*INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH*
*INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS*

Nr 8/2/2010, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 37–50
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

***Sławomir Bajkowski***

# WSPÓŁCZESNE TECHNIKI POMIAROWE LABORATORIÓW WODNYCH

# *CURRENT MEASURING TECHNIQUES OF WATER LABORATORIES*

**Streszczenie**

W laboratoriach hydraulicznych poza podstawowymi badaniami modelowymi budowli hydrotechnicznych coraz częściej prowadzone są eksperymentalne prace nad rozpoznaniem warunków przepływu wody przez różnego typu wodne konstrukcje środowiskowe. Badania te dotyczą wybranych sytuacji towarzyszących przepływowi wody w rozmywanych korytach aluwialnych, z porostem roślinnym, z uwzględnieniem przepływu ryb, na przepuszczalnych konstrukcjach kamiennych, urządzeniach prototypowych, aeratorach lub komorach wirowych. W badaniach tych uzyskujemy szybkie, często pulsacyjne zmiany ciśnień i towarzyszące im pulsacje prędkości przepływu. Wymagają one zastosowania nowoczesnych technik i urządzeń badawczych, które w swym działaniu wykorzystują wysokiej częstotliwości impulsy elektromagnetyczne lub akustyczne. Wykorzystuje się je również w pomiarach terenowych jako źródło sygnałów dla układów wspomagania działań eksploatacyjnych obiektów. Większość ośrodków krajowych posiada laboratoria hydrauliczne wyposażone w podobnej klasy urządzenia pomiarowe. Są to często takie same modele mierników. Niezbędne staje się więc opracowanie spójnych standardów badań i interpretacji uzyskiwanych wyników. W artykule opisano stosowane w Laboratorium Hydraulicznym SGGW mierniki do pomiaru prędkości przepływu wody. Podano zasady konfiguracji tych urządzeń i podłączenia ich do komputerowego systemu pomiarowego. Konfiguracja aparatury pomiarowej zależy od rodzaju i wartości gromadzonych danych, od ich wiarygodności, szybkości pozyskiwania, transmisji i weryfikacji. Omówiono organizację badań w zakresie pomiarów prędkości wody oraz możliwości wykorzystania mierników w pomiarach na budowlach rzecznych. Wskazano zasady pozyskiwania danych, wstępnej ich weryfikacji oraz archiwizacji.

**Słowa kluczowe:** laboratorium hydrauliczne, system badawczy, aparatura laboratoryjna

**Summary**

*Apart from basic model test of hydro technical structures, more often in hydraulic laboratories experimental works are conducted devoted to the recognition of water flow conditions through various environmental water structures. This kind of research concerns chosen situations accompanying water flow in blurred alluvial troughs, covered with flora, taking fish movement into consideration, on permeable stone constructions, prototype devices, aerators or swirl chambers. From such research we gain fast, often pulsating pressure changes and accompanying them pulsating of flow velocities. They require usage of modern techniques and measuring devices, that utilise high frequency electromagnetic and acoustic impulses. They are also used in field studies as a source of signals for the systems supporting objects' exploitation activities. The majority of national institutes have hydraulic laboratories well-equipped with similar category measuring devices. These are often the same models of meters. It is thus necessary to establish coherent research and result interpretation standards. In the article the meters of water flow velocity used in SGGW Hydraulic Laboratory are described. The principles of these devices' configuration are presented as well as their connection to computer research system of the laboratory. Configuration of measuring apparatus depends on the kind and value of collected data, their reliability, speed of obtaining, transmission and verification. The organisation of research work is discussed as regards water velocity measurements and possibility of utilising the meters in measurements on river structures. The rules of obtaining data, their initial verification and archiving are presented.*

***Key words:*** *hydraulic laboratory, measuring-check system, laboratory equipment*

## WSTĘP

Większość aktualnie prowadzonych badań w laboratoriach hydraulicznych wybiega poza podstawowe analizy hydrauliczne. Dotyczą one np. rozpoznania przepływu wody wśród porostu roślinnego, pomiędzy kamiennymi elementami progów przepuszczalnych, w obecności migrujących ryb. Przepływowi wody towarzyszą często dynamiczne zmiany piaszczystych form dennych, lub napowietrzanie się strumienia w odskoku, na bystrzach lub kaskadach. W tego typu badaniach rejestracja mierzonych wartości napełnień i prędkości przepływu wymaga stosowania urządzeń pomiarowych nowej generacji, które w swym działaniu wykorzystują impulsy elektromagnetyczne lub akustyczne. Możliwości takie stwarzają nowoczesne techniki pomiarowe. Laboratoria hydrauliczne wyposaża się obecnie w elektroniczne urządzenia pomiarowe wykorzystujące impulsy elektromagnetyczne, pozwalające na rejestrowanie prędkości w interwale czasowym 0,1 s. W urządzeniach akustycznych wykorzystujących zjawisko Dopplera możliwe jest ustalanie prędkości, co 0,2 s (5 Hz), 0,1 s (10 Hz) i 0,02 s (50 Hz).

