodziową może być skutecznie, bezkontaktowo, a przede wszystkim bezpiecznie (bez bezpośredniego udziału ludzi), realizowany za pomocą obserwacji pola prędkości powierzchniowych na swobodnej powierzchni przepływu. Korzystając z wzorów Bazina lub Hageny oraz znajomości rozkładu prędkości powierzchniowej, możliwe jest wyznaczenie profili pionowych prędkości w korycie, co w połączeniu z pomiarem poziomu napelnienia koryta (przy ustabilizowanym dnie) pozwala na wyznaczenie chwilowej wartości przepływu.



Rys. 10. Struktury układu pomiarowego wykorzystujące metodykę PIV do pomiaru pola prędkości powierzchniowej w kanałach otwartych

W przypadku klasycznej aplikacji metody PIV do pomiaru powierzchniowego pola prędkości możliwe

struktury układu pomiarowego przedstawione są na rys. 10.

Przedstawione konfiguracje układu oświetlającego różnią się sposobem transformacji obrazu z kamery do układu współrzędnych wykorzystywanego w dalszej analizie obrazu. W obu przypadkach istnieje możliwość wykorzystywania zarówno oświetlenia naturalnego jak i sztucznego (np. zestaw lamp halogenowych).

W wielu rozwiązaniach technicznych szczególnie w ciekach naturalnych wykorzystuje się naturalne zakłócenia występujące na swobodnej powierzchni cieku. Najczęściej są to zawirowania, piana wodna lub różnego typu cząstki, drobiny. W przypadku, kiedy profil pomiarowy znajduje się niedaleko budowli hydrotechnicznej, np. przelewu lub stopnia wodnego, wykorzystanie naturalnie i regularnie tworzącej się piany jako znacznika daje bardzo dobre rezultaty. Praktyczne wykorzystanie posiewu sztucznego może być stosowane jedynie do cieków o szerokości nie większej niż kilka metrów.

Wiele rozwiązań technicznych pomiaru przepływu metodą PIV wykorzystuje oświetlenie naturalne oraz pojedynczą kamerę ustawioną na brzegu, w taki sposób żeby swoim polem widzenia obejmowała całe pole pomiarowe (rys. 10). Podstawowym problemem związanym z tego typu aranżacją stanowiska pomiarowego jest uzależnienie jakości rejestrowanych obrazów od stopnia nasłonecznienia oraz transformacja obrazu z kamery do układu współrzędnych związanego z ciekami.

Obraz z kamery jest w sposób naturalny zniekształcany, co jest związane bezpośrednio z kątem widzenia kamery, jej sposobem usytuowaniem oraz z jej ogniskową. Określenie funkcji transformujących prowadzone jest dwiema drogami. Pierwszy sposób polega na precyzyjnym określeniu pozycji i optycznych parametrów kamery i na ich podstawie wyznaczenie funkcji transformacyjnych. Drugi sposób wykorzystuje istniejące naziemne punkty odniesienia GPR (ang. Ground Reference Points) i na ich podstawie określone są parametry transformacyjne opisujące relacje pomiędzy obrazem z kamery a rzeczywistym stanowiskiem pomiarowym [10].

Prędkość powierzchniowa w punktach definiujących przekrój pomiarowy jest wyznaczana w oparciu o siatkę rozkładu prędkości wyznaczoną za pomocą metodyki PIV. Wartość prędkości w punkcie  $\mathcal{Q}_i$  wyznacza się za pomocą liniowej interpolacji biorąc pod uwagę sąsiednie wartości prędkości w punktach  $P_g$  wyznaczonej siatki:

$$\mathcal{Q}_i = \frac{1}{4} \sum_{g \in G_i} \mathcal{Q}_g \quad (10)$$

gdzie:  $G_i$  – współrzędne siatki dla czterech punktów wyznaczających obszar, w którym jest zawarty punkt  $P_i$ ,  $\mathcal{Q}_g$  – prędkość powierzchniowa w punktach  $P_g$  wyznaczona za pomocą metodyki PIV.

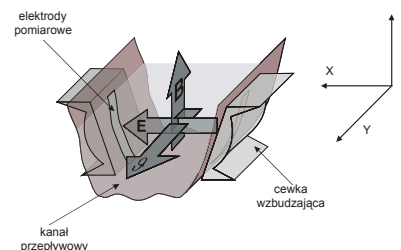
Profil pionowy prędkości w każdym punkcie  $P_i$  może być przyjęty jako paraboliczny lub logarytmiczny. Dla większości kanałów

przepływowych wartość średnia prędkości w danym pionie  $\mathcal{Q}_i$  może być określona zgodnie z uproszczoną zależnością  $\mathcal{Q}_i = 0,859_i$ . Jednakże należy zauważyć, że wartość współczynnika proporcjonalności jest zależna od właściwości hydrologicznych kanału przepływowego takich jak chropowatość dna, rozmiary kanału czy poziom turbulencji.

