

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ I MECHANIKI PŁYNÓW

Raport z serii PREPRINTY nr 23/2004

**ULTRADŹWIĘKOWA METODA
WYZNACZANIA ROZKŁADÓW PRZESTRZENNYCH
BINARNYCH MIESZANIN GAZÓW**

Wojciech GIZICKI

Słowa kluczowe:
hel
ultradźwiękowa metoda pomiaru
mieszanina gazów

Praca doktorska
Promotor: dr hab. inż. Maciej CHOROWSKI, prof. PWr

Praca zrealizowana w ramach współpracy pomiędzy Wydziałem Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej i Europejską Organizacją Badań Jądrowych CERN w Genewie, uregulowanej umową nr K595/LHC/LHC.

Wrocław 2004

PODZIĘKOWANIA

Specjalne podziękowania składam promotorowi prof. Maciejowi Chorowskiemu oraz dr inż. Januszowi Wachowi za cenne wskazówki w trakcie realizacji niniejszej pracy.

Inż. Wiesławowi Ostropolskiemu dziękuję za pomoc przy przygotowywaniu aparatury doświadczalnej.

Spis treści

1.	Wprowadzenie	5
2.	Geneza zagadnienia	6
2.1.	Instalacje techniczne wykorzystujące duże ilości helu	6
2.2.	Powody warunkujące konieczność wyznaczania rozkładów przestrzennych mieszanin gazów	8
2.3.	Pomiar stężenia gazów w mieszaninach.....	9
2.3.1.	Czujniki do pomiaru koncentracji tlenu w atmosferze.....	9
2.3.2.	Czujniki do pomiaru koncentracji gazów innych niż tlen.....	10
2.4.	Przegląd obszarów zastosowań techniki ultradźwiękowej.....	11
2.4.1.	Zastosowania techniki ultradźwiękowej w badaniach ciał stałych i środowisk wodnych	12
2.4.2.	Zastosowania techniki ultradźwiękowej w badaniach ośrodków gazowych ...	13
2.4.3.	Technika tomografii akustycznej	14
2.5.	Możliwość zastosowania ultradźwiękowej techniki pomiarowej w obecności promieniowania jonizacyjnego.....	15
3.	Cel i tezy pracy	17
4.	Analiza teoretyczna zagadnienia - teoretyczne możliwości zastosowania metody ultradźwiękowej	18
4.1.	Analiza termodynamicznych własności wybranych gazów kriogenicznych pod kątem możliwości zastosowania metody akustycznej.....	18
4.2.	Analiza wpływu wybranych czynników na możliwość zastosowania techniki ultradźwiękowej	25
4.2.1.	Zasadność wykorzystania pasma ultradźwiękowego	25
4.2.2.	Tłumienie fali akustycznej	27
4.2.3.	Charakterystyka kierunkowa źródła fali.....	29
4.2.4.	Fala akustyczna w poruszającym się ośrodku	31
4.3.	Technika tomografii ultradźwiękowej.....	33
4.3.1.	Metoda tomograficzna.....	33
4.3.2.	Zasada pracy tomografu ultradźwiękowego.....	34
4.3.3.	Metody rekonstrukcji obrazu.....	35
4.4.	Założenia budowy systemu pomiarowego	37

5.	Badania doświadczalne	41
5.1.	Zakres i cele badań	41
5.2.	Wyznaczenie składu wzorcowych mieszanin powietrza z helem metodą ultradźwiękową.....	42
5.3.	Zastosowanie tomografu ultradźwiękowego do pomiaru przestrzennego rozkładu helu oraz niejednorodnego pola temperatury w badanym obszarze.....	48
5.3.1.	Budowa układu tomografu ultradźwiękowego.....	48
5.3.2.	Korekcja błędu pomiaru czasu powstającego na skutek tłumienia fali.....	52
5.3.3.	Procedura pomiarowa i uzyskane wyniki.....	53
5.4.	Pomiary przestrzennego rozkładu helu w modelu kanału akceleratora LHC dla różnych przypadków przepływu, weryfikacja metodą elektrochemiczną.....	57
5.4.1.	Stanowisko badawcze i procedura pomiarowa.....	57
5.4.2.	Wyniki pomiarów i ich analiza.....	60
5.5.	Pomiary porównawcze szybkości dyfuzji helu metodą ultradźwiękową i elektrochemiczną.....	66
5.6.	Badania odporności ultradźwiękowego układu pomiarowego na promieniowanie jonizujące.....	70
5.6.1.	Stanowisko badawcze.....	70
5.6.2.	Wyniki badań wpływu promieniowania jonizacyjnego na układ pomiarowy i ich analiza.....	75
5.7.	Ocena niepewności pomiarowej.....	83
5.7.1.	Niepewność pomiaru udziału helu w mieszaninach wzorcowych	83
5.7.2.	Niepewność pomiaru czasu propagacji urządzeniem wykorzystanym podczas badań odporności ultradźwiękowego układu pomiarowego na promieniowanie jonizujące.....	86
6.	Podsumowanie i wnioski końcowe	87
7.	Literatura	90
	Załącznik A	96
	Załącznik B	99

1. Wprowadzenie

W roku 1873, pracujący w Krakowie Karol Wróblewski i Zygmunt Olszewski, po raz pierwszy skroplili powietrze i jego składniki dając tym samym początek kriogenice, czyli metodom uzyskiwania i wykorzystywania niskich temperatur. Niskie temperatury są przede wszystkim otrzymywane poprzez skroplenie, a następnie odparowanie gazów takich jak azot, argon, tlen, neon, wodór i hel. Początki przemysłowych zastosowań kriogeniki sięgają końca XIX wieku, gdy na potrzeby szybko rozwijającego się przemysłu metalurgicznego zaczęto wytwarzać na dużą skalę tlen i azot poprzez rektyfikację skroplonego powietrza. Współczesne instalacje rektyfikacji powietrza i gazu ziemnego wytwarzają tysiące Mg (ton) ciekłych gazów na dobę. W niskotemperaturowych procesach przetwórstwa gazu ziemnego, pozyskiwany jest również praktycznie cały hel zużywany obecnie na Ziemi. W związku z planami zastosowania wodoru jako paliwa, rozwijane są technologie masowego wytwarzania i przechowywania tego pierwiastka w postaci ciekłej.

Obecnie można wskazać na dwa główne obszary zastosowań kriogeniki:

- wytwarzanie, transport oraz przechowywanie gazów w postaci ciekłej wykorzystywanych następnie w hutnictwie, metalurgii, przemyśle chemicznym, wytwarzaniu energii, medycynie i innych dziedzinach;
- wytwarzanie i utrzymywanie niskich temperatur pozwalających m.in. na prowadzenie badań naukowych w niskich temperaturach, w tym kriostatowanie nadprzewodników i instalacji wykonanych z materiałów nadprzewodzących.

Przemysłowe kriogeniczne systemy rektyfikacji powietrza i gazu ziemnego zawierają nawet tysiące ton skroplonych gazów (metanu, azotu, tlenu, argonu, wodoru i helu). Największe kriogeniczne instalacje badawcze, wielokilometrowe akceleratory cząstek z nadprzewodzącymi magnesami wykonanymi ze stopu NbTi, wykorzystują ciekły hel w ilościach dochodzących do 0,1 Gg (100 ton).

Pomimo dużej niezawodności instalacji i urządzeń wykorzystujących ciecz kriogeniczną, niemożliwe jest całkowite wykluczenie zdarzeń prowadzących do wypływu czynnika do otoczenia. Intensywny wypływ czynnika kriogenicznego do otoczenia może być także działaniem celowym np. w trakcie gaszenia pożarów w kopalniach lub rozładowywania kriostatów po przejściach rezystywnych magnesów nadprzewodzących. W takich zdarzeniach konieczna jest ocena składu atmosfery w pobliżu miejsca wypływu kriogenu tak, aby zapobiec ewentualnym sytuacjom mogącym zagrozić zdrowiu i życiu człowieka, powodowanym obniżaniem się zawartości tlenu lub spadkiem temperatury powietrza. Konieczna staje się umiejętność wyznaczania składu mieszanin gazów kriogenicznych i powietrza, a w szczególności ocena koncentracji tlenu w takiej mieszaninie.

Metody pomiarowe składu takich mieszanin powinny być szybkie, niezawodne i tanie, natomiast niepewności pomiarowe nie powinny powodować błędnej interpretacji stanu zagrożenia wynikającego z obniżonej zawartości tlenu.

W związku z występującymi problemami w szybkim i nieinwazyjnym wyznaczaniu składu różnorodnych mieszanin gazowych za pomocą standardowo używanych metod pomiarowych istnieje konieczność poszukiwań alternatywnych sposobów wykonania takich pomiarów. Jedną z nowych metod jest wykorzystanie właściwości fali akustycznej rozprzestrzeniającej się w badanym ośrodku. Metoda taka, mimo od dawna szeroko znanych podstaw jej działania, jest jak do tej pory stosunkowo mało poznana szczególnie, jeśli chodzi o aplikacyjne wykorzystanie złożonych układów akustycznych w środowiskach gazowych, takich jak np. gazowy tomograf ultradźwiękowy.

Poszukiwanie alternatywnych metod wyznaczania składu mieszanin gazowych związane jest również ze specyficznymi warunkami, w jakich urządzenia takie zmuszone są pracować. Największe działające helowe systemy kriogeniczne wykorzystywane są do zapewnienia odpowiedniej temperatury pracy wysokoenergetycznym, nadprzewodzącym akceleratorom cząstek, mieszczącym się w dużych laboratoriach naukowych w Europie, Stanach Zjednoczonych i Japonii. W laboratoriach tych, urządzenia pomiarowe zlokalizowane w tunelach akceleratorów, są wyeksponowane na działanie degradującego promieniowania jonizacyjnego.

W pracy przeprowadzono teoretyczną analizę możliwości wykorzystania fal ultradźwiękowych do wyznaczania składu wybranych, dwuskładnikowych mieszanin gazów, przy czym powietrze jest traktowane jako pojedynczy składnik. Na tej podstawie podjęto próbę teoretycznego określenia podstawowych wymagań dotyczących budowy ultradźwiękowego systemu pomiarowego, pracującego w ośrodku gazowym. W dalszej kolejności skonstruowano prosty przyrząd do pomiaru średniego składu badanego ośrodka gazowego oraz prototypowy tomograf ultradźwiękowy służący do wyznaczania przestrzennego rozkładu udziałów składników w mieszaninie gazów. Oba te urządzenia mogą również służyć do pomiaru średniej temperatury lub jej przestrzennego rozkładu w przypadku ośrodka gazowego o znanym składzie. Działanie urządzeń zostało przetestowane i pozytywnie zweryfikowane w trakcie badań eksperymentalnych. Dodatkowo przeprowadzono testy możliwości użycia proponowanej techniki pomiarowej w warunkach promieniowania jonizacyjnego.

Otrzymane wyniki eksperymentalne potwierdziły wynikającą z teorii możliwość wyznaczania zarówno średniego składu, jak i przestrzennego rozkładu, udziału składników w binarnych mieszaninach gazów. Jednocześnie potwierdzona została wystarczająca dokładność techniki pomiarowej dla zastosowań w systemach bezpieczeństwa, nawet w warunkach narażonych na działanie promieniowania jonizacyjnego.

2. Geneza zagadnienia

2.1. Instalacje techniczne wykorzystujące duże ilości helu

Na świecie użytkowanych jest wiele instalacji kriogenicznych wykorzystujących ciekły hel, często w znacznych ilościach. Służy on przede wszystkim do chłodzenia magnesów nadprzewodzących, które znalazły zastosowanie w tomografach wykorzystujących zjawisko rezonansu magnetycznego, reaktorach wysokotemperaturowej fuzji jąder wodoru, akceleratorach cząstek, reaktorach magneto-hydrodynamicznych, systemach separacji magnetycznej i innych urządzeniach technicznych. Pomimo odkrycia w roku 1986 zjawiska nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego, do wytwarzania magnesów nadprzewodzących w dalszym ciągu stosuje się niemal wyłącznie stop niobu z tytanem ($NbTi$) i w mniejszym zakresie związek międzymetaliczny niobu z cyną (Nb_3Sn). Temperatury krytyczne $NbTi$ oraz Nb_3Sn wynoszą odpowiednio 9,3 K i 18 K, stąd jedynie hel o normalnej temperaturze wrzenia 4,2 K może być stosowany do ich ziębienia.

Wielkość systemu kriogenicznego zależy od typu urządzenia. W powszechne użytkowanych tomografach szpitalnych zapotrzebowanie na ciekły hel dochodzi do kilkudziesięciu kilogramów. Dużo większe systemy znajdują się już w reaktorach wysokotemperaturowej fuzji jąder wodoru. Badania nad wykorzystaniem fuzji atomowej prowadzone są między innymi w Stanach Zjednoczonych [9], w Rosji [89] oraz w Korei [58]. Największym prowadzonym obecnie projektem badawczym w tej dziedzinie jest międzynarodowy projekt International Thermonuclear Experimental Reactor ITER [7]. W przedsięwzięciu tym uczestniczą Stany Zjednoczone, Unia Europejska, Japonia oraz Rosja. Budowany tokamak ITER wykorzystywać będzie szereg magnesów nadprzewodzących typu

Nb_3Sn oraz $NbTi$ chłodzonych ciekłym helem [8, 33, 55]. Całkowita objętość ciekłego helu o temperaturze 4,5 K przekraczać będzie 200 m³ [76], a jego masa przekroczy 25 Mg.

Największe systemy kriogeniczne znajdują się w nadprzewodzących akceleratorach cząstek. W urządzeniach takich instalacje kriogeniczne używają ciekły hel w ilościach dochodzących do kilkudziesięciu, a nawet prawie stu Mg. Liczba wszystkich użytkowanych akceleratorów mieszczących się w różnych laboratoriach na całym świecie, wliczając w to akceleratory przemysłowe i wykorzystywane w medycynie, dochodzi do 15 000 [2]. Wśród nich są wielkie akceleratory wykorzystujące magnesy nadprzewodzące ziębione ciekłym helem, wykorzystywane w celach naukowych w laboratoriach badawczych. Do najważniejszych ośrodków naukowych przeprowadzających badania z wykorzystaniem takich akceleratorów należą CERN w Genewie, Brookhaven National Laboratory w stanie New York, DESY w Hamburgu, GSI w Darmstadt, Lure w Orsay, RAL w Appleton [27]. Podstawowe dane przykładowych akceleratorów wykorzystujących magnesy nadprzewodzące ziębione ciekłym helem przedstawiono w Tab. 2-1

Tab. 2-1. Nadprzewodzące akceleratory oziębiane helem [20]

Akcelerator laboratorium miejsce	Typ cząstek	Długość	Pole	Energia	Masa helu	Temperatura pracy	Ekwiwalentna moc chłodnicza @ 4,2 K	Uwagi
		km	Tesla	TeV	Mg	K	W	
TEVATRON FERMILAB Chicago	p p	6,3	4,4	0,9	15	4,5	23	Planowane zwiększenie energii do 2 x 1,0 TeV
HERA DESY Hamburg	e ⁻ p	6,4	0,18 / 4,7	0,03 / 0,82	15	4,4	24	Akcelerator uruchomiony
LHC CERN Genewa	p p	26,7	8,4	2 x 7,0	95	1,9	144	Planowane uruchomienie w 2007 roku
RHIC Brookhaven Nowy Jork	ciężkie jony	3,8	3,45	zależy od typu cząstek	35,5	4,5	18	Akcelerator uruchomiony
CEBAF Virginia, USA	e ⁻	1,7	1,3	0,004	15	2,0	6	Akcelerator uruchomiony
LEP CERN Genewa	e ⁻ e ⁺	26,7	5,0	2 x 0,1	9,5	4,5	41	Akcelerator zatrzymany w roku 2001
TESLA DESY Hamburg	e ⁻ e ⁺	28,0	25,0	2 x 0,25	90	2,0	321	Projekt we wczesnej fazie studialnej

Akceleratory, ze względu na swoje wymiary oraz konieczność ochrony otoczenia przed promieniowaniem, ulokowane są w podziemnych tunelach. W tychże tunelach znajdują się również olbrzymie ilości ciekłego helu, zasilające kriogeniczne systemy chłodzące nadprzewodzące magnesy. Przykładowo w akceleratorze Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) mieszczącym się w Brookhaven National Laboratory w stanie New York w podziemnym tunelu o długości około 3,8 km znajduje się 35,5 Mg ciekłego helu o temperaturze 4 K [56]. Największy system kriogeniczny znajdować się będzie w budowanym obecnie akceleratorze Large Hadron Collider (LHC) w laboratorium CERN pod Genewą. Urządzenie pracować będzie w mieszczącym się od 80 do 120 m pod ziemią tunelu o długości 26,7 km i zawierać będzie 96 Mg nadciekłego helu w temperaturze 1,9 K [39, 40,

66, 67]. Prowadzone są jednocześnie prace nad dalszym rozwojem akceleratorów cząstek i budową kolejnych urządzeń do badania fizyki cząstek [71].