Ważnym elementem prowadzonych badań hydraulicznych jest możliwość pomiaru składowych prędkości wody. Dwudiodowe urządzenia pozwalają na

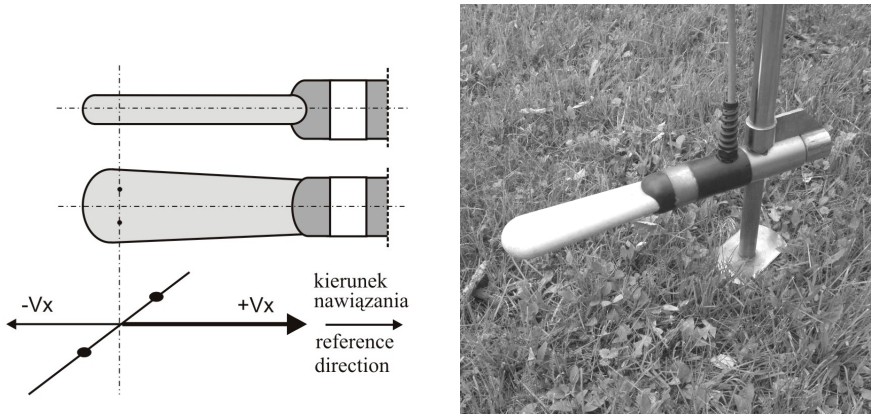
wyznaczenie wyłącznie składowej podłużnej prędkości Vx. W takiej sytuacji uzyskujemy pomiar prędkości, tak jak w klasycznym pomiarze młynkiem hydrometrycznym, jednak stosowanie mierników elektronicznych jest niewspółmiernie korzystniejsze od urządzeń śmigłowych. W miernikach elektromagnetycznych pomiar prowadzony jest na małym obszarze przepływu, zaś w młynkach śmigłowych prędkość jest uśredniana ze znacznie większego obszaru; nawet, jeżeli dysponujemy mikromłynkami o średnicy śmigiełka 10 mm. Mierniki elektromagnetyczne zapewniają wygodną transmisję danych, oraz umożliwiają prowadzenie pomiarów w porośniętych roślinnością częściach koryta lub w obszarach z ruchomymi elementami modelującymi szatę roślinną. Wśród dostępnych na rynku urządzeń do pomiaru prędkości wody na uwagę zasługuje mierniki Nautilus C2000, PEMS-E30 oraz MicroADV. Miernik Nautilus C2000 wykorzystuje się w pomiarach terenowych. Jego czujnik ma duże gabaryty i w warunkach laboratoryjnych trudno jest go stosować. Dogodniejsze do stosowania w laboratoriach są podane konstrukcje typu mikro. Posiadają one czujniki o mniejszych wymiarach i umożliwiają pomiar składowych prędkości przepływu. Popularność ich bierze się z faktu dostępności na rynku. Są to urządzenie, którymi dysponuje Laboratorium Hydrauliczne SGGW oraz inne laboratoria krajowe, dlatego zostaną one omówione w artykule. Urządzenia te mogą być wykorzystywane również w badaniach terenowych, jako samodzielne urządzenia z własnym panelem odczytowym lub sprzężone z kontrolerem poprzez interfejsy transmisji wyników [Bajkowski S., 2009]. Stosowanie ich wymaga często zmian metodyki badań, pozwala jednak na skrócenie czasu wykonywania pomiarów i ograniczenie ich pracochłonności. Wykorzystanie wreszcie nowych technik zbierania, przetwarzania wyników, opracowywania i prezentacji daje możliwość ujednolicenia metod badawczych oraz szybką interpretację uzyskiwanych wyników. Jednocześnie prowadzi ono do zwiększenia liczebności zbioru badanych parametrów, co umożliwia dokładne poznanie badanego zjawiska. Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008–2011 jako projekt badawczy.

## MIERNIKI

**Miernik Nautilus C2000**. Elektromagnetyczny miernik do pomiaru podłużnej składowej prędkości wody ±Vx w układzie 1V, dedykowany jest do badań terenowych [Operating Instruction 1992]. Może być również wykorzystany w laboratoriach, w dużych korytach badawczych. Z uwagi na częste wykorzystanie go w warunkach polowych, rzadko wyposażany jest w zestaw transmisji łączem RS232 i komputerowy program obsługi. Wynika to przede wszystkim z zachowania bezpieczeństwa pracy przy pomiarach „z wody". Brak możliwości gromadzenia wyników w wewnętrznej pamięci uniemożliwia wykonywanie

długich serii pomiarowych. Długie czasy próbkowania i uśredniania wartości wynikowych eliminują go przy tym z grupy urządzeń do pomiaru prędkości pulsacyjnych. Transmisja wyników *on-line* wymaga bezpośredniego podłączenia miernika do komputera, co jest szczególnie niebezpieczne przy wykonywaniu pomiarów z pontonu. Organizacja zespołu pomiarowego dysponującego echosondą z pozycjonowaniem GPS, miernikiem prędkości i jednoczesną obsługą jednostki napędowej jest dość trudna. Niedogodności te nie są tak duże, gdy pomiar odbywa się z większych jednostek zaopatrzonych w napęd, a zespół pomiarowy stanowi więcej osób. Jednak takie jednostki pomiarowe możliwe są do wykorzystania głównie na większych ciekach, jeziorach lub sztucznych zbiornikach. Pomiary na większości rzek nizinnych wykonuje się z pontonów lub małych łodzi, a zespół pomiarowy stanowią zazwyczaj dwie osoby. W płytkich wodach najkorzystniej jest prowadzić pomiary bezpośrednio przez osobę stojącą w wodzie. Pomiar taki zapewnia najlepsze warunki pomiaru, dokładne pozycjonowanie miernika oraz uzyskanie małych niepewności pomiarowych metody. Zaletą tego miernika jest brak ruchomych elementów pomiarowych, dzięki czemu możliwe jest prowadzenie pomiarów w korytach porastających roślinnością wodną oraz na terenach zalewowych wśród traw i krzewów. Do zalet urządzenia należy również zaliczyć prostą obsługę manualną, dobre rozwiązania konstrukcyjne drążków pozycjonujących oraz trwałą obudowę. Czas uśredniania prędkości wynosi od 5 do 60 s, a dokładność pomiaru wynosi ±1,0% mierzonej wartości. Na rysunku 1 pokazano szkic czujnika, układ elektrod pomiarowych oraz widok sondy pomiarowej.

a) b)