## 5. ELEKTROMAGNETYCZNA METODA POMIARU PRZEPŁYWU

Elektromagnetyczna metoda pomiaru przepływu należy do grupy metod powierzchnia – prędkość. Metody te wykorzystują niezależne pomiary średniej prędkości mierzonego medium i poziomu napełnienia kanału przepływowego do pomiaru przepływu (strumienia objętości). Idea pomiaru zapewnia prawie idealną integrację pola prędkości, zarówno w pionie jak i w poziomie. Strefa integracji w pionie jest wyznaczana przez dno kanału przepływowego i lustro wody, zaś w poziomie przez elektrody pomiarowe. Uzupełniając podstawową procedurę pomiarową o jednoczesny pomiar poziomu napełnienia kanału przepływowego, często wykorzystujący tą samą parę elektrod pomiarowych, uzyskuje się wynik pomiaru proporcjonalny do przepływu (strumienia objętości).

Pomiar prędkości cieczy metodą elektromagnetyczną oparty jest na prawie Faradaya. Wiąże ono wartość potencjału elektrycznego  $\varphi$  indukowanego w strefie pomiarowej przepływomierza z wektorem prędkości  $\vec{\mathcal{Q}}$  cieczy elektrycznie przewodzącej i wektorem indukcji magnetycznej  $\vec{B}$  pola wzbudzanego w strefie pomiarowej. Sygnałem pomiarowym w przepływomierzu elektromagnetycznym jest różnica potencjałów mierzona na elektrodach umieszczonych na przeciwległych brzegach kanału przepływowego (rys. 11).

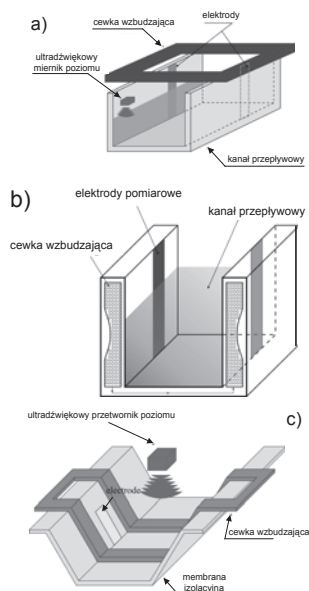


Rys. 11. Idea metody elektromagnetycznej pomiaru przepływu w kanale otwartym

Analizując spotykane obecnie konstrukcje przetworników pierwotnych przepływomierzy elektromagnetycznych dla kanałów otwartych można wyróżnić trzy zasadnicze rozwiązania. Różnią się one głównie sposobem generacji sztucznego pola magnetycznego. W przypadku kanału z elektrycznie izolowanymi brzegami, cewka wzbudzająca może być integralną częścią kanału przepływowego (rys. 12b) zapewniając tym samym



możliwość stosunkowo łatwej zmiany miejsca instalacji przepływomierza. Ten rodzaj konstrukcji zapewnia jednorodny rozkład indukcji wzbudzanego pola magnetycznego, co umożliwia pomiar przepływów o praktycznie dowolnym rozkładzie pola prędkości. Przepływomierz wykorzystujący ten rodzaj konstrukcji opracowany na Politechnice Warszawskiej w latach 90-tych, został zainstalowany na polderze Łęgowo k. Bydgoszczy [11, 12].



Rys.12. Konstrukcje przetworników pierwotnych przepływomierzy elektromagnetycznych do kanałów otwartych a) przetwornik z cewką wzbudzącą usytuowaną powyżej lustra wody, b) przetwornik z cewką wzbudzącą stanowiącą integralną część kanału przepływowego, c) przetwornik z cewką wzbudzącą umieszczoną na lub pod dnem kanału przepływowego

W latach 80-tych i na początku 90-tych budowano przetworniki z wyodrębnionym układem cewki wzbudzającej (np. Sarasota Instrumentation). Dla sztucznego kanału przepływowego cewka była umieszczana powyżej kanału w specjalnie do tego przygotowanej prostokątnej ramie (rys. 12.a). Dla tego rozwiązania trudno było uzyskać jednorodny rozkład pola magnetycznego, co powodowało konieczność wprowadzania współczynników korekcyjnych uwzględniających zmienny poziom napełnienia koryta. Rozkład prędkości mierzonych przepływów musiał charakteryzować się symetrią osiową. Dla naturalnych kanałów przepływowych cewka wzbudzająca zakopywana była pod dnem kanału (rys.12.c), dodatkowo wymagana jest wtedy izolacja elektryczna dna koryta kanału od przepływającej wody. Izolację tą najczęściej zapewniała folia izolacyjna rozciągnięta w kanale przepływowym na całej długości strefy pomiarowej. W tej konstrukcji największą niedogodnością był niejednorodny rozkład wzbudzanego pola magnetycznego oraz efekty zwarcia występujące na brzegach folii.