2.2. Powody warunkujące konieczność wyznaczania rozkładów przestrzennych mieszanin gazów

Problem bezpieczeństwa w przypadku wykorzystywania dużych ilości cieczy kriogenicznych jest zagadnieniem wieloaspektowym i omawiany jest w wielu publikacjach. Pomijając tutaj zagadnienia związane z oddziaływaniem na organizm żywy bardzo niskiej temperatury, osobnym problemem jest wyciek kriogenu do ciepłego otoczenia i związane z tym jego odparowanie oraz nagłe zwiększenie objętości. Objętość ta może się zwiększyć nawet 1000-krotnie. Jeśli zdarzenie takie następuje w zamkniętym obszarze może dojść do wyparcia powietrza i niebezpieczeństwa uduszenia się osób tam przebywających [15, 35, 36, 79, 81].

Na tego typu zagrożenia narażone są wszelkie instalacje techniczne znajdujące się w zamkniętych pomieszczeniach. Jak już wspomniano, do największych należą akceleratory cząstek, w których duże instalacje kriogeniczne umiejscowione są w tunelach głęboko pod powierzchnią ziemi. Wszędzie tam, potencjalna możliwość wystąpienia takiej awarii musi zostać dokładnie przeanalizowana.

W laboratorium CERN w Genewie przeprowadzono szereg rozważań i eksperymentów dotyczących tej kwestii. Wykazano, że w niektórych stanach awaryjnych akceleratorów spowodowanych np. równoczesnym przejściem rezystywnym wielu magnesów lub degradacją próżni izolującej cieplnie kriostaty, możliwe jest wydostanie się części helu do otoczenia i utworzenie bogatej w hel mieszaniny z powietrzem [25]. Przeprowadzono szereg eksperymentów symulujących potencjalną awarię i określających ilości uwalnianego helu oraz jego sposób rozprzestrzeniania się w tunelu [21, 22, 23]. Mieszanina zimnego helu z powietrzem szybko osiąga temperaturę zbliżoną do temperatury otoczenia i ze względu na niską gęstość unosi się do górnych partii tunelu lub komór z detektorami mogą powodować lokalne obniżenie zawartości tlenu prowadzące do zagrożenia zdrowia lub życia ludzi. W Tab. 2-2 pokazano skutki zubożenia atmosfery w tlen na człowieka.

Tab. 2-2. Objawy spadku udziału tlenu w powietrzu [36]

Zawartość O ₂ , % przy p = 1 bar	Symptomy
15—18	Spadek zdolności do wykonywania czynności; początek zaburzeń pracy serca, płuc i układu krążenia
12-15	Głębsze oddychanie, szybszy puls, słaba koordynacja ruchów
10-12	Zawroty głowy, spadek zdolności myślenia, sinienie ust
8-10	Mdłości, wymioty, utrata świadomości, sina twarz
6-8	Śmierć po 8 min.; po 6 min. 50% szans odzyskania zdrowia po leczeniu, po 4-5 min. 100% szans
4	Po 40 s śpiączka, konwulsje, śmierć

Graniczną wartością do jakiej może się obniżyć udział tlenu w atmosferze w przestrzeniach, w których przebywają ludzie jest 18%. Bezpieczna eksploatacja instalacji

kriogenicznych, w szczególności akceleratorów cząstek, wymaga budowy specjalnych systemów ostrzegania przed brakiem tlenu w atmosferze [24].

Zagrożenia tego typu analizowane są również w innych ośrodkach badawczych prowadzących badania nad fizyką cząstek, takich jak Fermi National Accelerator Laboratory w Chicago użytkujące akcelerator Tevatron lub Brookhaven National Laboratory z akceleratorem Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC). W ośrodkach tych prowadzone są badania nad sposobem uwalniania się helu podczas takiej awarii oraz nad zaprojektowaniem odpowiedniego systemu ostrzegania przed brakiem tlenu w atmosferze [38, 95, 94]. W budowanym obecnie prototypowym tokamaku ITER analizowane są różne możliwości awarii, w tym również wyciek i rozprężenie się ciekłego helu w zamkniętej przestrzeni [10]. Innym ośrodkiem badawczym zajmującym się dużymi instalacjami kriogenicznymi przeznaczonymi dla techniki kosmicznej i prowadzącym badania nad zapewnieniem bezpieczeństwa ich użytkowania jest NASA Jet Propulsion Laboratory w Pasadenie w stanie Kalifornia [74].

Interesującym obszarem badań, związanym z wyznaczaniem rozkładów przestrzennych mieszanin gazów, są prace nad rozprzestrzenianiem się dymu wraz z gorącym powietrzem, powstającego podczas pożarów w zamkniętych przestrzeniach, takich jak tunele komunikacyjne oraz wnętrza budynków lub środków transportu. Badania związane z bezpieczeństwem użytkowania takich obiektów mają coraz większe znaczenie w obliczu zdarzających się wypadków jak również coraz powszechniejszego zagrożenia działalnością terrorystyczną.

W literaturze opisywane są badania nad wykorzystaniem helu do symulacji rozchodzenia się dymu powstałego w wyniku pożaru. W pracy [83] opisano helowy symulator dymu, który został użyty do symulacji rozprzestrzeniania się dymu w kabinie samolotu. Dym powstający podczas wybuchu ognia unosi się do góry z powodu jego dużo wyższej temperatury w porównaniu z otoczeniem i wynikającej stąd mniejszej gęstości. Takich właściwości nie ma dym wytwarzany przez dostępne w handlu wytwornice. Możliwość symulacji rozprzestrzeniania się rzeczywistego, gorącego dymu daje natomiast mieszanina helu z powietrzem. W mieszaninie takiej można odpowiednio zmieniać udział helu w powietrzu w celu otrzymania odpowiedniej wyporności gazu. Przeprowadzone badania wskazują na duże jakościowe podobieństwo w rozprzestrzenianiu się gorącego dymu i mieszaniny helu z powietrzem, co stwarza możliwość prowadzenia dalszych prac nad rozwojem techniki badania skutków pożarów nie powodującej zniszczenia badanego obszaru i możliwej do zastosowania w rzeczywistych obiektach.

2.3. Pomiar stężenia gazów w mieszaninach

2.3.1. Czujniki do pomiaru koncentracji tlenu w atmosferze

Najpopularniejszym sposobem badania składu atmosfery pod kątem bezpieczeństwa znajdujących się w niej ludzi jest bezpośredni pomiar udziału tlenu w powietrzu. Badania nad rozwojem metod pomiaru tlenu w atmosferze są prowadzone od dawna i mają istotne znaczenie w takich dziedzinach jak: medycyna, biologia, fizjologia, inżynieria procesowa, energetyka oraz badania laboratoryjne. Opracowane sposoby pomiarowe można podzielić w zasadzie na dwie grupy [60]:

- metody wykorzystujące właściwości fizyczne tlenu,
- metody wykorzystujące jego własności chemiczne.

Do metod wykorzystujących fizyczne własności tlenu można zaliczyć metody oparte na podatności paramagnetycznej, zjawisku termomagnetycznym (wiatr magnetyczny),

różnicy ciśnień (z wymaganiem gazem odniesienia), wychwycie niskoenergetycznych elektronów oraz absorpcji promieniowania ultrafioletowego.

Wśród metod wykorzystujących chemiczne własności tlenu można wyodrębnić metody oparte na ogniwach z elektrolitem płynnym, takie jak metody galwaniczne, polarograficzne, czy ogniwa paliwowe oraz metody oparte na ogniwach z elektrolitem ze stopionej soli i z elektrolitem w postaci stałej.

Obecnie najbardziej popularnymi czujnikami tlenowymi wykorzystywanymi w przemysłowych systemach pomiarowych są ogniwa elektrochemiczne z elektrolitem w postaci stałej. Do ich budowy stosowany jest najczęściej elektrolit cyrkonowy (ZrO_2). Ogniwa takie są popularne ze względu na prostotę budowy, mały wymiar i niskie koszty. Nie są pozbawione jednak wad. W większości przypadków charakteryzują się nieliniowością sygnału wyjściowego, jak również są wrażliwe na obecność innych palnych gazów w badanej atmosferze. Podawana jest też w literaturze skłonność do nagłych skoków sygnału wyjściowego podczas nawet niedużych zmian ciśnienia, co może skutkować wywoływaniem fałszywych alarmów związanych z zagrożeniem obniżenia się udziału tlenu w powietrzu [26]. Z kolei w innych, również bardzo popularnych czujnikach typu galwanicznego występuje problem z wyczerpywaniem się zdolności pomiarowej związanej z utlenianiem się elektrody anodowej. Czujniki przestają działać w sposób nagły i praktycznie bez żadnego ostrzeżenia [104].

Inny problem z ogniwami elektrochemicznymi dotyczy pomiaru tlenu w obecności lekkich molekuł innego gazu, np. helu. W takich warunkach czujniki wykazują dużą nieliniowość sygnału pomiarowego. Problem ten stwierdzony został podczas testowania systemu ostrzegania przed spadkiem tlenu w Thomas Jefferson National Accelerator Facility (Jefferson Lab) w stanie Wirginia w USA [4]. Podczas badań wykazano, że zjawisko to dotyczy ogniwa z kapilarną barierą dyfuzyjną, które są najszerzej stosowane w przemysłowych analizatorach składu powietrza ze względu na możliwość kompensacji zmian temperatury i ciśnienia atmosferycznego. Użycie ogniwa elektrochemicznego z tego typu barierą kapilarną jest powszechne również w systemach bezpieczeństwa akceleratorów cząstek, zarówno w przenośnych jak i stacjonarnych monitorach poziomu tlenu. Autorzy wykazują eksperymentalnie niezgodne z założeniami konstrukcyjnymi działanie kapilarnej bariery dyfuzyjnej w przypadku obecności lekkich molekuł helu w badanej atmosferze. Prowadzi to do znaczących błędów pomiarowych i możliwości niewłaściwego działania systemu ostrzegania przed spadkiem tlenu.

Autorzy, sugerując konieczność wymiany dotychczasowych czujników tlenu na inne, wskazują przy tym na konieczność poszukiwania nowych technologii działania takich czujników. Próbę taką podejmuje niniejsza rozprawa, której celem jest m.in. potwierdzenie przydatności technologii ultradźwiękowej do pomiaru składu mieszanin gazowych.

2.3.2. Czujniki do pomiaru koncentracji gazów innych niż tlen

Zamiast mierzyć koncentrację tlenu w atmosferze można też bezpośrednio mierzyć udział innych gazów, takich jak hel lub wodór, wydostających się do badanej objętości pomiarowej. Najpopularniejszym sposobem takiego pomiaru jest metoda wykorzystująca występujące różnice w przewodności cieplnej gazów. Metoda ta jest znana już od dawna [30] i w dalszym ciągu szeroko wykorzystywana. Dzięki bardzo dużej różnicy wartości przewodności cieplnej, nadaje się ona w szczególności do pomiaru udziałów w powietrzu takich gazów, jak wodór, hel, chlor i w mniejszym stopniu dwutlenek węgla [98]. Do pomiaru wartości przewodności cieplnej wykorzystuje się w ogólnym przypadku dwa termoelementy o znanej i utrzymywanej na stałym poziomie różnicy temperatur. Jeden z nich jest podgrzewany i ciepło przepływa od niego do drugiego, zimniejszego elementu poprzez badany gaz. Wartość przewodności cieplnej obliczana jest na podstawie mierzonej mocy, która musi być

dostarczana do elementu podgrzewanego [32]. Współcześnie rozwijanych jest wiele systemów pomiarowych wykorzystujących pomiar przewodności cieplnej opartych o najnowsze typy sensorów pomiarowych lub w skojarzeniu z dodatkowymi pomiarami np. strumienia przepływu [43, 59, 64, 93, 98].

Rozwijane są jeszcze inne metody rozpoznawania gazów w mieszaninach. Od kilkudziesięciu już lat prowadzone są badania nad wykorzystaniem czujników z cienkiego filmu z palladu na złączu tranzystora typu MOSFET. Czujnik taki działa w oparciu o zmiany prądu na złączu tranzystora pokrytym warstwą palladu w obecności identyfikowanego gazu, np. wodoru [69]. W ostatnim czasie technika ta jest rozwijana w oparciu o nowe typy powłok, gdzie pallad zastępowany jest stopami Pd-Ni oraz najnowszym typu SnO₂. Ten ostatni typ charakteryzuje się dużą czułością na różne rodzaje gazów. Stanowi to jednak zarazem jego największą wadę, gdyż pomiar obecności np. wodoru, uzależniony jest w dużym stopniu od koncentracji tlenu w mieszaninie [84].

Innym typem czujników do pomiaru zawartości gazów w mieszaninach są czujniki wykorzystujące selektywnie przepuszczalne membrany. Wykorzystują one fakt różnej przenikalności gazów poprzez membrany selektywne. W pracy [86] przedstawiono czujniki udziału helu w mieszaninie z dwutlenkiem węgla oparte o polimerowe membrany wytworzone z polidimetylosiloxanu oraz z Teflonu-AF. Czujniki takie umożliwiają pomiar zawartości helu w zakresie od 0 do 100 %, ale mają dość długi czas pomiaru dochodzący do 50 sekund. Generalnie opisywane wyżej metody mają dość znaczny czas pomiaru i wymagają bezpośredniego dostępu do próbki gazu, co implikuje pomiar punktowy.

2.4. Przegląd obszarów zastosowań techniki ultradźwiękowej

Pasmo akustyczne o częstotliwości wyższej od 20 kHz, zwane pasmem ultradźwiękowym, zaczęto bliżej poznawać i wykorzystywać dopiero na przełomie XIX i XX wieku. Głównym prekursorem tych badań był, wyróżniony nagrodą Nobla, John William Strutt, znany jako Lord Rayleigh, żyjący w latach 1842 - 1919 [103].