**Rysunek 1.** Miernik NAUTILUS C2000: a – szkic czujnika i układ współrzędnych, b – widok czujnika

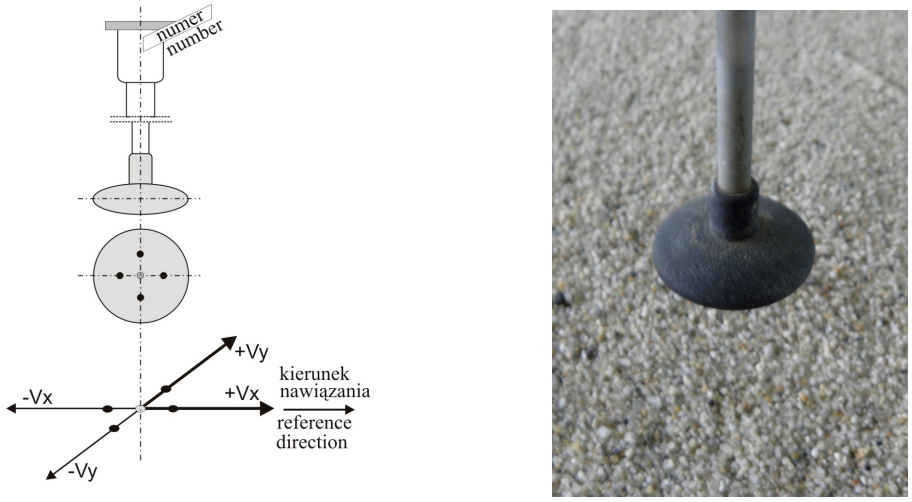
**Figure 1.** Flow Sensor NAUTILUS C2000: a – sketch of the sensor and the coordinate system, b – view of the sensor

**Miernik PEMS-E30.** Elektromagnetyczny miernik prędkości typu PEMS może być wyposażany w różne sondy pomiarowe [Manual P-EMS 2007]. Spośród wielu wersji ich wykonania najpopularniejsza zdaje się być sonda E30. Jest to sonda w kształcie dysku o wymiarach 33x11 mm, zamocowana na żerdzi długości 80 cm i średnicy 6 mm w dolnej części i 10 mm w górnej. Długość żerdzi w odniesieniu do większości badań jest wystarczająca, ale dla głębszych stanowisk badawczych zdaje się być zbyt krótka. Miernik ten umożliwia pomiar składowej podłużnej prędkości ±Vx oraz poprzecznej ±Vy, wartości prędkości wypadkowej Ve oraz kąta jej odchylenia $\alpha_{PEMS}$ od kierunku dodatniej półosi Vx. Pomiar składowych prędkości w układzie 2V wykonywany jest na płaszczyźnie Z/H ustalonej dla punktu pomiarowego w pionie, na wysokości Z. Minimalny czas próbkowania miernika wynosi 0,1 s, a dokładność pomiaru prędkości ±0,01 $ms^{-1}$. Miernik ma możliwość programowania sposobu prowadzenia i zbierania danych z poziomu własnego panelu, jak też z wykorzystaniem komputera. Do systemu badawczego miernik łączy się przez interfejs RS232.

Miernik PEMS-E30 jest najpopularniejszym urządzeniem stosowanym w laboratoriach hydraulicznych do pomiarów statycznych oraz pulsacyjnych prędkości wody. Inne wersje tego miernika mają sondy pomiarowe o większych wymiarach, przeznaczone głównie do badań terenowych. Spotyka się je rzadziej niż sondy typu E30. Głowicę pomiarową, układ odniesienia mierzonych prędkości oraz widok sondy pokazano na rysunku 2. Ważnym elementem w pomiarach sondą PEMS-E30 jest prawidłowe ustawienie miernika, a szczególnie orientacja głowicy pomiarowej i związana z tym interpretacja uzyskanych wyników. Sondę należy zorientować zgodnie z kierunkiem nawiązania, według oznaczeń podanych na obudowie lub powierzchni, na której wydrukowany jest numer urządzenia. Kierunek dodatniej półosi prędkości Vx powinien być zgodny z wybranym kierunkiem odniesienia, według którego ustalamy wychylenie wektora prędkości powierzchniowej Ve, np. z osią koryta, osią przelewu, płaszczyzną ściany filara lub przyczółka. Mocowanie przesuwne miernika powinno zapewniać przemieszczanie się głowicy do punktów pomiarowych, z zachowaniem ustalonego kierunku położenia głowicy względem współrzędnych układu odniesienia.

**Miernik MicroADV.** Akustyczny miernik prędkości przystosowany jest do pomiaru składowych przestrzennych prędkości wody Vx, Vy, Vz [Technical Documentation 2001]. Sondy ADV wykonywane są w kilku wersjach pomiarowych. Dostępne są mierniki oceaniczne, duże mierniki terenowe oraz konstrukcje Micro nadające się do wykorzystania w laboratoriach. Na rysunku 3 pokazano szkic głowicy, układ współrzędnych (3V) oraz widok sondy miernika MicroADV.

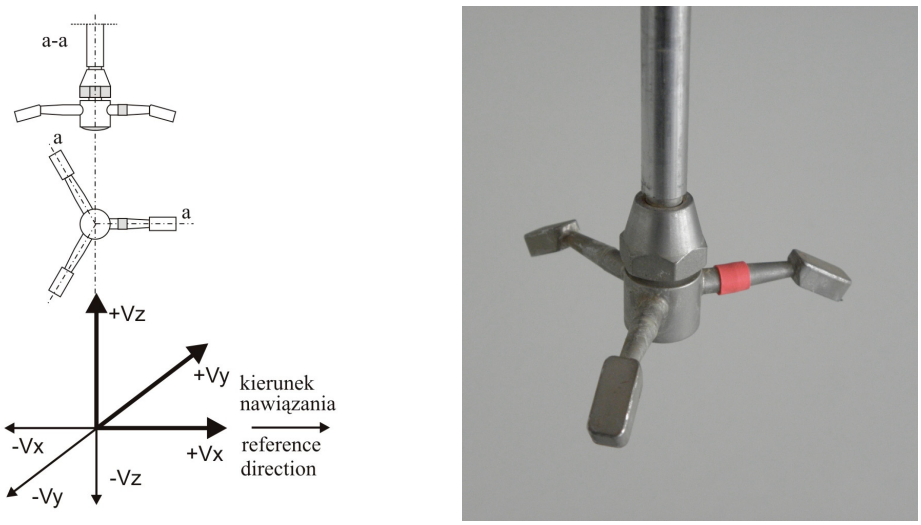
a) b)