Obie te konstrukcje wywodzą się z prac badawczych realizowanych w latach 70-tych przez Plessey Radar Instrumentation (W. Brytania). We wszystkich rozwiązaniach przedstawionych na rys. 12 konieczny był dodatkowy pomiar poziomu napełnienia kanału przepływowego. W rozwiązaniu przedstawionym na rys. 12b pomiar dokonywany był z wykorzystaniem tej samej pary lekko odchylnych od pionu elektrod pomiarowych wykorzystując efekty elektromagnetyczne. W pozostałych dwóch rozwiązaniach pomiar dokonywany był za pomocą oddzielnego miernika poziomu np. ultradźwiękowego.

Całkowita niepewność pomiaru przepływu metodą elektromagnetyczną dla izolowanego kanału przepływowego nie powinna przekraczać  $\pm 2\%$  przy poziomie ufności 95%. W sytuacji instalacji przepływomierza na rzeczywistym kanale przepływowym, niepewność całkowita jest znacznie większa, należy oczekiwać wartości dochodzących do  $\pm 10\%$ . Najmniejsza wykrywana za pomocą przepływomierza elektromagnetycznego prędkość przepływu jest na poziomie 0,001 m/s. Dynamika mierzonych przepływów może być przedstawiona jak 1: 1000.

## 6. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule metody pomiaru przepływu w kanałach otwartych pokrywają praktycznie większość potrzeb sygnalizowanych przez służby hydrologiczne.

Metody spiętrzeniowe i zwężkowe znajdują bardzo szerokie zastosowanie w monitoringu przepływu w przemysłowych kanałach zrzutowych, małych ciekach i kanałach melioracyjnych. W przypadku przelewów mierniczych cienkościennych stosowanych do cieków o szerokości poniżej 5 m i głębokości poniżej 1 m, niepewność pomiaru jest w zakresie  $\pm 1\% \div \pm 3\%$  w zależności od rodzaju przelewu. Dla przelewów o szerokiej koronie stosowanych do cieków o szerokości do 50 m i głębokości do 1 m niepewność pomiaru nie przekracza  $\pm 5\%$ . Dla zwężkowych koryt pomiarowych maksymalna szerokość cieku nie powinna przekraczać 50 m przy głębokości do 1 m. Dla takich warunków niepewność pomiaru nie przekracza  $\pm 5\%$ . Swobodne przelewy stosowane są dla cieków o szerokości do 50 m i głębokości do 5 m, zaś uzyskiwane niepewności pomiaru nie przekraczają  $\pm 10\%$ .

W przypadku metody ultradźwiękowej do jej głównych zalet zalicza się zdolność do pomiaru prędkości wody w bardzo szerokim zakresie, brak szczególnych wymagań odnośnie miejsca lokalizacji, nie wymaga wzorcowania, nie stwarza przeszkód nawigacyjnych lub w swobodnym przepływie ryb, nie jest czuła na występowanie spiętrzeń powodowanych różnymi czynnikami. Nie

mniej w praktyce pomiarowej, miejsce instalacji przepływomierza ultradźwiękowego powinno spełniać kilka istotnych warunków rzutujących bezpośrednio na uzyskiwane niepewności pomiarów. Mierzone koryto powinno być regularne z równoległymi brzegami cechujące się niewielkimi zmianami kształtu przekroju poprzecznego na odcinku strefy pomiarowej. Ze względu na konieczność monitorowania wielkości przekroju poprzecznego napełnionej części kanału, powinna być zdeterminowana relacja pomiędzy poziomem i polem przekroju poprzecznego. Przekrój pomiarowy kanału powinien być wolny od intensywnej roślinności dennej ze względu na możliwość wystąpienia tłumienia sygnału ultradźwiękowego. W strefach kanału przepływowego gdzie występuje silna koncentracja zawieszin (powyżej 1000 mg/l) użycie metody ultradźwiękowej może być utrudnione a niekiedy wręcz niemożliwe. Możliwość wystąpienia silnych gradientów temperatury czy zasolenia jest przeciwwskazaniem do stosowania metody ultradźwiękowej.