Najczęściej wykorzystywanym źródłem fali ultradźwiękowej w środowiskach stałych, wodnych i gazowych były wtedy i są do tej pory przetworniki piezoelektryczne i w dużo mniejszym stopniu magnetostrykcyjne. Jednymi z pierwszych praktycznych zastosowań techniki ultradźwiękowej były wczesne konstrukcje sonarów pochodzące z czasów I Wojny Światowej. Wytwarzały one falę akustyczną w środowisku wodnym pozwalającą wykrywać łodzie podwodne. Po wojnie oprócz prześwietlania dużych ośrodków wodnych, technikę tę zaczęto wykorzystywać również w ciałach stałych do wykrywania różnych niejednorodności, takich jak pęknięcia lub pustki w strukturze materiałów. Jako pierwsi, odkrycia takiego zastosowania fal akustycznych dokonali niezależnie od siebie w Rosji S. J. Sokolov oraz w Niemczech Mühlhauser w roku 1929 [44]. Najpóźniej technika ultradźwiękowa znalazła zastosowanie w ośrodkach gazowych, w których mimo stosowania największych mocy w przetwornikach, fale mają bardzo ograniczony zasięg ze względu na bardzo dużą dyssypację energii fali ultradźwiękowej w gazach.

Zasada działania wszelkich ultradźwiękowych przyrządów pomiarowych oparta jest na badaniu parametrów propagacji fali akustycznej w badanym ośrodku. Fala taka po przejściu przez ośrodek niesie informację o różnych jego właściwościach, które wszystkie (lub część z nich) są celem pomiaru. Istnieją cztery podstawowe parametry fali akustycznej, które mogą być wykorzystywane do tego celu:

- prędkość propagacji fali,
- tłumienie fali
- impedancja akustyczna,
- efekt Dopplera.

Impedancja akustyczna jest iloczynem prędkości propagacji i gęstości ośrodka. Parametr ten jest szczególnie istotny w ośrodkach niejednorodnych i determinuje współczynniki odbicia i przepuszczalności fali.

Te cztery parametry, razem lub oddzielnie, wykorzystywane mogą być w ultradźwiękowych systemach pomiarowych. Pasmo ultradźwiękowe mieści się w części pasma akustycznego o częstotliwościach powyżej 20 kHz, ale w zastosowaniach przemysłowych wykorzystywane jest najczęściej pasmo od 20 kHz do 10 MHz [49].

Do przeprowadzenia pomiarów wymagane są odpowiednie przetworniki ultradźwiękowe, służące do wyemitowania oraz odebrania fali akustycznej. Najczęściej używanym typem są obecnie przetworniki piezoelektryczne [13]. Do zamiany energii elektrycznej w energię akustyczną wykorzystywany jest w nich efekt piezoelektryczny. Dzięki odwracalności tego efektu, przetwornik taki może pracować zarówno jako nadajnik oraz jako odbiornik fali ultradźwiękowej. Do budowy takich przetworników wykorzystuje się monokryształy (SiO_2 , LiNbO_3 , LiSO_4), polikryształy lub najbardziej popularną ceramikę piezoelektryczną typu PZT ($\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$) oraz (PbNb_2O_6) lub (BaTiO_2). Stosowane są również rozwiązania wykorzystujące cienkie warstwy polimerowe (PVDV, VF, PHB) lub piezoelektryczne (ZnO) szczególnie do budowy mikrosensorów [50]. Najszerzej stosowane są przetworniki piezoceramiczne, np. typu PZT. Charakteryzują się one długotrwałą niezawodnością i stabilnością pracy w temperaturach nawet do 300 °C [49]. Prowadzone są również prace nad zastosowaniem przetworników z polimerów piezoelektrycznych oraz materiałów kompozytowych [16,17,73,101], ale mają one mniejsze zastosowanie głównie przez maksymalną temperaturę pracy ograniczoną do około 80 - 100 °C.

Do najważniejszych zalet wykorzystania techniki ultradźwiękowej do pomiarów różnych własności badanego ośrodka należą [50]:

- pomiar nieinwazyjny,
- natychmiastowy odczyt wyników (możliwy pomiar w czasie rzeczywistym),
- wysoka rozdzielczość przestrzenna i dokładność pomiaru,
- bardzo dobra długoterminowa stabilność pracy,
- niskie zapotrzebowanie na energię.

Wadami, natomiast są:

- konieczność użycia skomplikowanych systemów elektronicznych do sterowania pomiarem i odczytywania wyników z dużą dokładnością,
- konieczność uwzględniania właściwości akustycznych wszystkich składników obecnych w badanym ośrodku,
- uśrednienie mierzonych własności akustycznych ośrodka na całej drodze propagacji fali ultradźwiękowej (możliwe do wyeliminowania w przypadku zastosowania większej liczby przetworników w odpowiednim układzie przestrzennym systemu pomiarowego).
- ograniczenia w stosowaniu wyższych częstotliwości ze względu na wzrost tłumienia,

2.4.1. Zastosowania techniki ultradźwiękowej w badaniach ciał stałych i środowisk wodnych

Technikę ultradźwiękową najwcześniej zaczęto wykorzystywać w środowiskach wodnych. Pierwsze konstrukcje to sonary służące do wykrywania łodzi podwodnych. Później rozszerzono użycie sonarów w ogóle do wykrywania wszelkich podwodnych przeszkód, włączając w to badanie rzeźby dna morskiego. W chwili obecnej wykorzystanie techniki ultradźwiękowej do badania naturalnych środowisk wodnych, takich jak morza i oceany stoi

już na wysokim poziomie i jest w dalszym ciągu rozwijane, szczególnie w obszarze badań biologii morza, jak również pod kątem zastosowania rozbudowanych technik tomograficznych [53, 70, 77].

Innym, ważnym i rozwijanym współcześnie obszarem zastosowań techniki ultradźwiękowej w cieczach jest przemysł chemiczny i inżynieria procesowa. Opracowywane są ultradźwiękowe przyrządy pomiarowe mające zastosowanie do kontroli takich parametrów, jak poziom cieczy, gęstość, stężenie roztworów, rozcieńczenie emulsji lub zawiesin, położenie powierzchni międzyfazowej, strumień przepływu i temperatura [1, 6, 47, 75]. Prowadzone są badania nawet nad takimi złożonymi zagadnieniami, jak określanie wpływu koncentracji pęcherzy powietrza w jednostce objętości cieczy oraz ich rozmiarów na sposób propagacji fali ultradźwiękowej [99].

Niedługo później niż w cieczach, technikę ultradźwiękową zaczęto wykorzystywać w ciałach stałych. Fala akustyczna przenikając przez strukturę ciała stałego podlega zaburzeniom na wszelkich niejednorodnościach w strukturze wewnętrznej materiału. Zjawisko to wykorzystywane jest do konstrukcji przyrządów ultradźwiękowych służących do niedestrukcyjnego wykrywania wszelkich wewnętrznych pustek, szczelin, pęknięć w testowanych materiałach oraz usterek w spoinach i zmianach w wytrzymałości całych konstrukcji [63, 92]. Drugim ważnym obszarem zastosowania omawianej techniki jest diagnostyka medyczna. Opracowywane są przyrządy wykorzystujące fale ultradźwiękowe do wizualizacji struktury wewnętrznej organizmów żywych. Korzystają one z faktu, że różne tkanki wewnętrzne charakteryzują się innymi prędkościami propagacji fali akustycznej oraz innymi zdolnościami jej rozpraszania [62].

Poza opisanymi powyżej „klasycznymi” już zastosowaniami, prowadzone są również prace nad zastosowaniem techniki ultradźwiękowej do pomiarów w takich specjalistycznych dziedzinach, jak określanie gęstości spiekanych pastylek paliwowych do elektrowni jądrowych [80], badanie siły wiązań dyfuzyjnych [65] czy określanie jakości betonu [88].

Wszystkie standardowe techniki ultradźwiękowych pomiarów wewnątrz ciał stałych wymagają bezpośredniego połączenia przyrządów sondujących do badanego materiału najczęściej za pomocą substancji dopasowującej impedancję akustyczną, takiej jak odpowiedni olej lub smar. Takie rozwiązanie może powodować problemy w przypadku, gdy testowany obiekt cechuje się ekstremalną temperaturą, bądź znajduje się w jakimś korozyjnym lub w inny sposób agresywnym środowisku. Problemy mogą się pojawić również w przypadku, jeśli obiekt przeznaczony do testowania znajduje się w trudno dostępnym miejscu, takim jak np. przestrzeń kosmiczna. We wszystkich takich przypadkach rozwiązaniem może być zaawansowana bezkontaktowa technika ultradźwiękowa umożliwiająca badanie materiałów bez bezpośredniego kontaktu, a nawet w bardzo dużym oddaleniu od nich [46].

2.4.2. Zastosowania techniki ultradźwiękowej w badaniach ośrodków gazowych

Wykorzystanie fal ultradźwiękowych w ośrodkach gazowych stwarza większe problemy niż w przypadku cieczy lub ciał stałych. Związane jest to głównie z bardzo silnym tłumieniem fal akustycznych w gazach i związanym z tym małym zasięgiem propagacji takich fal. Tłumienie to dodatkowo wzrasta z kwadratem częstotliwości fali akustycznej. Badania nad wykorzystaniem dźwięku w środowisku gazowym skupiają się najczęściej na niskich częstotliwościach leżących w paśmie słyszalnym.

Badania nad wykorzystaniem dźwięku w dolnej części pasma akustycznego prowadzone są między innymi w Instytucie Meteorologii na Uniwersytecie w Lipsku w Niemczech. Badania dotyczą monitorowania temperatury i prędkości wiatru w atmosferze na różnych wysokościach przy użyciu tomografii akustycznej [5, 107, 108]. Przeprowadzone

badania doświadczalne przynoszą dobre wyniki, jednakże sondowanie atmosfery na odległość do 230 m wymaga zastosowania fali akustycznej o bardzo niskiej częstotliwości 500 Hz.

Inne prace nad wykorzystaniem fal akustycznych w ośrodku gazowym prowadzone są na Uniwersytecie w Dreźnie. Sprawdzana jest tam możliwość wykorzystania różnego rodzaju przetworników akustycznych do badania własności charakteryzujących gazy lub ich mieszaniny, takich jak ich wilgotność. W pracy [110] opisano dwa typy przetworników akustycznych do pomiarów w powietrzu - jeden strumieniowy, a drugi elektryczny. Opisywane urządzenie służyło do określenia wilgotności powietrza na podstawie pomiaru prędkości fali dźwiękowej w badanym ośrodku i w ośrodku referencyjnym zawierającym czyste powietrze. W badanym urządzeniu wykorzystywano fale akustyczne znajdujące się w obszarze pasma słyszalnego.

Podjęmowane są również badania nad wykorzystaniem fal ultradźwiękowych w gazach. Prace takie prowadzone są np. w Argonne National Laboratory w stanie Illinois w USA. Opracowano tam dwa ultradźwiękowe systemy pomiarowe mające zastosowanie do wykrywania wycieków helu do powietrza [90].

Pierwszy z nich wykorzystuje akustyczną falę powierzchniową do detekcji helu za pomocą zmieniającej się przewodności cieplnej w mieszaninie helowo powietrznej. Drugi z systemów korzysta z pomiaru prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w badanej mieszaninie, co jest też tematem niniejszej pracy. Przyrząd mierzący prędkość dźwięku zbudowany został w oparciu o przetworniki pracujące przy częstotliwości 500 kHz. Ze względu na występujące ograniczenia - związane z silnym tłumieniem dźwięku o wysokiej częstotliwości - badany system ograniczony został do niewielkich rozmiarów, rzędu 1 cm, co wprowadziło konieczność dokładnego mierzenia bardzo krótkich czasów propagacji w celu uzyskania zadowalającej dokładności pomiarów. Z tego też powodu zastosowano dosyć skomplikowany pomiar piątego z kolei odbicia fali akustycznej od przetworników pomiarowych.

Do obliczania udziału objętościowego helu w powietrzu przyjęto w opisywanej pracy bardzo uproszczone założenie, że prędkość dźwięku w mieszaninie powietrza z helem jest zależna w sposób liniowy od wzajemnych udziałów obu składników mieszaniny. Założenie takie jest bardzo uproszczone i w zdecydowany sposób odbiega od rzeczywistości.

W różnych ośrodkach naukowych prowadzone są też prace nad zastosowaniem techniki ultradźwiękowej do określania składu innych dwuskładnikowych mieszanin gazów, takich jak propan - etan [100], powietrze - dwutlenek węgla oraz powietrze - sześćfluorek siarki [96], mieszanina izotopów helu ^3He - ^4He [85]. Podjęmowane są też badania nad identyfikacją gazowych mieszanin trójskładnikowych. W pracy [109] wykorzystuje się do tego celu porównanie pomiarów izotropowej oraz anizotropowej prędkości dźwięku w mieszaninie.

Prowadzone są również badania nad wykorzystaniem pomiaru tłumienia fali ultradźwiękowej do określania składu mieszanin gazów. W pracy [37] zastosowano tę metodę do wyznaczania składu takich mieszanin dwuskładnikowych, jak powietrze, azot-tlen, azot-dwutlenek węgla, azot-metan oraz azot-wodór. Podobną metodę, ale wykorzystaną do określania składu mieszanin trójskładnikowych przedstawiono w pracach [28, 29, 82].

2.4.3. Technika tomografii akustycznej

Historia tomografu komputerowego sięga początku XX wieku. Już w 1917 r. Radon opracował matematyczne podstawy rekonstrukcji obrazu. W 1972 Hounsfield (EMI, Londyn) skonstruował pierwszy komercyjny tomograf komputerowy i za to wraz z Cromackiem w 1979 r. dostał nagrodę Nobla z dziedziny medycyny. Od tego czasu wynaleziono wiele nowych modeli tomografów oraz znaleziono dla nich nowe obszary zastosowań. Na przykład,

klasyczne tomografy wykorzystujące promieniowanie rentgenowskie zaczęto stosować do nieniszczących badań struktury materiałów, wizualizacji przepływów itp.

Tomografia procesowa została rozwinięta w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku jako odpowiedź na coraz bardziej rozpowszechnione wymagania kontroli parametrów wewnętrznych w różnych procesach przemysłowych. Technika ta, ma swoje korzenie w rozwijanej wcześniej tomografii rentgenowskiej, która w zastosowaniach przemysłowych, nie spełniała coraz wyższych wymogów, związanych głównie z bezpieczeństwem użytkownika, wysokimi kosztami oraz szybkością działania [11]. Rozwinięte zostały nowe systemy tomograficzne, wykorzystujące zjawiska elektryczne (tomografy pojemnościowe, impedancyjne), optyczne, akustyczne oraz jądrowe (np. zjawisko magnetycznego rezonansu jądrowego).

Tomografia akustyczna wykorzystuje system przetworników akustycznych rozmieszczonych na brzegach badanego obszaru. Taki układ umożliwia rekonstrukcję pola rozkładu badanych parametrów w przestrzeni pomiarowej. W celu umożliwienia rekonstrukcji obrazu ważne jest odpowiednie przestrzenne umiejscowienie przetworników akustycznych, umożliwiające w szczególności uzyskanie dużej liczby niezależnych projekcji pomiarowych [54]. Technika tomografii akustycznej może wykorzystywać zarówno pasmo słyszalne [5, 77, 107, 108], jak również pasmo ultradźwiękowe.