**Rysunek 2.** Miernik PEMS-E30: a – szkic czujnika i układ współrzędnych, b – widok czujnika

**Figure 2.** Liquid Velocity Meter PEMS-E30: a – sketch of the probe and the coordinate system, b – view of the probe

a) b)




**Rysunek 3.** Miernik MicroADV: a – szkic czujnika i układ współrzędnych, b – widok czujnika

**Figure 3.** Acoustic Doppler Velocimeter MicroADV: a – sketch of the probe and the coordinate system, b – view of the probe

Mają one *„trójpalczaste”* głowice pomiarowe, montowane na stalowych żerdziach lub elastycznych przewodach. Ich sondy mogą być ustawiane pionowo do dołu (*down-looking)*, pionowo do góry (*up-looking*) oraz poziomo (*back-looking*). W prostych pomiarach prędkości w laboratorium zdaje się być najbardziej przydatna sonda laboratoryjna MicroADV, zamocowana na przewodzie elastycznym, z głowicą typu *down-looking*. Wielkościami uzyskiwanymi z sondy są wartości składowych prędkości Vx, Vy, Vz, powierzchniowa prędkość wypadkowa Ve, kąt $\alpha_{ADV}$ odchylenia wektora prędkości Ve od kierunku dodatniej półosi prędkości Vy, prędkość średnia Vm oraz statystyki cząstkowe. Dokładność pomiaru miernikiem prędkości wody wynosi ±1,0% mierzonej wartości.

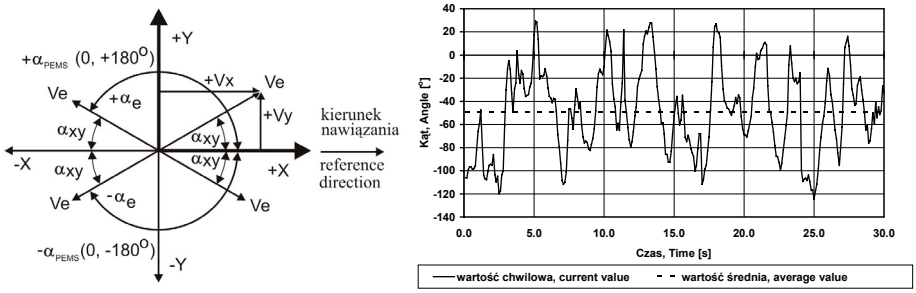
## METODY BADAŃ

Ze względu na różnice konstrukcyjne głowic pomiarowych sond PEMS-E30 oraz MicroADV różnią się warunki brzegowe pomiaru prędkości wody tymi miernikami. W korytach z dnem nierozmywalnym dotyczy to w szczególności pomiarów w pobliżu dna, ścian budowli i skarp koryta. Pionowa odległość pomiarowa czujnika PEMS-E30 od stałej zabudowy powinna wynosić nie mniej niż 1,0 cm, a boczna odległość 0,5 cm, co przy średnicy sondy E30 daje odległość środka układu pomiarowego od ściany wynoszącą 2,0 cm. W pomiarach przy powierzchni sonda powinna być zanurzona w wodzie z zachowaniem kontaktu metalowej żerdzi z wodą. Daje to położenie punktu pomiaru pod zwierciadłem wody na głębokości 2,0 cm. Minimalna głębokość pomiarowa strumienia wynosi więc 3,0 cm. Oczywiste jest, że wielkość ta może być zachowana wyłącznie w sytuacjach, gdy wprowadzona w strumień płynącej wody sonda nie zmienia warunków przepływu. Sonda MicroADV wymaga, aby bryła pomiarowa wiązki znajdowała się przynajmniej 2,0 cm ponad dnem. Wymóg zanurzenia głowicy w wodzie daje minimalną głębokość pomiarową równą 8,0 cm. Pomiary powierzchniowe mogą być prowadzone nie bliżej niż 6,0 cm pod zwierciadłem wody. Pomiarowa odległość sondy od pionowych ograniczeń bocznych wynosi 1,0 cm, co pozwala na wykonanie pomiaru prędkości w odległości 3,0 cm od ścian pionowych. Przy pomiarach skarpowych odległości te zależą od nachylenia skarpy.

W korytach z dnem rozmywalnym głowice pomiarowe mogą wpływać na tworzące się rozmycie. Obserwacje ruchomego dna wykazały, że przy pomiarach sondą PEMS-E30 zbliżanie głowicy pomiarowej do piaszczystego dna powoduje wynoszenie materiału i powstawanie lokalnego rozmycia. Intensywność tego procesu zależy od stabilności powstałego wyboju. W początkowej fazie tworzenia się wyboju wpływ ten jest bardzo wyraźny. Przy ustabilizowanym profilu rozmycia proces ten zanika. Znacznie mniejsze oddziaływanie na dno ma sonda miernika MicroADV.