W przypadku metod optycznych, metoda PIV znajduje największe zastosowanie w praktyce hydrologicznej. Jedną z niezaprzeczalnych zalet metod PIV jest bardzo prosta instalacja i niewielka masa wymaganej aparatury pomiarowej (kamera CCD, statyw, układ przetwarzania sygnałów oparty na komputerze PC lub specjalizowanym sterowniku mikroprocesorowym), która umożliwia bezproblemowe przenoszenie urządzenia na inne stanowisko pomiarowe. Zdecydowanie większa złożoność omawianej metody występuje po stronie oprogramowania. Istnieje szereg dostępnych metod analizy obrazów, które mogą być prowadzone on-line bądź off-line. Główny kierunek rozwojowy metod optycznych skoncentrowany jest na dwu dziedzinach. Pierwszym obszarem badań jest optymalizacja zestawu źródła światła – czujnik (rejestrator). W tym obszarze prace koncentrują się na budowie specjalizowanych laserów oraz wysokiej jakości kamery cyfrowe. Druga dziedzina intensywnych badań to nowoczesne algorytmy rozpoznawania obrazów. W większości bazują one na technikach korelacyjnych wykorzystując szybką transformatę Fouriera (FFT).

Przepływomierze elektromagnetyczne do kanałów otwartych są konstrukcjami dość kosztownymi, jednakże mają szereg istotnych zalet. Charakteryzują się szerokim zakresem dynamicznym pomiarów, nie wprowadzają do przekroju pomiarowego żadnych elementów mogących zakłócić przepływ, mierzą rzeczywistą średnią prędkość przepływu, nie są czułe na przepływy zwrotne. Jako jedyne zapewniają naturalną integrację pola prędkości. Średni błąd pomiaru przepływu za pomocą przepływomierza elektromagnetycznego zazwyczaj nie przekracza 3%. Są instalowane głównie na rzekach (kanałach) o szerokości nie przekraczającej 20 m, które

charakteryzują się brakiem stabilnej zależności poziom-przepływ. Miejsce instalacji przepływomierza elektromagnetycznego powinno spełniać kilka warunków. Przetwornik pierwotny przepływomierza winien być instalowany na prostym odcinku kanału o długości nie mniejszej niż 3 szerokości kanału. Warunek ten wynika z chęci uzyskania profilu przepływu zbliżonego do osiowosymetrycznego. Dodatkowo należy unikać bliskości linii energetycznych, elektrycznych linii kolejowych oraz dużych elementów wykonanych ze stali, które mogłyby zniekształcać wzbudzone pole magnetyczne.

Metoda elektromagnetyczna i wszystkie związane z nią procedury pomiarowe, podobnie jak w przypadku metody ultradźwiękowej, została znormalizowana (między innymi ISO 9213, PN EN – ISO 6817).

#### LITERATURA

1. Michalski A. *Pomiary przepływu wody w kanałach otwartych*, OWPW, Warszawa 2004.
2. Rózdżyński K., *Miernictwo hydrologiczne*, IMiGW Warszawa 1998.
3. Herschy R.W., *Hydrometry*, John Wiley & Sons, New York, 1978.
4. Herschy R. W., *Streamflow Measurement*, Elsevier Applied Science Publishers, London 1995.
5. Rózdżyński K. *Metody hydrometrii ultradźwiękowej*, PAN, IBW Gdańsk 1984
6. Liptak B.G., *Flow Measurement*, Chilton Book Company, Pensylvania 1993.
7. Hyun B. S., Balachandar R, Yu K., Patel V. C., *Assesment of PIV to measure mean velocity and turbulence in open-channel flow*, Experiments in Fluids, Springer Verlag 2003.
8. Iehisa N., Kouki O., *Turbulent structures in partly vegetated open-channel flows with LDA and PIV measurements*, Journal of Hydraulic Research, vol. 39, no 6 2001, pp 629-642.
9. Elsner J., Drobnik St., *Metrologia turbulencji przepływów*, Maszyny Przepływowe pod redakcją E. S. Burki, Wydawnictwo PAN Warszawa 1995.
10. Raffel M., Willert Ch., Kompenhans J., *Particle Image Velocimetry – a Practical Guide*, Springer Berlin 1998.
11. Klugiewicz J., Dzieweczynski P., Toczyk G., Michalski A., Chwaleba A., Kalicki A., *Metody ustalania i pomiaru odpływu wody z polderów do projektowania i eksploatacji przepompowni*, Zeszyt Naukowy No 179 - Budownictwo ,Akademia Techniczno - Rolnicza, Bydgoszcz 1992, s. 5 - 25.
12. Klugiewicz J., Dzieweczynski P., Michalski A., Chwaleba A., Kalicki A., *Elektromagnetyczny system pomiaru dynamiki odpływu wody z polderu Łęgnowo*, Zeszyt Naukowy No 179 - Budownictwo, Akademia Techniczno - Rolnicza Bydgoszcz 1992, s. 25-44.