Tomografia ultradźwiękowa jest techniką pomiarową dającą możliwość uzyskania dużo większej rozdzielczości rekonstruowanego obrazu, w porównaniu z pasmem słyszalnym, umożliwiającą już zastosowanie tej techniki do kontroli procesów przemysłowych. W literaturze istnieje wiele opisanych przykładów zastosowania techniki tomografii ultradźwiękowej do pomiarów przepływów mieszanin dwufazowych gaz-ciecz [54]. W pracach [105, 106] opisano użycie opisywanego systemu tomograficznego do pomiaru rozkładu przestrzennego pęcherzy gazu w cieczy, co może być użyteczne między innymi w kontroli procesu wydobywania ropy naftowej ze złóż znajdujących się pod dnem mórz. Innym, częstym przykładem zastosowania techniki tomografii ultradźwiękowej jest pomiar pola temperatury w badanej przestrzeni [54]. W pracy [12] opisano tomograficzną metodę pomiaru rozkładu pola temperatury oraz pola prędkości przepływu w zadymionej komorze. Rozwijane są również tomograficzne metody pomiarowe pola temperatury w dużych piecach przemysłowych [68, 91]. Brak jest, natomiast, w literaturze publikacji na temat wyznaczania przestrzennego rozkładu składników w binarnych mieszaninach gazów, takich jak np. mieszanina helu z powietrzem. Temat ten został zasygnalizowany na konferencjach podczas przygotowywania niniejszej pracy doktorskiej [18, 19].

2.5. Możliwość zastosowania ultradźwiękowej techniki pomiarowej w obecności promieniowania jonizacyjnego

W obszarze zainteresowania prezentowanej pracy doktorskiej leżą, jak to już wspomniano w rozdziale 2.1, instalacje wykorzystujące duże systemy kriogeniczne. Wiele z takich instalacji wykorzystujących jako czynnik roboczy duże ilości ciekłego helu jest dodatkowo wystawionych na działanie promieniowania jonizującego.

Do systemów takich należą przede wszystkim wysokoenergetyczne akceleratory cząstek elementarnych. Instalacje takie, wykorzystujące nadprzewodniki kriostatowane ciekłym heliem, wymagają systemów kontroli obecności w powietrzu helu mogącego pochodzić z niekontrolowanych wycieków [23]. Układy ostrzegawcze pracujące w takich warunkach muszą spełniać dodatkowe wymogi pod kątem możliwości pracy w obecności promieniowania jonizacyjnego, którego źródłem jest wiązka akceleratora.

Promieniowanie jonizacyjne oddziałuje w sposób destrukcyjny na materiały, z których są wykonane wszelkie przyrządy pomiarowe. Do najbardziej wrażliwych na promieniowanie materiałów zaliczają się przede wszystkim:

- wszelkie tlenki (w tym ceramika),
- półprzewodniki,
- obudowy,
- połączenia.

Za destrukcję struktury materiałów odpowiedzialne są trzy główne procesy [31]:

- jonizacja,
- zrywanie wiązań chemicznych,
- dyslokacja atomów w sieci krystalicznej.

Procesy te odgrywają różną rolę w różnych typach części elektronicznych i ich wpływ musi być niezależnie analizowany dla każdego typu elektroniki zastosowanej w urządzeniu pomiarowym. Wrażliwość urządzeń pomiarowych na promieniowanie jonizujące jest uzależniona od stopnia komplikacji i zaawansowania technologicznego układów elektronicznych, a w szczególności użycia takich podzespołów jak tranzystory polowe lub w jeszcze większym stopniu zastosowania elementów dyskretnych. Przyjmuje się, że dawka promieniowania mogąca powodować istotne uszkodzenia w elementach elektronicznych jest rzędu od około kilkudziesięciu do 1000 Gy (Grej) w zależności od indywidualnego przypadku [42]. Dawka 1 Gy jest równoważna depozycji energii w materiale w ilości 1 J/kg, i odpowiada 100 rad.

W laboratoriach naukowych wykorzystujących akceleratory cząstek przeprowadzane są specjalne testy sprawdzające możliwość zastosowania różnych przyrządów pomiarowych w warunkach napromieniowania. W laboratorium CERN w Genewie wykorzystywana jest do tego celu specjalnie wydzielona część akceleratora SPS (Super Proton Synchrotron), służąca do badań wpływu promieniowania jonizującego. W urządzeniu tym zostały przeprowadzone między innymi testy systemu ostrzegania przed obniżeniem zawartości tlenu w powietrzu przy użyciu standardowych czujników tlenowych (ogniw elektrochemicznych) [51]. Testy miały na celu sprawdzenie długoterminowej stabilności układów elektronicznych zawartych w czujnikach tlenowych. Do badań użyto czujników w dwóch konfiguracjach: z elektroniką znajdującą się bezpośrednio przy czujnikach i umieszczoną razem z nimi w strefie napromieniowanej oraz z elektroniką umieszczoną w strefie bezpiecznej.

W wyniku przeprowadzonych testów okazało się, że praktycznie wszystkie systemy pomiarowe z elektroniką narażoną na promieniowanie zostały uszkodzone i przestały działać po otrzymaniu dawki promieniowania od kilku do około 160 Gy. Spowodowało to konieczność poszukiwania alternatywnych technologii pomiarów obecności helu w powietrzu.

Opisywana w niniejszej pracy ultradźwiękowa technika pomiarowa została również przetestowana w takich warunkach [14], a wyniki tych badań przedstawione zostały niżej, w rozdziale 5.6 na stronie 70.

3. Cel i tezy pracy

Na podstawie dokonanego przeglądu aktualnego stanu wiedzy, dotyczącego sposobów pomiaru składu binarnych mieszanin gazów, możliwości wykorzystania techniki ultradźwiękowej w tym kierunku oraz docelowych odbiorców proponowanej techniki pomiarowej, określono następujące cele pracy:

1. Opracowanie teoretycznych i technicznych założeń budowy ultradźwiękowego systemu pomiarowego, w tym ultradźwiękowego tomografu komputerowego.
2. Doświadczalna weryfikacja założeń ultradźwiękowej metody pomiaru wybranych własności mieszanin. Budowa systemu pomiarowego, w tym prototypowego ultradźwiękowego tomografu komputerowego.
3. Przeprowadzenie badań na stanowisku badawczym symulującym warunki wycieku helu w tunelu akceleratora cząstek, weryfikacja wyników.
4. Ocena przydatności ultradźwiękowego systemu pomiarowego w warunkach obecności promieniowania jonizacyjnego.

Sformułowano również następujące tezy pracy:

Teza główna:

Metoda ultradźwiękowa może być stosowana do pomiaru zarówno uśrednionego składu jak i rozkładu przestrzennego składników wybranych binarnych mieszanin gazów, szczególnie mieszaniny helu z powietrzem.

Teza pomocnicza:

Można zbudować skutecznie działający ultradźwiękowy system ostrzegania przed wyciekami helu do powietrza, pracujący w obecności promieniowania jonizującego.

4. Analiza teoretyczna zagadnienia - teoretyczne możliwości zastosowania metody ultradźwiękowej

Metoda ultradźwiękowa polega na prześwietlaniu objętości gazu, bądź mieszaniny gazów falą akustyczną w zakresie częstotliwości ponaddźwiękowych. Fala taka po przejściu przez daną objętość niesie ze sobą szereg informacji charakteryzujących znajdujący się w niej ośrodek, takich jak prędkość propagacji fali, impedancja akustyczna, współczynnik pochłaniania dźwięku. Na podstawie znajomości sposobu załamывania się fali i występujących odbić można dodatkowo wnioskować o niejednorodnościach obecnych wewnątrz przestrzeni pomiarowej. W pracy tej podstawowym nośnikiem informacji charakteryzującym badany ośrodek będzie prędkość propagacji fali akustycznej.

4.1. Analiza termodynamicznych własności wybranych gazów kriogenicznych pod kątem możliwości zastosowania metody akustycznej

Dźwięk rozchodzi się w płynach w postaci podłużnej fali bardzo małych zmian ciśnienia i gęstości substancji. Dzięki małej amplitudzie takiej fali można pominąć działanie sił lepkości. Dodatkowo, ze względu na dużą szybkość rozchodzenia się dźwięku można przyjąć, że zmiany ciśnienia odbywają się bez wymiany ciepła i jest to w związku z tym proces adiabatyczny. Na mocy tych dwóch założeń proces taki jako odwracalna przemiana adiabatyczna jest izentropowy.

Prędkość propagacji takiej fali, czyli prędkość dźwięku jest wyrażona ogólnie znanym wzorem

$$a = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} \quad (1)$$

gdzie:

a - prędkość dźwięku, m/s,

p - ciśnienie, Pa,

ρ - gęstość, kg/m³,

s - indeks s wskazuje, że pochodna pod pierwiastkiem liczona jest po izentropie.

Uwzględniając, że $\rho = 1/v$ i dokonując przekształceń otrzymano

$$a = \sqrt{\frac{-1}{\rho^2} \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s} \quad (2)$$

Teraz korzystając ze znanej [78] zależności termodynamicznej

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s = \kappa \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T \quad (3)$$

gdzie κ oznacza wykładnik adiabaty, wzór (2) można przekształcić do postaci

$$a = \sqrt{\frac{-\kappa}{\rho^2} \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T} \quad (4)$$

Dla gazów doskonałych o stałym cieple właściwym po obliczeniu pochodnej i prostych przekształceniach otrzymano równanie

$$a = \sqrt{\kappa RT} = \sqrt{\frac{\kappa \bar{R} T}{M}} \quad (5)$$

w którym:

R - indywidualna stała gazowa, J/(kg·K),

$\bar{R}$ - uniwersalna stała gazowa, J/(mol·K),

M - masa molowa gazu, kg/mol,

T - temperatura gazu, K.

Jak widać, prędkość rozchodzenia się dźwięku w gazie zależy od rodzaju gazu (wartości wykładnika adiabaty i masy molowej) oraz jego temperatury T . Korzystając ze znanej zależności $\kappa = c_p / c_v$ wzór (5) można również zapisać w postaci

$$a = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} RT} \quad (6)$$

gdzie:

c_p - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, J/(kg·K),

c_v - ciepło właściwe przy stałej objętości, J/(kg·K).

W przypadku mieszanin wieloskładnikowych należy wyznaczyć zastępcze wartości wykładnika κ oraz stałej gazowej R dla całego układu. Można tu skorzystać z reguł mieszania obowiązujących dla gazów doskonałych [57]

$$\kappa = \frac{1}{\sum \frac{z_i}{\kappa_i - 1}} + 1 \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{\bar{R}}{\sum z_i M_i} \quad (8)$$

w których:

z_i - udział molowy i -tego składnika, w przypadku gazów doskonałych równy udziałowi objętościowemu r_i ,

κ_i - wykładnik adiabaty i -tego składnika,

M_i - masa molowa i -tego składnika, kg/mol.

Po przekształceniu równania (5) z wykorzystaniem powyższych reguł mieszania otrzymano wzór na prędkość dźwięku w mieszaninie wieloskładnikowej w postaci

$$a = \sqrt{\left(\frac{1}{\sum \frac{z_i}{\kappa_i - 1}} + 1 \right) \cdot \frac{\bar{R} T}{\sum z_i M_i}} \quad (9)$$

Jak widać na prędkość dźwięku mają wpływ dwa czynniki:

- temperatura mieszaniny (T),
- rodzaj gazów wchodzących w jej skład (wykładnik adiabaty κ , masa molowa M).

Aby móc zastosować technikę akustyczną w celu wyznaczenia udziałów poszczególnych gazów w mieszaninie i uzyskać wymaganą rozdzielczość pomiarową, gazy - których mieszanina jest analizowana - muszą charakteryzować się odmiennymi prędkościami rozchodzenia się dźwięku. Im ta różnica będzie większa, z tym większą dokładnością możliwe będzie określenie ich udziałów.

Jak wynika z równania (5) prędkość dźwięku w gazie, poza wpływem temperatury, zależna jest od rodzaju gazu, tj. jego masy molowej oraz wykładnika adiabaty κ , równego ilorazowi ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu i przy stałej objętości.

Ciepło właściwe w gazach doskonałych jest stałe i nie zależy od wartości parametrów termodynamicznych (ciśnienia, temperatury). Określone jest budową cząsteczki gazu, tj. ilością atomów wchodzących w skład cząsteczki oraz ich przestrzennym ułożeniem. Parametry te określają ilość stopni swobody ruchu postępowego i obrotowego atomów w cząsteczce. Na każdy stopień swobody ruchu postępowego, czy obrotowego przypada energia molowa $1/2 \bar{R} T$. W przypadku gazów doskonałych obowiązuje następująca prawidłowość:

- dla gazów jednoatomowych $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{5}{3} = 1,67$

- dla gazów dwuatomowych $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{7}{5} = 1,4$

- dla gazów trzy- i wieloatomowych $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{4}{3} = 1,33$

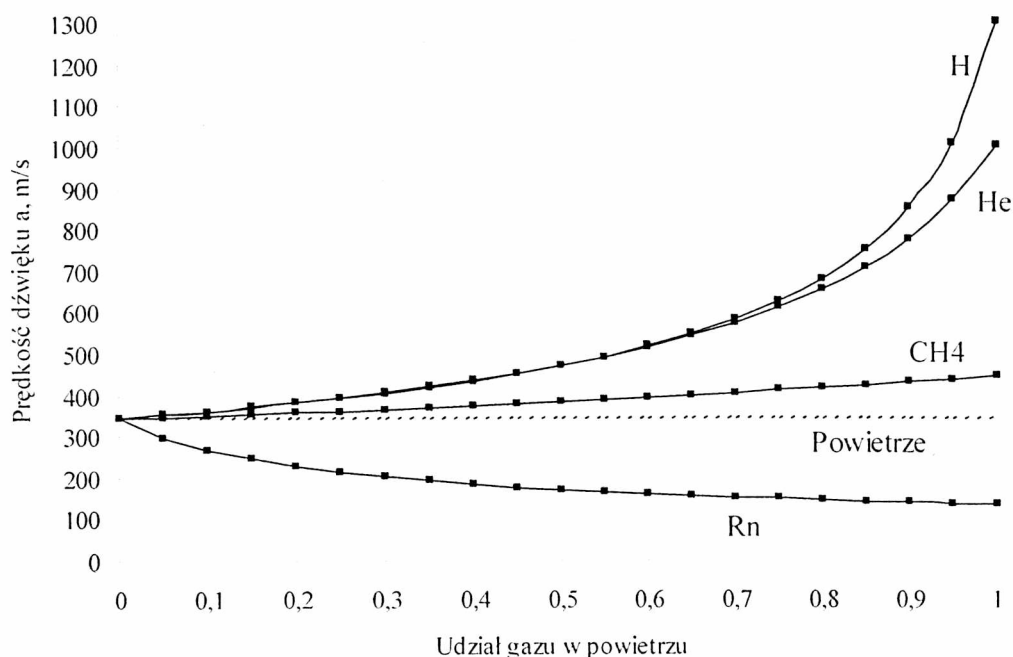
W rzeczywistych gazach jednoatomowych prawidłowość ta jest prawdziwa, natomiast w gazach dwu i wieloatomowych ciepło właściwe jest uzależnione dodatkowo od temperatury. Spowodowane jest to występowaniem dodatkowych stopni swobody ruchu drgającego (oscylacyjnego) atomów w cząsteczkach. W warunkach ciśnienia i temperatury zbliżonych do normalnych można jednakże pominąć ten wpływ, ponieważ gazy wieloatomowe zachowują się wtedy jak jednoatomowe i ich ciepło właściwe jest praktycznie stałe. Przykładowe wartości wykładnika k (teoretyczne oraz wyznaczone doświadczalnie), jak również masa molowa, indywidualna stała gazowa oraz prędkość dźwięku w wybranych gazach podano w Tab. 4-1.