**Miernik PEMS-E30.** Wartości i znaki wyprowadzanych wielkości wskazują na odchylanie się wektora prędkości od kierunku, według którego orientowana jest oś prędkości Vx. W oznaczaniu położenia wektorów i wartości prędkości został użyty płaski układ kartezjański OXY (rys. 4a). Dla przyjętego podziału na ćwiartki znaki przy wartościach prędkości składowych (Vx, Vy) w poszczególnych ćwiartkach są następujące: I (+,+), II (−,+), III (−,−) oraz IV (+,−). Numeracja ćwiartek rozpoczyna się od prawej górnej ćwiartki i przebiega przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. W odniesieniu do uzyskiwanych wartości kąta odchylenia $\alpha_{PEMS}$ przyjęto układ podwójnie skrętny. Kąt $\alpha_{PEMS}$ wychylenia wektora prędkości powierzchniowej Ve przyjmuje wartości od $0^o$ do $\pm 180^o$ i jest ustalany według kierunku dodatniej półosi prędkości Vx. Dla I i II ćwiartki układ jest prawoskrętny i wartości kąta są dodatnie ($+\alpha_{PEMS}$). Dla III i IV ćwiartki oznaczenie kąta prędkości wypadkowej przyjęto według układu lewoskrętnego. W tej półpłaszczyźnie wartości kąta wychylenia prędkości powierzchniowej są ujemne ($-\alpha_{PEMS}$). Kąt wychylenia wypadkowej powierzchniowej $\alpha_e$ jest równy kątowi wyprowadzanemu z miernika ($\alpha_e = \pm\ \alpha_{PEMS}$). Wartości kąta $\alpha_e$ można również określić według schematu na ryunku 4a, wykorzystując kąty $\alpha_{xy}$ wyliczone według wartości powierzchniowych prędkości składowych Vx i Vy. Taka interpretacja kąta wychylenia kierunku prędkości powierzchniowej Ve pozwala na jednoznaczne wyznaczenie wychylenia głównego kierunku przepływu względem kierunku odniesienia. Na rysunku 4b pokazano wykresy zmian chwilowych kątów wychylenia prędkości powierzchniowych Ve, dla pomiarów wykonanych miernikiem PEMS-E30. Wprowadzenie podwójnie skrętnego układu znacznie polepsza interpretację wychylenia kierunku przepływu oraz pozwala na określenie obszaru oddziaływania warunków napływu na wartości składowych poziomych prędkości przepływu. Z wykresu pokazanego na rysunku 4b wynika, że kąt wychylenia wektora prędkość Ve przyjmuje wartości ujemne i dodatnie, a jego średnia wartość jest równa $-49^o$.

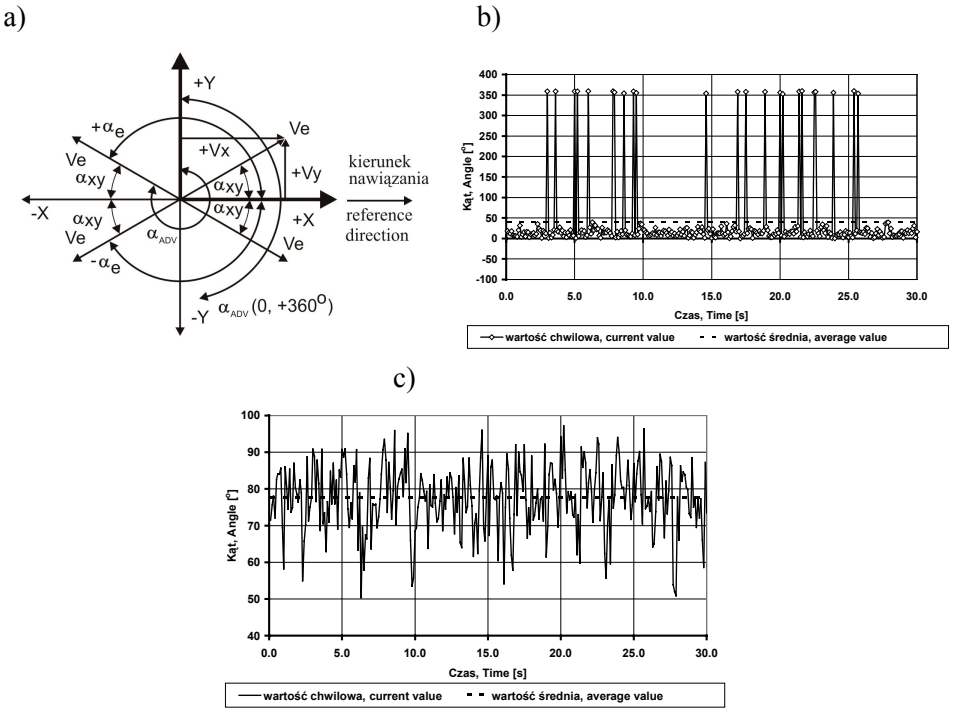
a) b)