Zasadność przyjętego modelu gazu doskonałego potwierdza zgodność wartości teoretycznych i doświadczalnych wykładnika κ . Również porównanie teoretycznych wartości prędkości dźwięku w mieszaninie hel-powietrze z wartościami otrzymanymi eksperymentalnie, przedstawionymi na Rys. 5-7 na stronie 47, potwierdza dopuszczalność przyjęcia modelu gazu doskonałego.

Tab. 4-1. Teoretyczne i doświadczalne wartości wykładnika κ [57],
wartości masy molowej i indywidualnej stałej gazowej R
oraz prędkość dźwięku w wybranych gazach w temperaturze 20 °C

Gaz	Symbol	Liczba atomów	Wykładnik κ		Masa molowa kg/kmol	Stała gazowa R J/(kg·K)	Prędkość dźwięku m/s
			teoretyczny	doświadczalny			
Hel	He	1	1,67	1,67	4,003	2077,20	1004
Argon	Ar	1	1,67	1,65	39,948	208,13	319
Radon	Rn	1	1,67	---	222,000	37,45	135
Wodór	H ₂	2	1,40	1,41	2,016	4124,36	1305
Azot	N ₂	2	1,40	1,41	28,013	296,80	349
Tlenek węgla	CO	2	1,40	1,40	28,011	296,82	349
Tlen	O ₂	2	1,40	1,40	31,999	259,83	326
Metan	CH ₄	5	1,33	1,30	16,043	518,25	447
Powietrze	---	---	---	1,40	28,967	287,03	343

Jak widać w Tab. 4-1, w przypadku określania udziałów gazów obecnych w powietrzu, metoda akustyczna będzie miała bardzo rezultaty w przypadku gazów takich jak wodór, hel i, w mniejszym stopniu, metan. Na uwagę zasługuje również gaz szlachetny radon, który charakteryzuje się znacznie mniejszą prędkością rozchodzenia się dźwięku w porównaniu z powietrzem. W przypadku innych podanych gazów ich prędkości są na tyle podobne, że metoda ta będzie miała mniejszą dokładność. Różnica prędkości dźwięku pomiędzy dwoma analizowanymi gazami bardziej zależy od różnicy ich masy molowej (czyli, w przypadku gazów pierwiastkowych, ich odległości od siebie w układzie okresowym pierwiastków), niż liczby atomów w cząsteczce gazu.



Rys. 4-1. Zależność prędkości dźwięku od udziału wybranych gazów w powietrzu

Przeprowadzona symulacja komputerowa zależności prędkości dźwięku od udziału wybranych gazów w mieszaninie z powietrzem na podstawie równania (9) przedstawiono na Rys. 4-1.

Obliczenia wykonano przy założeniu temperatury mieszaniny $T = 273 \text{ K}$ (20°C) oraz przy ciśnieniu $p = 1 \text{ bar}$. Cienka, przerywana linia oznacza poziom odniesienia, czyli prędkość dźwięku w samym powietrzu. Jak widać prędkość propagacji wyraźnie się zwiększa w miarę wzrostu udziału helu lub wodoru w powietrzu. Prędkość ta jest około trzy razy większa kiedy mamy do czynienia z czystym helem i około cztery razy większa w przypadku wodoru. Własność ta implikuje szczególną zasadność wykorzystania omawianej techniki akustycznej w oznaczaniu udziału helu lub wodoru w powietrzu. Technika ta będzie również wysoce skuteczna w oznaczaniu udziału radonu, który cechuje się z kolei prawie dwa i pół razy mniejszą prędkością dźwięku niż powietrze. Prędkość dźwięku w czystym metanie jest tylko o około 30% większa niż w powietrzu, co jest wystarczające w przypadku obecności tego gazu w większych stężeniach, ale może już powodować większą niepewność pomiaru dla małych stężeń.

Technika ta będzie się szczególnie sprawdzać w przypadku obecności w badanej objętości lokalnych nagromadzeń badanego gazu, pojawiających się np. w wyniku jego wycieku. W takim wypadku dodatkowe zastosowanie techniki tomografii ultradźwiękowej pozwoli, za pomocą rekonstrukcji obrazu przedstawić rozkład przestrzenny miejsc występowania obłoków helu lub wodoru, a duża różnica w prędkościach rozchodzenia się dźwięku pozwoli na uzyskanie wyraźnego kontrastu obrazu.

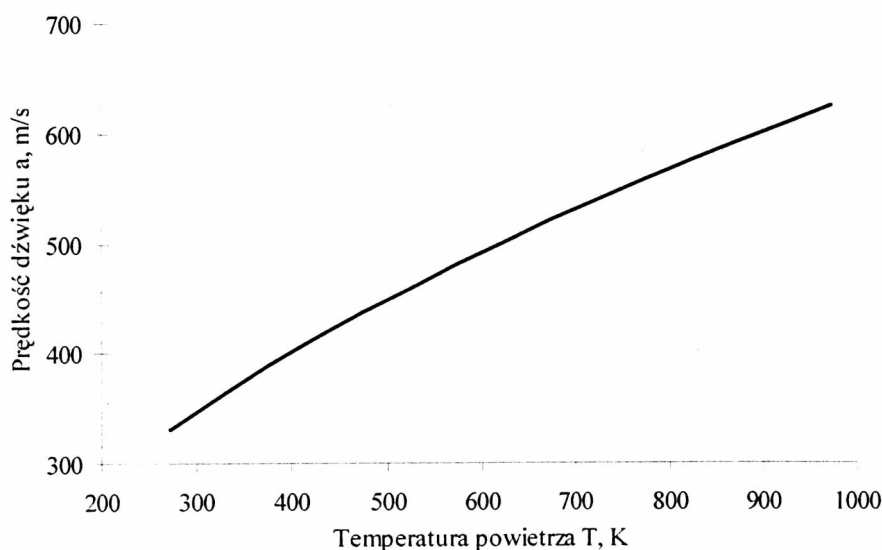
Drugim czynnikiem, wpływającym na prędkość rozprzestrzeniania się dźwięku w gazie, jest temperatura. Jak to widać w równaniu (5), a w przypadku mieszaniny gazów w równaniu (9), prędkość ta zmniejsza się wraz ze spadkiem temperatury (zależna jest wprost proporcjonalnie od pierwiastka z temperatury). Własność ta implikuje możliwość zastosowania omawianej techniki akustycznej do pomiaru średniej temperatury w ośrodku o znanym składzie chemicznym. Dodatkowo przy użyciu techniki tomograficznej możliwy jest nieinwazyjny pomiar rozkładu niejednorodnego pola temperatury w ośrodku. Szukaną temperaturę ośrodka można obliczyć w oparciu o przedstawioną poniżej zależność, otrzymaną w wyniku przekształcenia wzoru (5)

$$T = T_0 \left(\frac{a_{zm}}{a_0} \right)^2 \quad (10)$$

w którym:

- T - szukana temperatura ośrodka, K,
- a_{zm} - zmierzona prędkość dźwięku, m/s,
- T_0 - przyjęta temperatura odniesienia, K,
- a_0 - znana prędkość dźwięku w temperaturze odniesienia, m/s.

Drugą konsekwencją zależności prędkości dźwięku od temperatury jest konieczność eliminacji jej wpływu podczas pomiaru składu chemicznego ośrodka metodą akustyczną. W przypadku pojedynczego gazu wpływ ten jest prosty. Na Rys. 4-2 przedstawiono przykładową zależność prędkości dźwięku od temperatury w czystym powietrzu obliczoną na podstawie równania (5) w zakresie temperatur od 273 K do 973 K ($0 - 700^\circ\text{C}$).



Rys. 4-2. Zależność prędkości dźwięku od temperatury w czystym powietrzu

W celu porównywania ze sobą różnych wartości prędkości dźwięku zmierzonych w pojedynczym gazie, w różnych temperaturach można skorzystać z przedstawionej poniżej zależności

$$a_{T_0} = a_{zm} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{zm}}} \quad (11)$$

gdzie:

a_{T_0} - prędkość dźwięku w przyjętej temperaturze bazowej, m/s,

a_{zm} - zmierzona prędkość dźwięku, m/s,

T_0 - przyjęta temperatura bazowa, K,

T_{zm} - zmierzona temperatura, K.

W przypadku jednorodnej mieszaniny dwóch różnych, ale znanych gazów zastosowanie techniki pomiaru prędkości dźwięku umożliwia określenie udziału każdego z dwóch jej składników. Możliwość taka jest uwarunkowana oczywiście występowaniem różnic w prędkościach dźwięku w każdym ze składników mieszaniny tak, jak to zostało opisane w pierwszej części tego rozdziału.

W celu obliczenia udziału składnika X w mieszaninie ze składnikiem Y, mając pomiar średniej prędkości dźwięku oraz średniej temperatury mieszaniny, można skorzystać ze wzoru.

$$z_X = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (12)$$

w którym:

z_X - udział objętościowy składnika X w mieszaninie ze składnikiem Y.

Wartości członów A, B, C należy obliczyć z poniższych wzorów

$$A = \frac{a^2}{RT} (\kappa_Y - \kappa_X)(M_X - M_Y) \quad (13)$$

$$B = \frac{a^2}{RT} [M_Y (\kappa_Y - 2\kappa_X + 1) + M_X (\kappa_X - 1)] - (\kappa_Y - \kappa_X) \quad (14)$$

$$C = \frac{a^2}{RT} (\kappa_X - 1)M_Y + \kappa_Y - \kappa_X \kappa_Y \quad (15)$$

gdzie:

a^2 - zmierzona średnia prędkość dźwięku w mieszaninie, m/s,

T - zmierzona średnia temperatura w mieszaninie, K,

$\bar{R}$ - uniwersalna stała gazowa, J/(mol · K),

$M_{X,Y}$ - masa molowa składnika X lub Y, kg/mol,

$\kappa_{X,Y}$ - wykładnik adiabaty składnika X lub Y.

Wzór ten został wyprowadzony z równania (9). Szczegółowe wyprowadzenie wzoru zamieszczono w załączniku A.

Bardziej skomplikowany będzie przypadek niejednorodnej mieszaniny dwóch znanych gazów o niejednorodnym polu temperatury, mogącej powstać w wyniku np. wycieku jednego gazu do czynnika o innej temperaturze. Taka sytuacja może zachodzić podczas awarii układu kriogenicznego w akceleratorze cząstek, kiedy to następuje wyciek ciekłego helu do powietrza w tunelu [23]. W takim przypadku konieczny staje się pomiar rozkładu pola temperatury w płaszczyźnie pomiarowej oraz użycie techniki tomografii ultradźwiękowej, opisaną w rozdziale 4.3, w celu zrekonstruowania rozkładu pola prędkości dźwięku. Uzyskanie rozkładów pól temperatury i prędkości dźwięku pozwala skorzystać następnie z przedstawionego wyżej wzoru (12) w celu obliczenia rozkładu pola udziału szukanego składnika mieszaniny w badanym przekroju pomiarowym.

W przypadku, kiedy w badanej przestrzeni mamy do czynienia z nieznanym gazem, opisywaną technikę pomiaru prędkości dźwięku można również wykorzystać do jego identyfikacji. Możliwe to będzie jednak w oparciu o dodatkowe przesłanki, które pozwolą zawęzić liczbę rodzajów możliwych gazów, które mogłyby się znaleźć w badanym obszarze. W tym wypadku nie jest możliwe podanie uniwersalnych kryteriów dotyczących możliwości zastosowania tej metody do identyfikacji poszczególnych rodzajów gazów, bądź ich binarnych mieszanin, ale konieczna staje się indywidualna analiza w zależności od konkretnych przypadków.

Na koniec należy dodać, że w rzeczywistym gazie występują pewne odstępstwa od prawa Clapeyrona i prędkość dźwięku zależy również od ciśnienia (wzór (5) nie jest do końca ścisły). Zależność prędkości propagacji od ciśnienia określona jest ogólnym wzorem (1). We wzorze tym jednak gęstość jest powiązana z ciśnieniem i w ogólnym przypadku wraz z jego wzrostem wzrasta też i gęstość ośrodka. Według niektórych źródeł stosunek p/ρ pozostaje

stały, jednak na podstawie doświadczeń wielu autorów wraz ze wzrostem ciśnienia gazu będącego z dala od punktu krytycznego prędkość dźwięku również rośnie [97]. Wpływ ten jednak nie jest duży i przykładowo dla powietrza wynosi około 2 m/s na 1 MPa, co przy wahaniami ciśnienia atmosferycznego na powierzchni ziemi może dawać pomijalne błędy rzędu 0,01 m/s (co odpowiada błędowi względnemu rzędu 0,003 %).

Drugą okolicznością, mogącą wpłynąć na zmianę prędkości propagacji dźwięku jest obecność w powietrzu pary wodnej. Zawartość wilgoci w powietrzu wpływa na wzrost prędkości dźwięku według następującego wzoru empirycznego [97]

$$a = a_0 \cdot (1 + A_f \cdot e_p) \quad (16)$$

gdzie:

a_0 - prędkość dźwięku w powietrzu suchym, m/s;

A_f - współczynnik zależny od częstotliwości,

e_p - prężność pary wodnej związana z wilgotnością powietrza.

Wzór ten charakteryzuje się dużą nieliniowością, szczególnie w przypadku większego udziału pary wodnej i nie pozwala na ściśle określenie wpływu wilgotności na prędkość dźwięku w szerokim jej zakresie. Według [97] wpływ ten jest jednak niewielki i wzrost prędkości dźwięku spowodowany nawet maksymalną wilgotnością jest w warunkach ziemskich mniejszy od 1 %.

4.2. Analiza wpływu wybranych czynników na możliwość zastosowania techniki ultradźwiękowej

4.2.1. Zasadność wykorzystania pasma ultradźwiękowego

Omawiana technika wykorzystania pomiaru prędkości dźwięku do identyfikacji i pomiaru udziałów składników binarnej mieszaniny gazów kriogenicznych może być zastosowana w oparciu o każdy rodzaj fal akustycznych. Jednakże do powszechnego wykorzystania szczególnie nadają się fale ultradźwiękowe.

Pierwszym i oczywistym powodem celowości zastosowania pasma ultradźwiękowego, w przeciwieństwie do słyszalnego, jest możliwość uniknięcia nadmiernego hałasu podczas działania urządzenia pomiarowego. Również detekcja fali w zakresie słyszalnym może być kłopotliwa ze względu na występujące w tym zakresie duże szumy otoczenia.

Drugim powodem są własności wynikające z falowej natury rozprzestrzeniania się dźwięku. Własności te powodują niewrażliwość rozchodzącej się fali dźwiękowej na przeszkody, bądź niejednorodności ośrodka o rozmiarze porównywalnym lub mniejszym od długości samej fali [72]. W szczególnym przypadku dla pasma słyszalnego w dolnym zakresie częstotliwości fala dźwiękowa może osiągać długość rzędu 1 metra, która to długość mogłaby się okazać porównywalna lub wręcz większa od rozmiarów całej przestrzeni pomiarowej. Własność ta ma wpływ na wykrywalność małych obszarów niejednorodności za pomocą takich metod, jak np. analiza odbić lub załamania fali.

W przypadku analizowania możliwości pomiaru samej tylko prędkości propagacji dźwięku znaczenie będzie miał wpływ długości fali akustycznej na dokładność pomiaru czasu propagacji. Detekcja sygnału akustycznego odbywa się w oparciu o narost pierwszej ćwiartki fali. W związku z tym, w celu zapewnienia odpowiedniej dokładności pomiaru czasu propagacji, długość ćwiartki fali akustycznej musi być wystarczająco mała w porównaniu z całkowitą drogą propagacji fali wewnątrz obszaru pomiarowego.

Długość fali akustycznej jest związana z częstotliwością fali oraz z jej prędkością propagacji zależnością

$$\lambda = \frac{a}{f} \quad (17)$$

w której:

λ - długość fali akustycznej, m,

a - prędkość propagacji fali akustycznej, m/s,

f - częstotliwość fali akustycznej, Hz.

Prędkość propagacji (jak to omówiono w rozdziale 4.1) zależy od rodzaju ośrodka, w którym rozprzestrzenia się fala i w związku z tym długość fali akustycznej, przy tej samej częstotliwości, będzie różna dla różnych ośrodków, a także będzie się zmieniać w obrębie samej przestrzeni pomiarowej wypełnionej mieszaniną niejednorodną. Przykładowe długości fali akustycznej dla różnych częstotliwości fali w powietrzu i helu w temperaturze 293 K (20°C) podano w Tab. 4-2.

Tab. 4-2. Długość fali akustycznej dla różnych częstotliwości fali w powietrzu i helu w temperaturze 293 K (20°C)

pasmo	Często- tliwość	Długość fali	
		powietrze	hel
	Hz	mm	mm
słyszalne	50	6 870,0	20 082,6
	1 000	343,5	1 004,1
	10 000	34,3	100,4
	15 000	22,9	66,9
	20 000	17,2	50,2
ultradźwięki	40 000	8,6	25,1
	70 000	4,9	14,3
	100 000	3,4	10,0
	200 000	1,7	5,0
	500 000	0,7	2,0

Z powyższego zestawienia wynika, że fale dźwiękowe w zakresie słyszalnym charakteryzują się dość znaczną długością fali zarówno w powietrzu, jak i tym bardziej w helu, gdzie mogą osiągać długości rzędu pojedynczych lub kilkunastu metrów. Nawet w górnych granicach pasma słyszalnego długości te dochodzą do około 20 mm dla powietrza i 50 mm dla helu. W przypadku wodoru długości te będą jeszcze większe. Inaczej to wygląda kiedy poruszamy się w obszarze pasma ultradźwiękowego. Tutaj długość fali akustycznej osiąga rozmiary rzędu kilku, w najgorszym razie kilkunastu milimetrów.

Zwiększanie częstotliwości fali akustycznej dodatnio wpływa na dokładność pomiaru jej czasu propagacji w obszarze pomiarowym. Istnieją jednakże fizyczne czynniki ograniczające swobodę dowolnego zwiększania częstotliwości roboczej układu pomiarowego. Czynniki te są zjawiska tłumienia fali akustycznej i charakterystyka kierunkowa źródła fali opisane w dalszej części w punktach 4.2.2 oraz 4.2.3.

4.2.2. Tłumienie fali akustycznej

Fala akustyczna w rzeczywistych warunkach rozprzestrzenia się w ośrodku, w którym występuje rozpraszanie energii fali. Fala taka jest pochłaniana na skutek dwóch podstawowych zjawisk występujących w ośrodku rzeczywistym. Są to lepkość oraz przewodnictwo cieplne.

Pierwszą z podstawowych przyczyn tłumienia fali dźwiękowej jest wzajemne tarcie między cząsteczkami materii, równoznaczne z lepkością. Przy rozważaniach na temat prędkości propagacji fali akustycznej można było pominąć wpływ działania sił lepkości ze względu na małą amplitudę zmian ciśnienia i gęstości ośrodka. Jednakże w procesie rozpraszania energii fali, zjawisko to ma już swój udział. Współczynnik tłumienia związany z lepkością ośrodka wynosi [97]

$$\alpha_r = \frac{8 \pi^2 \eta f^2}{3 a^3 \rho} \quad (18)$$

gdzie:

α_r - współczynnik tłumienia związany z lepkością, m^{-1} ,

η - dynamiczny współczynnik lepkości, $N \cdot s/m^2$,

f - częstotliwość fali dźwiękowej, s^{-1} .

Współczynnik ten jest wprost proporcjonalny do kwadratu częstotliwości i zależy od temperatury poprzez lepkość, gęstość i prędkość propagacji w ośrodku.

Druga z podstawowych przyczyn tłumienia to przewodność cieplna, związana z wyrównywaniem temperatury pomiędzy obszarami o różnych fazach ciśnienia akustycznego. W ośrodkach rzeczywistych proces rozprzestrzeniania się fali bardzo małych zaburzeń ciśnienia i gęstości gazu, nazywanych rozchodzeniem się dźwięku, jakkolwiek byłby on bardzo szybki, to jednak jest przemianą termodynamiczną odbiegającą nieco od adiabatycznej. W tym wypadku współczynnik tłumienia związany z przewodnością cieplną ośrodka wynosi [97]

$$\alpha_l = 2\pi^2 \frac{f^2 (\kappa - 1)}{a^3 \rho c_p} \frac{k}{4186,8} \quad (19)$$

gdzie:

α_l - współczynnik tłumienia związany z przewodnością cieplną, m^{-1} ,

k - współczynnik przewodności cieplnej, $J/(s \cdot m \cdot K)$.

Całkowity współczynnik tłumienia, będący sumą dwóch przedstawionych powyżej można w związku z tym przedstawić w postaci

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_l = \frac{2\pi^2 f^2}{a^3 \rho} \left(\frac{4}{3} \eta + \frac{\kappa - 1}{c_p} k \right) \quad (20)$$

Tak wyrażony współczynnik tłumienia w cieczach i gazach jest uzależniony wprost proporcjonalnie od kwadratu częstotliwości i wygodnie jest przedstawić go jako iloczyn kwadratu częstotliwości i współczynnika zależnego już tylko od rodzaju samego ośrodka i jego własności termodynamicznych w określonej temperaturze i ciśnieniu.

Tak zmodyfikowany całkowity współczynnik tłumienia można przedstawić w postaci

$$\alpha = \alpha' \cdot f^2 \quad (21)$$

gdzie:

α - całkowity współczynnik tłumienia, m^{-1} ,

α' - współczynnik tłumienia niezależny od częstotliwości fali, s^2/m ,

f - częstotliwość fali akustycznej, Hz,

Przedstawione rozumowanie jest w pełni słuszne i daje dobrą zgodność z wynikami doświadczalnymi jedynie w przypadku niektórych substancji. Należą do nich gazy jednoatomowe, a w szczególności hel. Jednak w przypadku większości innych substancji tłumienie jest w znacznym stopniu większe niż, wynikałoby to z zależności (21). Wynika to z tego, że straty związane z tarcie wewnętrzne i przewodnictwem cieplnym nie są jedynymi stratami z jakimi mamy do czynienia. Ważnym czynnikiem jest również zamiana energii ruchu postępowego molekuł na ruch drgający atomów w molekułach. Ten rodzaj strat nosi nazwę absorpcji molekularnej.

Wartości zdefiniowanego powyżej niezależnego od częstotliwości współczynnika tłumienia $\alpha' = \alpha / f^2$ są dostępne dla różnych ośrodków w formie tabelarycznej. Przykładowe wartości obliczone na podstawie powyższych wzorów oraz uzyskane doświadczalnie dla powietrza i helu w temperaturze 20 °C i pod ciśnieniem 0,1 MPa pokazano w Tab. 4-3.

Tab. 4-3. Przykładowe wartości współczynnika tłumienia, obliczone oraz uzyskane doświadczalnie dla powietrza i helu w temperaturze 20 °C i pod ciśnieniem 0,1 MPa [34]

Rodzaj gazu	Współczynnik tłumienia α' [s^2/m]	
	obliczony	zmierzony
powietrze	$1,37 \cdot 10^{-11}$	$2,00 \cdot 10^{-11}$
hel	$0,53 \cdot 10^{-11}$	$0,54 \cdot 10^{-11}$

W ocenie zasięgu propagacji fal akustycznych w różnych ośrodkach i co za tym idzie możliwości zastosowania w konkretnych warunkach określonych częstotliwości fali akustycznej bardziej pomocne jest wyrażenie wartości całkowitego współczynnika tłumienia w jednostkach: dB/m. Do przeliczenia tych wartości można skorzystać z następującej zależności

$$\alpha [\text{dB/m}] = 8,68 \cdot \alpha [1/\text{m}] \quad (22)$$

Korzystając z tej zależności można obliczyć odległość propagacji fali akustycznej w różnych środowiskach i przy różnych częstotliwościach fali, po przebiegnięciu jakiej poziomu natężenia dźwięku spada o zadaną wartość. W Tab. 4-4 przedstawiono przykładowe wartości odległości powodującej spadek poziomu natężenia dźwięku w powietrzu i helu o 3 dB przy różnych częstotliwościach fali akustycznej i obliczonych z wykorzystaniem współczynników tłumienia otrzymanych doświadczalnie (patrz Tab. 4-3).

Tab. 4-4. Wartości odległości powodującej spadek poziomu natężenia dźwięku o 3 dB przy różnych częstotliwościach fali akustycznej w powietrzu i helu

pasmo	Często- tliwość	Odległość powodująca spadek o 3 dB	
		powietrze	hel
	kHz	m	m
słyszalne	1	17 281,11	64 004,10
	10	172,81	640,04
	15	76,80	284,46
	20	43,20	160,01
ultradźwięki	40	10,80	40,00
	70	3,53	13,06
	100	1,73	6,40
	200	0,43	1,60
	500	0,07	0,26

4.2.3. Charakterystyka kierunkowa źródła fali

Drugim czynnikiem ograniczającym swobodę dowolnego zwiększania częstotliwości roboczej układu pomiarowego jest charakterystyka kierunkowa źródła fali. Ma to szczególne znaczenie w układach wykorzystujących przestrzenne rozmieszczenie przetworników akustycznych, jak w przypadku tomografii ultradźwiękowej, ale też i w prostych systemach pomiarowych opartych na dwóch naprzeciwległych przetwornikach w przypadku poruszającego się czynnika.

Na kształt i rozkład ciśnienia w polu akustycznym ma wpływ ugięcie, czyli dyfrakcja fali dźwiękowej. Wpływ tego zjawiska zależy od rodzaju źródła ultradźwięków i od częstotliwości fali. Modelem źródła fali ultradźwiękowej, najlepiej reprezentującym większość przetworników ultradźwiękowych, jest płaska okrągła płytka, której wszystkie punkty powierzchni drgają z jednakową amplitudą i fazą. Ten sposób drgań jest równoznaczny z drganiami tłoka. Do analizy tego zagadnienia jest przyjmowany model drgającego tłoka [97]. Fala emitowana jest przez nieskończoną ilość punktowych źródeł dźwięku, rozłożonych równomiernie na jego powierzchni i promieniujących we wszystkich kierunkach. Biorąc pod uwagę tłok kołowy, ciśnienie akustyczne P na osi źródła wynosi

$$P = 2P_0 \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \left(\sqrt{r_t^2 + l^2} - r_t \right) \right] \quad (23)$$

gdzie:

P_0 - ciśnienie akustyczne początkowe, Pa,

r_t - promień tłoka, m,

l - odległość na osi tłoka, m,

λ - długość fali dźwięku, m.

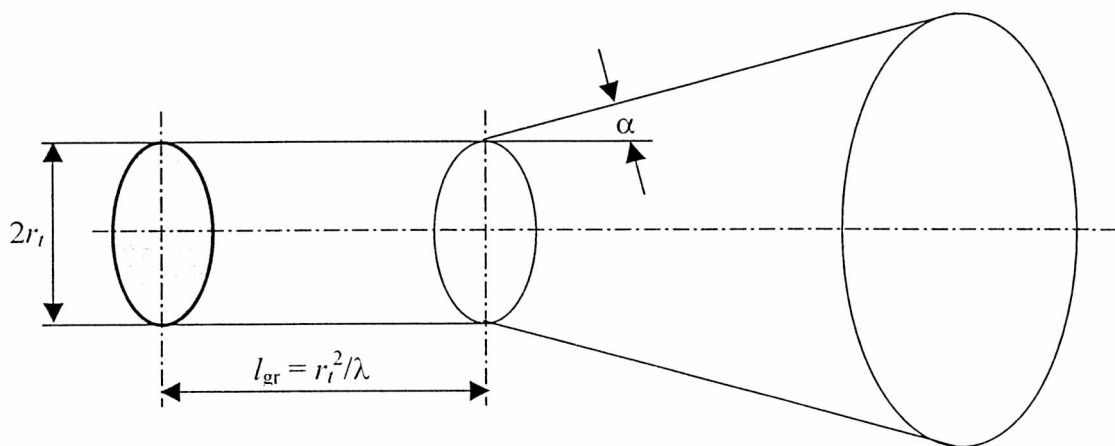
Wyrażenie to, wraz ze wzrostem odległości l osiąga na przemian maksima i minima. Ostatnie maksimum jest osiągane w odległości

$$l_{gr} = \frac{4r_t^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (24)$$

Dodatkowo przy częstotliwościach stosowanych w technice ultradźwiękowej długość fali jest znacznie mniejsza od średnicy przetwornika i można wtedy przyjąć założenie upraszczające $r_t^2 \gg \lambda^2$. Wartość l_{gr} będzie można obliczyć z zależności

$$l_{gr} = \frac{r_t^2}{\lambda} \quad (25)$$

Wartość l_{gr} jest graniczną odległością pola bliskiego, nazywanego też strefą Fresnela [97]. Dla $l > l_{gr}$ wartość ciśnienia akustycznego na osi przetwornika maleje monotonicznie. Obszar, w którym rozciąga się pole bliskie, jest w przybliżeniu cylindryczny. Nierównomierny rozkład ciśnienia akustycznego w tym obszarze wynika z interferencji elementarnych fal kulistych pochodzących od punktowych źródeł rozłożonych na powierzchni tłoka. W odległości większej niż l_{gr} różnica faz dochodzących tutaj elementarnych fal jest tak mała, że skutki interferencji przestają być zauważalne, natomiast wiązka ultradźwiękowa rozszerza się i przybiera kształt ściętego stożka, tak jak to pokazano na Rys. 4-3. Obszar ten nazywany jest polem dalekim, a jego kształt i rozkład ciśnienia określony jest charakterystyką kierunkowości.



Rys. 4-3. Przybliżony kształt pola ultradźwiękowego tłoka drgającego [97]

Miarą właściwości kierunkowych źródła pola ultradźwiękowego jest kąt rozbieżności charakterystyki 2α . Kąt ten może być wyznaczony analitycznie na podstawie równania charakterystyki kierunkowości i na podstawie przyjętego modelu [97] z zależności

$$\sin \alpha = 0,61 \frac{\lambda}{r_t} \quad (26)$$

W praktyce, ze względu na nieregularny przebieg charakterystyki kierunkowości rzeczywistych przetworników stosuje się inny kąt rozbieżności $2\alpha'$, mieszczący się między punktami na charakterystyce kierunkowości, dla których amplituda ciśnienia równa się 0,708 wartości maksymalnej (co odpowiada spadkowi o 3 dB lub obniżeniu natężenia dźwięku do połowy).

Kąt taki, obliczony z zależności

$$\sin 2\alpha' = 0,60 \frac{\lambda}{r_t} \quad (27)$$

jest około 2 razy mniejszy niż określony poprzednio.

Na podstawie powyższych wzorów widać, że kąt rozbieżności maleje wraz ze wzrostem częstotliwości oraz w miarę zwiększania się średnicy promieniującego źródła. Zwiększa się wtedy kierunkowość źródła. Charakterystykę kierunkową można poszerzyć co prawda poprzez zastosowanie przetworników o mniejszej średnicy, ale to z kolei powoduje drastyczny spadek mocy wypromieniowanej fali.