**Rysunek 4.** Układ prędkości miernika PEMS-E30: a – oznaczenie kątów, b – kąt odchylenia prędkości powierzchniowej

**Figure 4.** Velocities Coordinate System of the PEMS-E30: a – marking the angles, b – deviation angle of the surface

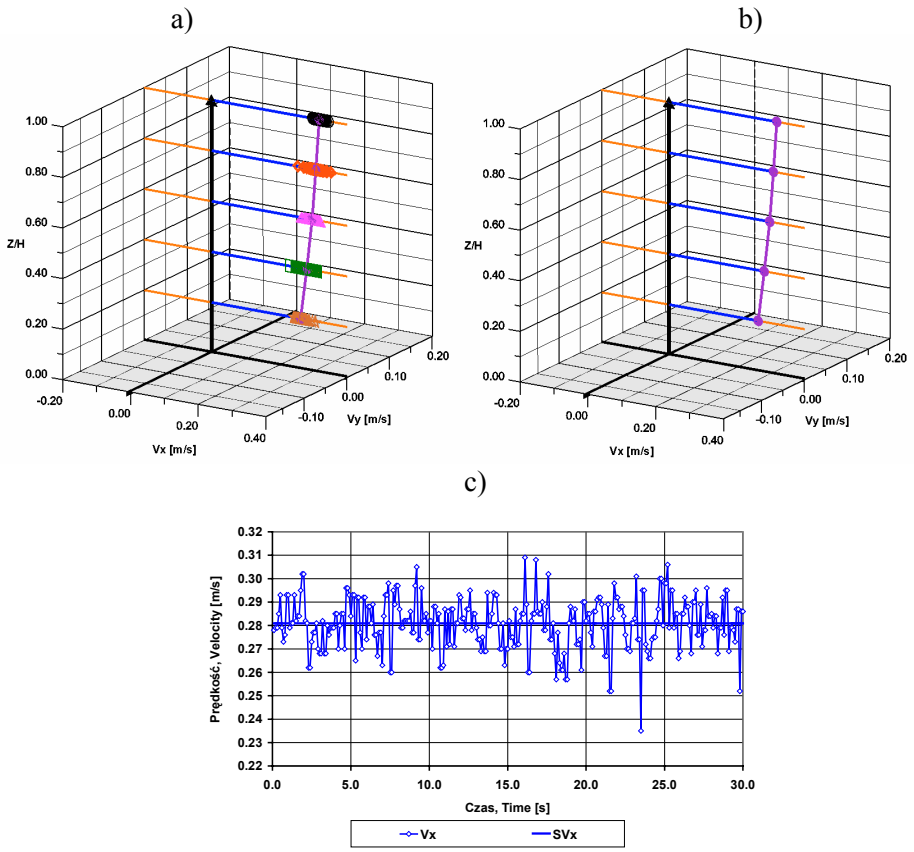
oraz kątów $\alpha_{ADV}$ działania prędkości powierzchniowej Ve wskazują na zastosowanie lewoskrętnego układu współrzędnych OXYZ. Wartość kąta $\alpha_{ADV}$ odniesiona jest do dodatniej półosi OY i zmienia się w zakresie od 0 do 360°. Kąt $\alpha_e$ wychylenia wektora prędkości Ve dla ćwiartek I, III i IV jest wyliczany z zależności $\alpha_e = 90^o - \alpha_{ADV}$, a dla ćwiartki II z zależności $\alpha_e = 450^o - \alpha_{ADV}$. Układ nawiązania kąta $\alpha_{ADV}$ jest obrócony w prawo wokół w osi OZ o 90° względem kierunku wyznaczania kata $\alpha_e$. Wartości kąta $\alpha_e$ można obliczyć według kątów $\alpha_{xy}$, wykorzystując schemat na rysunku 5a. W analizach wyników uzyskanych z miernika MicroADV kąt $\alpha_e$ wprowadzono analogicznie jak w mierniku PEMS-E30, co umożliwia prowadzenie analiz porównawczych. Na rysunku 5b pokazano wyniki pomiarów kąta $\alpha_{ADV}$, a na rysunku 5c obliczone wartości kąta $\alpha_e$ dla tego samego pomiaru. W pierwszym przypadku średnia wartość kąta $\alpha_e$ wyniosła +40°, w drugim +77°. Wynika to z faktu, że wartość dodatniego kąt wychylenia wektora prędkości $\alpha_{ADV}$ w II ćwiartce jest zbliżona do 360°, gdy w rzeczywistości wychylenie to jest nieznacznie większe od kąta $\alpha_e = +90^o$.




**Rysunek 5.** Układ prędkości miernika MicroADV: a – oznaczenie kątów, b – kąt działania prędkości powierzchniowej, c – kąt odchylenia prędkości powierzchniowej
**Figure 5.** Velocities Coordinate System of the MicroADV: a – marking the angles, b – action angle of the surface velocity, c – deviation angle of the surface velocity

## WYNIKI BADAŃ

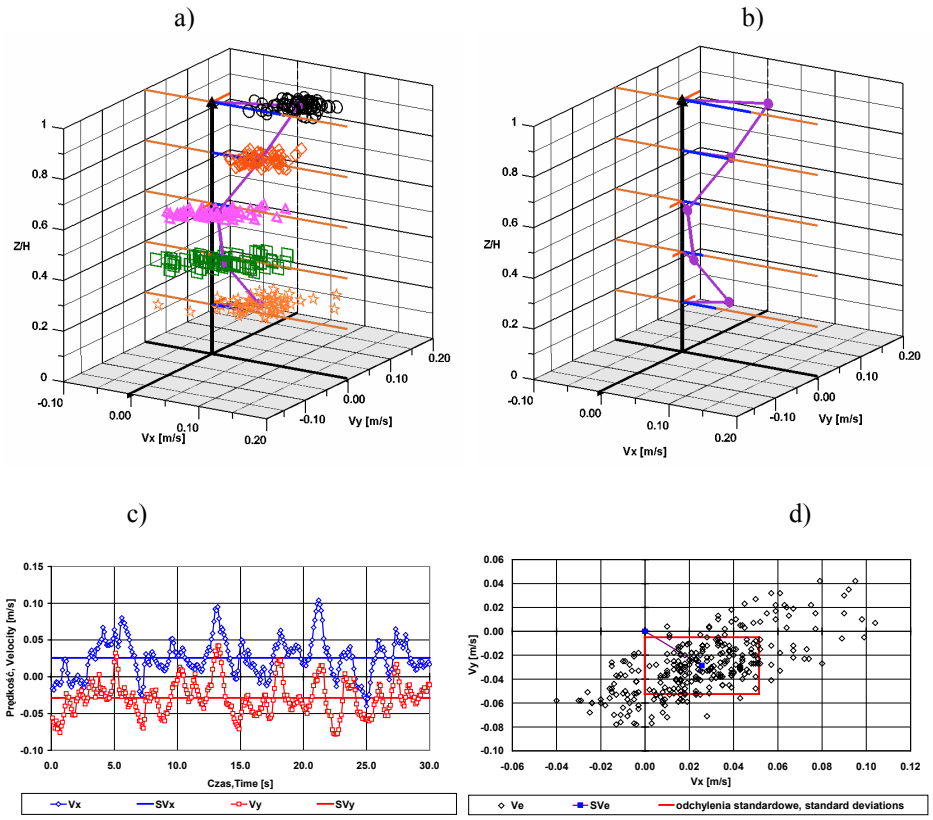
**Pomiary liniowe.** Na rysunku 6 pokazano wykres obrazujący wyniki pomiarów prędkości wody typu 1V. Jest to pomiar składowej prędkości Vx na różnych wysokościach pionu hydrometrycznego. Dla wyznaczonych poziomów pomiarowych uzyskiwane są wartości chwilowe Vx składowej podłużnej (rys. 6c). Na podstawie uzyskanych wyników obliczane są wartości średnie SVx, które odniesione do poziomów pomiarowych tworzą tachoidę prędkości (rys. 6b). W analizach tych wartości prędkości podłużnej ustalane są w założeniu przepływu osiowego lub niewielkiego wpływu pulsacji poprzecznych.