Rozumowanie powyższe jest nieco uproszczone, rzeczywiste źródła fal akustycznych odbiegają od takiego modelu drgającego tłoka i ich charakterystyka kierunkowa jest dużo bardziej skomplikowana [111]. Niemniej jednak ogólny wpływ częstotliwości fali na szerokość charakterystyki kierunkowej jest podobny. Dokładniejsze wzory na współczynnik kierunkowości źródła fali znaleźć można w pracy [48].

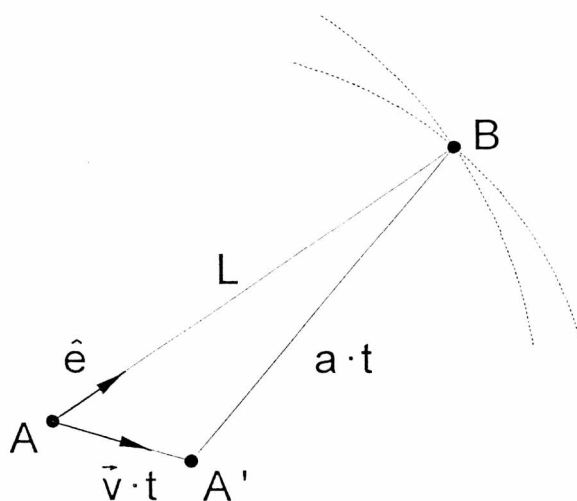
Wąska charakterystyka źródła fali nie jest cechą korzystną, zwłaszcza że dotyczy ona nie tylko emitera, ale również odbiornika sygnału akustycznego. W przypadku bardzo wąskiej charakterystyki może się zdarzyć, że wystąpią kłopoty ze słyszalnością źródła dźwięku przez odbiornik nawet w wypadku dwóch przetworników ustawionych na jednej linii na przeciw siebie. Taka sytuacja może nastąpić szczególnie podczas przepływu czynnika.

Innym przypadkiem, który wymaga szczególnie szerokiej charakterystyki kierunkowej jest zastosowanie omawianej techniki w tomografii ultradźwiękowej. Ważne jest wówczas aby sygnał akustyczny słyszalny był przez możliwie jak największą liczbę przetworników umieszczonych na obręczy pomiarowej.

4.2.4. Fala akustyczna w poruszającym się ośrodku

W przypadku, kiedy w przestrzeni pomiarowej mamy do czynienia z poruszającym się medium występuje konieczność uwzględnienia tego stanu w doborze odpowiedniej metody pomiaru czasu propagacji fali akustycznej.

Weźmy pod uwagę układ dwóch przetworników akustycznych umieszczonych w punktach A i B znajdujących się na brzegach przestrzeni pomiarowej wypełnionej przepływającym z prędkością poddźwiękową czynnikiem. Niech pole prędkości $\vec{v}$ oraz prędkość dźwięku a ośrodka będą stałe w każdym punkcie (x, y, z) przestrzeni. Oznaczmy przez L odległość z punktu A do B oraz niech $\hat{e}$ będzie wektorem skierowanym od punktu A do B. Sytuacja ta została przedstawiona na Rys. 4-4.



Rys. 4-4. Graficzna interpretacja propagacji fali akustycznej w poruszającym się ośrodku

Jeżeli z punktu A zostanie wyemitowana fala to w przypadku braku przepływu ośrodka ($\mathbf{v} = 0$) dotrze ona do punktu B (czoło tej fali na rysunku pokazano linią przerywaną) po czasie L/a . W przypadku niezerowego stałego pola prędkości czoło fali wysłane w chwili zerowej z punktu A dotrze do punktu B po czasie t . Częstka ośrodka, która znajdowała się w chwili emisji fali w punkcie A, dotrze po tym czasie do punktu A'. Czoło tej fali narysowane jest linią ciągłą i ma swój środek w punkcie A'. Punkt A' jest teraz miejscem pozornego źródła fali widzianego z punktu B a odległość od punktu A' do B wynosi $a \cdot t$. Analogicznie odległość od A do A' wynosi $v \cdot t$. Stosując twierdzenie cosinusów dla boków L , $a \cdot t$ i $v \cdot t$ trójkąta ABA' i stosując je do kąta α w wierzchołku A otrzymamy następujące wyrażenie

$$(at)^2 = L^2 + (vt)^2 - 2Lvt \cos(\alpha) \quad (28)$$

Uwzględniając fakt, że $|\mathbf{v}| = v$ oraz $|\mathbf{e}| = 1$ i w rezultacie $\cos(\alpha) = \mathbf{v} \cdot \mathbf{e} / v$, dochodzimy do równania kwadratowego ze względu na t . Po obliczeniu pierwiastków i odrzuceniu tego, który nie ma sensu fizycznego otrzymujemy wzór na czas propagacji fali akustycznej

$$t = \frac{-(\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}) + \sqrt{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{e})^2 + (a^2 - v^2)}}{(a^2 - v^2)} L \quad (29)$$

Jeśli przyjmiemy teraz założenie, że $a \gg v$, co jest prawdziwe dla większości zastosowań w układach rzeczywistych, to wówczas $a^2 - v^2 \approx a^2$. Na mocy takiego założenia upraszczającego wyrażenie pod pierwiastkiem także przybliży się do a^2 , stąd wyrażenie (29) można ostatecznie przedstawić w postaci

$$t = \frac{a - \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}}{a^2} L = \frac{1}{a} \left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}}{a} \right) L \quad (30)$$

Dla niejednorodnego pola przepływu odległość L należy zastąpić różniczką dl braną wzdłuż odcinka AB i dokonać całkowania po prostej od punktu A do punktu B, co prowadzi ostatecznie do równania

$$t_{AB} = \int_A^B \frac{1}{a} \left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}}{a} \right) dl \quad (31)$$

Czas przelotu fali akustycznej w kierunku przeciwnym jest natomiast określony zależnością

$$t_{BA} = \int_A^B \frac{1}{a} \left(1 + \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}}{a} \right) dl \quad (32)$$

Zakładając, że lokalne zmiany prędkości dźwięku a są małe w porównaniu z jej bezwzględną wartością, można przyjąć, że fala dźwiękowa rozchodzi się po prostej łączącej punkty A oraz B. W takim przypadku biorąc sumę (31) i (32) wyeliminujemy prędkość ośrodka v i otrzymamy

$$t = t_{AB} + t_{BA} = \int_A^B \frac{2}{a} dl \quad (33)$$

Jak z tego wynika, wpływ prędkości poruszającego się ośrodka można wyeliminować poprzez pomiar sumy czasów propagacji fali akustycznej pomiędzy tymi samymi przetwornikami w jedną oraz w drugą stronę. W celu sprawnego przeprowadzenia takiego pomiaru wskazane jest zastosowanie przetworników akustycznych mogących pracować zarówno jako nadajnik jak i odbiornik.

4.3. Technika tomografii ultradźwiękowej

4.3.1. Metoda tomograficzna

Tomografia komputerowa jest techniką pomiarową pozwalającą uzyskać przestrzenny rozkład pewnej wielkości fizycznej, wewnątrz jakiegoś obiektu na podstawie dużej liczby (jednowymiarowych) pomiarów dokonywanych na jego brzegu. Klasyczne układy tomografii (tomografia dwuwymiarowa) pozwalają uzyskać rozkład funkcji na powierzchni wybranego przekroju poprzecznego badanego obiektu. Oznacza to, że w zasadzie nie ma konieczności wprowadzania sond lub czujników do wnętrza obiektu. Z uwagi na tą właściwość zaliczana jest ona do metod nieinwazyjnych. Istnieją jednak rozwiązania konstrukcyjne, które wymagają wprowadzenia do wnętrza badanego obszaru jakichś czujników. W tym wypadku mamy do czynienia z inwazyjną metodą tomografii. Rozwiązania te są stosunkowo rzadkie i nie dotyczą przedmiotu tej pracy. Nieinwazyjny charakter metody rozumiany jest tu w sensie fizycznej nieobecności jakichkolwiek przyrządów pomiarowych wewnątrz przestrzeni pomiarowej. Oczywiście jest, że obszar pomiarowy musi zostać „prześwietlony” za pomocą jakiegoś nośnika informacji i w konkretnych przypadkach może to nie pozostawać bez wpływu na własności badanego czynnika. Szczególnie jaskrawym przykładem będzie tu przeświecanie promieniami rentgenowskimi żywego organizmu. Jednakże nie zmienia to generalnego charakteru metody.

Cechą wspólną metod tomograficznych jest to, że bezpośredni pomiar dostarcza sygnałów p_k stanowiących odwzorowanie wartości szukanej funkcji $f(x,y,z)$, opisującej rozkład pewnej wielkości fizycznej, który chcemy zbadać. W większości przypadków wartość sygnału p_L jest równa całce liniowej po prostej L z szukanej funkcji

$$p_L = \int_L F dl \quad (34)$$

Jednakże nie jest to regułą. Na przykład w tomografii pojemnościowej całka jest brana po powierzchni.

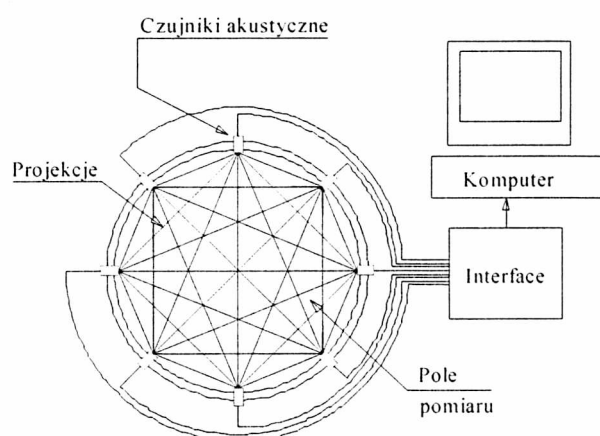
Następnym, bardzo ważnym etapem pomiaru tomograficznego jest dalsza obróbka sygnału, której celem jest rekonstrukcja funkcji f , czyli tzw. rekonstrukcja obrazu w oparciu o wybrane metody matematyczne. Narzędziem pozwalającym zaimplementować wygodnie i szybko dość złożony proces obróbki matematycznej jest komputer.

Przy analizie zagadnień związanych z tomografią komputerową należy brać pod uwagę następujące elementy:

- System czujników - określający jakie zjawiska fizyczne zostaną wykorzystane do celów pomiarowych i podstawowe zasady technicznej realizacji układu pomiarowego;
- Tor zbierania i wstępnego przetwarzania sygnałów pomiarowych;
- Metody rekonstrukcji obrazu;
- Sposoby prezentacji wyników;
- Interpretacja otrzymanej informacji.

4.3.2. Zasada pracy tomografu ultradźwiękowego

Tomograf ultradźwiękowy jest szczególnym przypadkiem wykorzystania techniki tomografii akustycznej. Technika ta polega na wykorzystaniu fal akustycznych do zebrania informacji o strukturze wewnętrznej określonego obszaru objętości ośrodka przez dokonywanie przekrojów tej objętości i uzyskiwanie informacji z danego przekroju. Technika ta wiąże się ściśle z możliwością zaawansowanej prezentacji komputerowej, będącej wynikiem rekonstrukcji obrazu. Tomograf akustyczny może wykorzystywać wiele zjawisk fizycznych zachodzących podczas rozprzestrzeniania się dźwięku. Do zjawisk tych można zaliczyć pomiar odbicia fal akustycznych od granic nieciągłości (np. pęknięć, granic faz) lub zanikanie fali zasłoniętej przez obiekt znajdujący się wewnątrz badanego obszaru. Innym zjawiskiem, które szczególnie leży w obszarze naszego zainteresowania, jest pomiar czasu przelotu pomiędzy parami przetworników umieszczonych np. w ściankach kanału. Przykładowy schemat takiego tomografu ultradźwiękowego pokazano na Rys. 4-5.



Rys. 4-5. Schemat blokowy tomografu akustycznego

Czas propagacji fali akustycznej pomiędzy przetwornikami zależy od rozkładu pola prędkości dźwięku a . Istotą takiego systemu jest użycie dużej liczby przetworników nadawczych i odbiorczych, umożliwiających przeskanowanie całej badanej objętości ze z góry zadaną dokładnością i rozdzielczością przestrzenno-czasową. Wielkością, którą lokalnie mierzymy, a która składa się na obraz tomograficzny jest prędkość rozchodzenia się fali akustycznej. Ponieważ prędkość dźwięku, tak jak to przedstawiono w rozdziale 4.1, zależy od temperatury oraz jest zdeterminowana rodzajem ośrodka, przez który przechodzi fala akustyczna, to znając a można wyznaczyć bądź rozkład temperatury, bądź określić skład chemiczny tego ośrodka. Przy tym im bardziej prędkość propagacji jest lokalnie zróżnicowana tym lepszy uzyskuje się kontrast obrazów.

Zasada działania tomografu ultradźwiękowego polega na pomiarze czasu przelotu fali dźwiękowej między wybranymi punktami zlokalizowanymi na brzegu badanego obszaru. W każdym punkcie umieszczone jest zarówno źródło, jak i detektor fali akustycznej (Rys. 4-5). Zgodnie z rozważaniami przedstawionymi w rozdziale 4.2.4, w celu wyeliminowania wpływu poruszającego się ośrodka, czas propagacji fali mierzony jest pomiędzy dwoma przetwornikami, zarówno w jedną jak i w drugą stronę. W takim przypadku wzór na czas propagacji fali dźwiękowej będzie miał postać

$$t = t_{AB} + t_{BA} = \int_A^B \frac{2}{a} dl \quad (35)$$

Chcąc teraz znaleźć szukane wielkości fizyczne, czyli w tym przypadku rozkład temperatury T ośrodka, bądź jego skład chemiczny, należy wyznaczyć rozkład prędkości propagacji a w obszarze pomiarowym. Następnie już, korzystając ze znanych zależności przedstawionych w rozdziale 4.1 należy obliczyć szukane wielkości fizyczne.

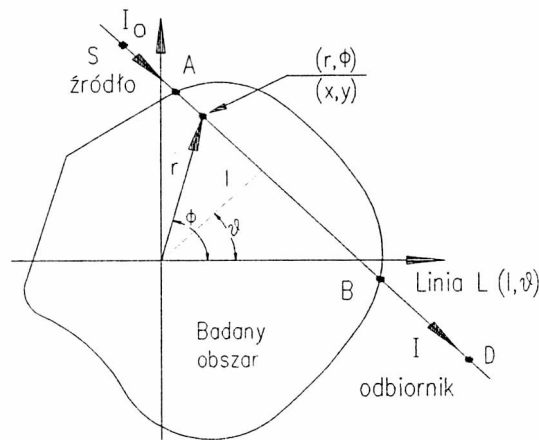
Jak łatwo zauważyć wzór (35) ma identyczną postać jak wzór (34) jeśli przyjmiemy, że $p = I$ oraz $f = 2/a$. Aby zatem znaleźć rozkład szukanych wielkości temperatury lub udziałów składników ośrodka najpierw trzeba zrekonstruować rozkład funkcji $f = 2/a$. W tym celu należy wykorzystać jedną z metod rekonstrukcji obrazu [52].