**Rysunek 6.** Wyniki pomiarów prędkości podłużnej: a – prędkość Vx, b – prędkość średnia SVx, c – seria pomiarowa dla Z/H = 0,4
**Figure 6.** Measurement results of the longitudinal velocity: a – velocity Vx, b – mean velocity SVx, c – time test series for Z/H = 0,4

**Pomiary powierzchniowe.** Analiza obszarowa rozkładów prędkości Vx i Vy pozwala określić wpływ ograniczeń przepływu na zmienność prędkości kierunkowych. Zagęszczenie punktów obrazujących chwilowe prędkości powierzchniowe wskazuje na częściej pojawiające się wartości prędkości podłużnych i poprzecznych.

Na rysunku 7 przedstawiono rozkłady prędkości w pionie hydrometrycznym wyników pomiarów typu 2V. Wartości chwilowych prędkości podłużnych Vx oraz poprzecznych Vy pozwalają określić kierunek napływu wody w obszar pomiaru. Na rysunku 7c pokazano czasową zmienność tych prędkości na poziomie Z/H = 0,6. Wektor wypadkowej prędkości powierzchniowej odchyla się od kierunku odniesienia do ujemnych wartości prędkości poprzecznej Vy (rys. 7d).

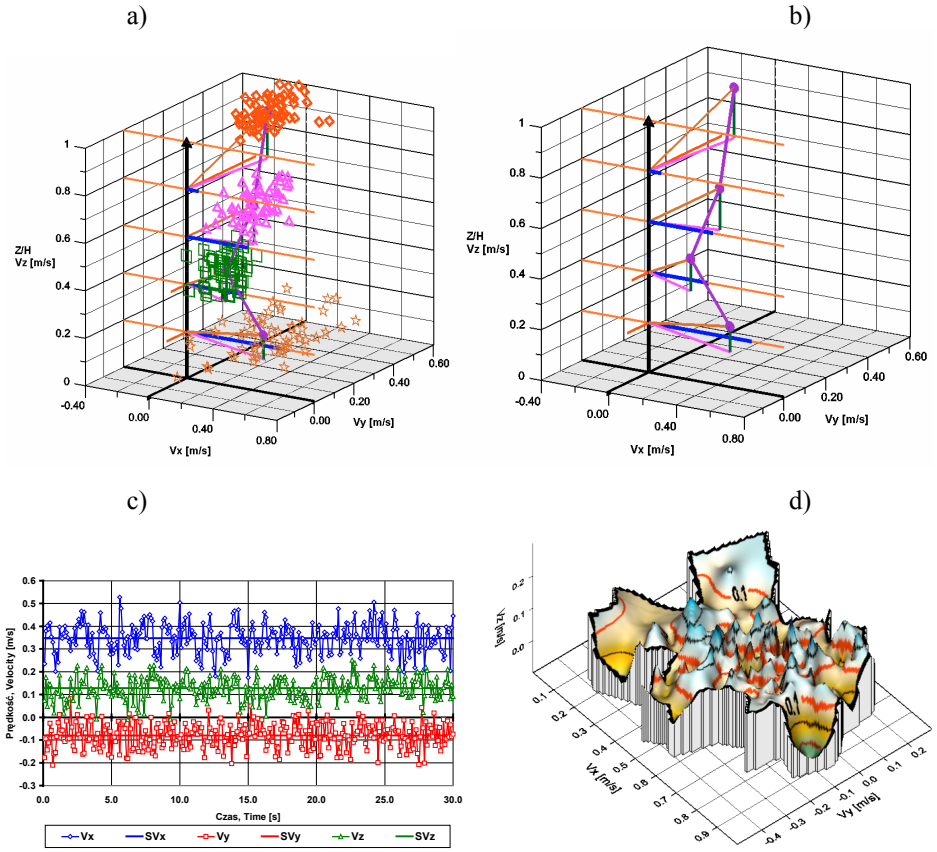



**Rysunek 7.** Wyniki pomiarów prędkości powierzchniowej: a – prędkość Ve, b – prędkości średnie, c – seria pomiarowa dla Z/H= 0,6, d – rozkład prędkości powierzchniowej dla Z/H = 0,6

**Figure 7.** Measurement results of the surface velocity: a – velocity Ve, b – mean velocities, c – time test series for Z/H = 0,6, d – distribution of the surface velocity for Z/H = 0,6

Wartości pomierzonych prędkości poprzecznych, jak i podłużnych wykraczają poza wartości osiowych odchyleń standardowych. Zmienność wartości prędkości podłużnej jest większa od zmienności prędkości poprzecznej. W prezentowanym pionie na wysokości Z/H = 0,6 stabilność przepływu poprzecznego jest większa od stabilności przepływu w kierunku podłużnym.

**Pomiary przestrzenne.** Pomiary przestrzennych składowych prędkości przepływu wody umożliwiają określenie zmian kierunku przepływu wody oraz pulsacji prędkości w kierunku jednej z trzech składowych. Szczególnie cenna w badaniach jest możliwość wykorzystania składowej pionowej prędkości. Znajomość jej pozwala ustalić warunki podrywania z dna cząstek materiału dennego i dalszego ich transportu.




**Rysunek 8.** Wyniki pomiarów prędkości przestrzennej: a – prędkość Vs, b – prędkości średnie, c – seria pomiarowa dla Z/H= 0,4, d – rozkład prędkości pionowej dla Z/H = 0,2
**Figure 8.** Measurement results of the spatial velocity: a – velocity Vs, b – mean velocities, c – time test series Z/H = 0,4, d – distribution of the vertical velocity for Z/H = 0,2

Na rysunku 8 pokazano wyniki pomiaru prędkości typu 3V wykonane miernikiem MicroADV. Przestrzenny rozkład prędkości na wyznaczonych poziomach pomiarowych przedstawia rysunek 8a. Układ wektorów średnich wartości prędkości składowych, prędkości powierzchniowej oraz przestrzennej pokazano na rysunku 8b, na którym wykreślono również przestrzenną tachoidę prędkości. Analizę składowych prędkości przestrzennej prowadzimy z reguły oddzielnie dla każdego kierunku, ustalając ich statystyki: wartości średnie, minimalne, maksymalne, odchylenia standardowe. Czasową zmienność wartości chwilowych składowych prędkości Vx, Vy, Vz przedstawia rysunek 8c. Do kreślenia wielkości pulsacyjnych składowej Vz wymagana jest znajomość czasowej zmienności tej prędkości. Lokalizację „obszarów" najczęstszego występowania kierunków przepływu można wykonać dla układu płaskiego Vx, Vy, tak jak w pomiarach powierzchniowych 2V. Wykresy 3V pozwalają ustalić charakter rozkładu prędkości pionowych Vz. Dla ustalenia charakteru i tendencji zmian przeważających prędkości pionowych wykorzystać można przestrzenne wykresy Vz, wykonane w obrębie pojawiania się wartości prędkości powierzchniowych. Na rysunku 8d pokazano wykres zmienności prędkości Vz dla poziomu pomiarowego Z/H = 0,20. Z analiz wykresu wynika, że w badanym punkcie przeważały prędkości pionowe „wznoszące" większe od zera. Przepływ opadający pojawiał się sporadycznie. W obszarach zewnętrznych układu częstość pomiaru jest mniejsza, a pojawiające się prędkości pionowe są mniejsze. Zmniejszenie prędkości powierzchniowych skutkuje zwiększaniem się składowej pionowej (obszar w pobliżu środka układu).

## WNIOSKI

Obserwacje dokonane w trakcie montażu mierników, podłączania do systemu oraz w czasie wykonywania pomiarów wykazały, że:

1. Wykorzystanie nowoczesnych technik pomiarowych w laboratoriach wodnych umożliwia wszechstronne rozpoznanie parametrów strumienia wody, a dysponowanie pełnymi pomiarami prędkości obejmującymi składowe przestrzenne Vx, Vy, Vz pozwala na zdefiniowanie zjawisk powstających przy pulsacyjnych i nierównomiernych przepływach wody na modelach fizycznych.
2. Wykonywanie pomiarów prędkości wody miernikami elektromagnetycznymi i akustycznymi wymaga ustalenia zasad orientacji układu odniesienia i prawidłowej interpretacji uzyskiwanych wyników.
3. W badaniach laboratoryjnych do orientacji urządzeń wykorzystuje się kartezjański układ współrzędnych, zorientowany według ustalonego kierunku odniesienia.
4. Mierniki przeznaczone do badań terenowych, z możliwością ich przemieszczania, wymagają orientacji dodatkowej. Wykorzystuje się wtedy geograficzne światowe układy odniesienia (ECEF, ECF) lub lokalne (ENU, NED).

5. Wykorzystując elektroniczne urządzenia pomiarowe i transmisyjne częstotliwość próbkowania oraz okres pomiaru i uśredniania wyników, należy ustalić w zależności od rodzaju prowadzonych badań oraz dopuszczalnych niepewności pomiarowych. Ważnym czynnikiem w ustalaniu długości serii jest cel, któremu mają służyć pomiary. Dla pomiarów punktowych w ustalonych warunkach przyjmowane są dłuższe czasy próbkowania i krótkie serie pomiarowe. Przy pomiarach przepływów o dużej intensywności turbulencji korzystniejsze są krótkie czasy próbkowania i długie serie pomiarowe.

## BIBLIOGRAFIA

Bajkowski S. *System pomiarowo-kontrolny Laboratorium Hydraulicznego SGGW*. Bezpieczeństwo zapór – bezpieczeństwo ludności i środowiska, IMGW Warszawa 2009, s. 195–203.

*Manual P-EMS. Programmable electromagnetic liquid velocity meter*. Delft Hydraulics, The Netherlands, 2007, s. 44.

*Operating Instruction*. Nautilus C 2 000. Sensa Z 300, OTT Hydrometrie Germany 1992, s. 27.

*Technical Documentation.* Son Tek/YSI ADV Field/Hydra. Acoustic Doppler Velocimeter. ADV Field/Hydra System, San Diego USA 2001, s. 228 .

Dr inż. Sławomir Bajkowski
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
ul. Nowoursynowska 166
02-787 Warszawa
e-mail: slawomir_bajkowski@sggw.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. Włodzimierz Parzonka*