4.3.3. Metody rekonstrukcji obrazu

Zadaniem rekonstrukcji obrazu jest znalezienie rozkładu funkcji f na badanej płaszczyźnie na podstawie znajomości wartości p_l , całki (34) dla zadanego zbioru prostych L . Często znaleziony rozkład funkcji f służy dopiero do obliczenia rozkładu docelowej wielkości fizycznej F na bazie innych zależności, tak jak w opisywanym tu przypadku na podstawie rozkładu prędkości propagacji dźwięku wyznaczane będą dopiero temperatura lub skład ośrodka. Równanie (34) jest również definicją transformaty Radona R podstawowego przekształcenia matematycznego mającego zastosowanie w tomografii [52]

$$[Rf](l, \theta) = p(l, \theta) = \int_{L(l, \theta)} f(r, \phi) ds \quad (36)$$

gdzie całkowanie przebiega po całej prostej. Zauważmy, że funkcja f przyjmuje wartości równe zero poza obszarem badanego obiektu. Stąd nieskończona całka po L przyjmuje skończone wartości. Znaczenie zmiennych w powyższym wzorze wyjaśnia Rys. 4-6.



Rys. 4-6. Szkic układu pomiarowego

Zagadnienie rekonstrukcji obrazu polega więc w tym przypadku na wyliczeniu odwrotnej transformaty Radona R^{-1} dla funkcji $p(l, \theta)$. Transformata odwrotna jest dana wzorem:

$$[R^{-1}p](r, \phi) = f(r, \phi) = -\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi d\theta \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial p(l, \theta)}{\partial l} \cdot \frac{dl}{[l - r \cos(\phi - \theta)]} \quad (37)$$

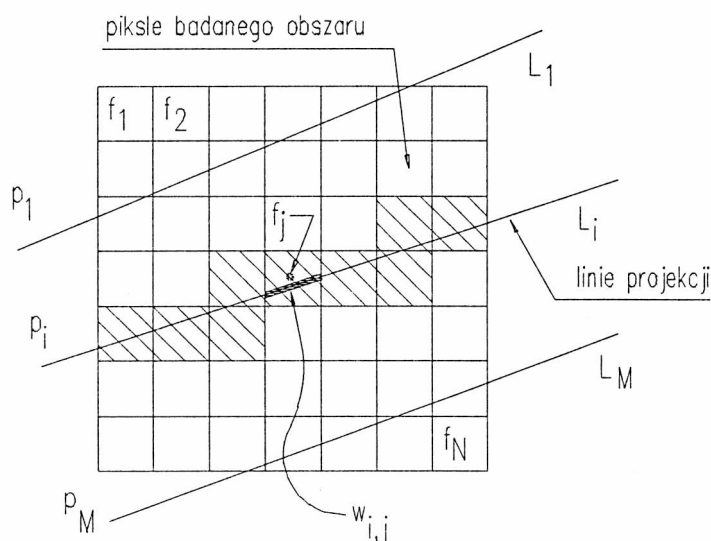
Ogólnie wśród metod rekonstrukcji obrazu można wyróżnić metody polegające na liczeniu odwrotnych transformat (Radona i Fouriera), metody oparte o rozwijanie szukanej funkcji w szereg lub metody algebraiczne, do których należy szeroko rozpowszechniona dzięki swojej uniwersalności metoda ART (Algebraic Reconstruction Technique). Została ona wynaleziona jeszcze przed wojną w roku 1937 przez polskiego matematyka Karczmara. Metoda służy do rozwiązywania wielkich układów równań liniowych. Dyskretnie formy podstawowych równań wielu układów tomografii sprowadzają się do postaci macierzowej danej wzorem

$$\mathbf{p} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{f} \quad (38)$$

gdzie:

$\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_M]^T$ - wektor projekcji (M - liczba projekcji),
 $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T$ - wektor szukanych wartości funkcji (N - liczba pikseli),
 $\mathbf{W} = [w_{ij}]_{M \times N}$ - macierz wag.

Graficzna interpretacja oznaczeń występujących we wzorze pokazana jest na Rys. 4-7.



Rys. 4-7. Szkic wyjaśniający znaczenie zmiennych w metodzie ART

Na cały badany obszar (tu dla prostoty ma on kształt prostokąta) jest nałożona siatka dzieląca go na mniejsze rozdzielne podobszary. Każdy z nich wyznaczony przez odpowiednie oczko siatki nazywany jest pikselem (z ang. *picture element*).

Zadanie polega na znalezieniu wektora $\mathbf{f}$ mając na wejściu dane z pomiarów, czyli wektor projekcji $\mathbf{p}$ oraz macierz $\mathbf{W}$, określoną przez geometrię i konfigurację stanowiska pomiarowego. Oczywiście jedynym zmiennym elementem jest tu $\mathbf{p}$. W przypadku gdy $\mathbf{W}$ jest kwadratowa ($M = N$), czyli jest tyle samo równań co niewiadomych można zastosować tradycyjne metody rozwiązywania równań liniowych np. metodę Gaussa. Dla przypadku gdy $M \neq N$ użyteczną staje się metoda ART. Jest to iteracyjna metoda rozwiązywania dużych układów liniowych równań algebraicznych. Polega ona na założeniu początkowego rozkładu wektora $\mathbf{f}$, który oznaczmy przez $\mathbf{f}^0$ i wyliczaniu kolejnych jego przybliżeń według schematu

$$\mathbf{f}^{k+1} = \mathbf{f}^k + \lambda \frac{p_j - \mathbf{w}_j \cdot \mathbf{f}^k}{(\mathbf{w}_j)^2} \cdot \mathbf{w}_j \quad (39)$$

gdzie:

- λ - współczynnik relaksacji (udowodniono, że proces iteracyjny jest zbieżny dla $0 < \lambda < 2$),
- $\mathbf{w}_j$ - j -oty wiersz macierzy $\mathbf{W}$ czyli $[w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jN}]$, odnoszący się do j -otej projekcji,
- j - indeks projekcji, który jest zależny od numeru iteracji k i wynosi $j = k \bmod M + 1$.

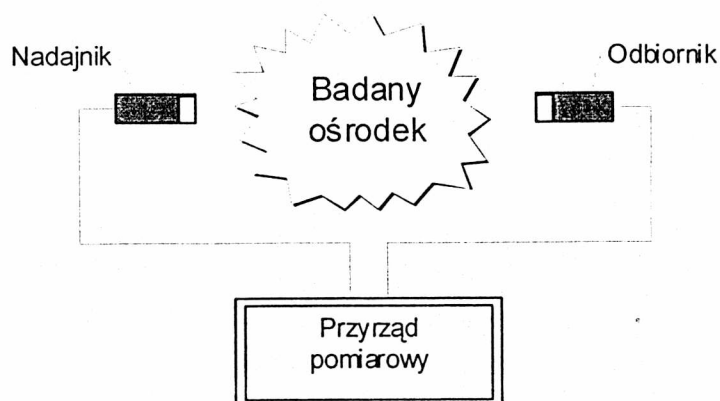
Każdy kolejny krok w iteracyjnej metodzie ART polega na modyfikacji wartości funkcji f_i o wartość wyliczoną jedynie na bazie tych projekcji p_j , które przechodzą przez zadany piksel. Metoda ART jest bardzo elastyczna i może być zaadoptowana od wielu różnych geometrii (włączając 3D) oraz do wielu aplikacji (nawet tych, które opisane są równaniami nieliniowymi).

4.4. Założenia budowy systemu pomiarowego

Na podstawie przedstawionych powyżej w rozdziale 4 teoretycznych możliwości zastosowania metody ultradźwiękowej do wyznaczania przestrzennych rozkładów binarnych mieszanin gazów przyjęto, że proponowany system pomiarowy opierać się będzie na pomiarze czasu propagacji fal ultradźwiękowych w badanej objętości. Czas propagacji będzie przy tym mierzony w obie strony w celu wyeliminowania wpływu prędkości liniowej ośrodka.

Głównym obszarem zastosowań proponowanej metody pomiarowej są systemy ostrzegania przed spadkiem tlenu w powietrzu. Sytuacja taka powstaje w wyniku uwolnienia obcego gazu, takiego jak hel, do zamkniętej przestrzeni i wyparcie części powietrza. Jak wynika z Tab. 2-2 (pokazanej na stronie 8) graniczną, ze względów bezpieczeństwa, wartością do jakiej może spaść udział tlenu jest 18 %. Udział obcego gazu w powietrzu wynosi w takim przypadku 14 % i taka wartość powinna spowodować zadziałanie alarmu. Sytuacja taka determinuje wymaganą dokładność proponowanego przyrządu pomiarowego, która może się mieścić w granicach kilku procent. Rozważany przyrząd pomiarowy na pewno nie musi konkurować z metodą chromatograficzną.

System pomiarowy będzie mógł pracować w dwóch wersjach, wykorzystujących w pierwszym przypadku pojedynczą parę przetworników ultradźwiękowych, albo w drugiej wersji przestrzenny ich układ pracujący w roli tomografu komputerowego.



Rys. 4-8. Pomiar pojedynczą parą przetworników

Pomiar pojedynczą parą przetworników charakteryzuje się dużo większą prostotą, ale umożliwia tylko zmierzenie średniej wartości prędkości propagacji dźwięku w całym ośrodku. Na tej podstawie możliwe jest wyznaczenie średniej temperatury gazu lub średniego

składu mieszaniny, co jednakże jest już wystarczające do budowy systemu ostrzegania. Układ taki przedstawiono schematycznie na Rys. 4-8.

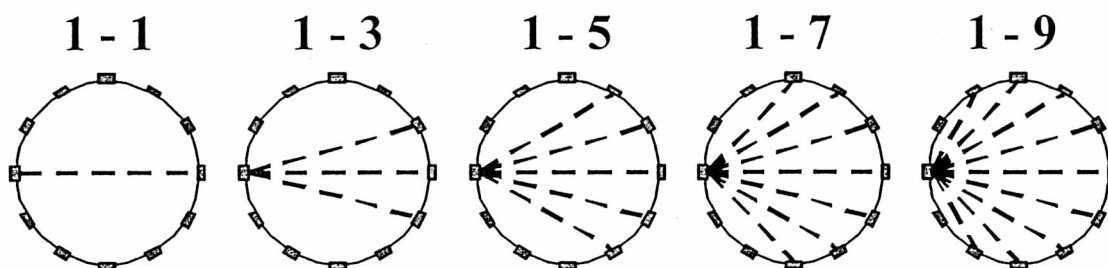
Druga wersja systemu pomiarowego oparta jest na przestrzennym układzie 12 przetworników ultradźwiękowych rozmieszczonych równomiernie na obręczy pomiarowej. Schematyczny widok takiego układu przedstawiono na Rys. 4-9



Rys. 4-9. Pomiar układem czujników

System taki, poprzez zastosowanie w nim techniki tomografii komputerowej, umożliwia już pomiar przestrzennego rozkładu pola prędkości propagacji fali akustycznej w badanym obszarze. Na tej podstawie można określić przestrzenny rozkład temperatury lub przestrzenny rozkład udziałów poszczególnych składników mieszaniny.

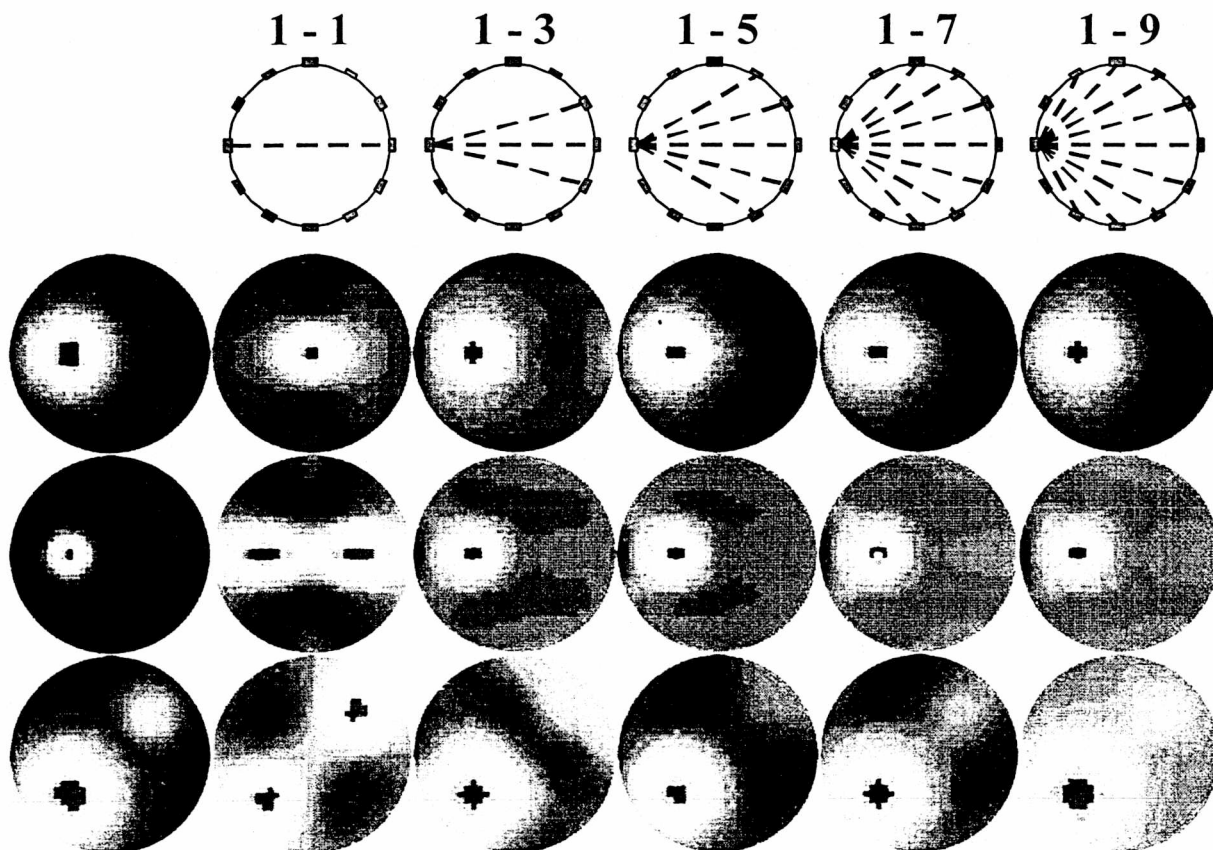
Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na możliwość prawidłowej rekonstrukcji obrazu tomograficznego jest zastosowany układ projekcji. Każdy przetwornik akustyczny umieszczony na brzegu badanego obszaru (Rys. 4-9) wysyła falę ultradźwiękową, która jest odbierana przez inne przetworniki. W zależności od tego które przetworniki będą odbierały sygnał, możemy rozróżnić przykładowe rodzaje podstawowych układów projekcji, przedstawione na Rys. 4-10. Na rysunkach, z powodu przejrzystości, przedstawione są linie projekcji tylko z jednego przetwornika. Należy rozumieć, że każdy kolejny przetwornik emituje fale w identyczny sposób.



Rys. 4-10. Podstawowe układy projekcji pomiarowych

Z punktu widzenia rekonstrukcji obrazu tomograficznego najkorzystniejszy jest wariant zastosowania jak najszerzego układu projekcji. Zastosowanie w układzie pomiarowym fal ultradźwiękowych ogranicza jednak w znaczny sposób taką możliwość ze względu na dosyć wąską charakterystykę kierunkową przetworników ultradźwiękowych. Aby przeanalizować wpływ szerokości układu projekcji na jakość rekonstrukcji obrazu, przeprowadzono symulację teoretyczną. Do tego celu wykorzystano specjalnie napisany program w języku C++ do rekonstrukcji obrazów tomograficznych. Dla zadanych teoretycznych profili przepływu helu w kanale przeprowadzono rekonstrukcję obrazu tomograficznego w oparciu o różne układy projekcji. Porównawcze zestawienie wyników

obliczeń przedstawiono na Rys. 4-11. Do rekonstrukcji obrazu wykorzystana została algebraiczna metoda ART.



Rys. 4-11. Porównawcze zestawienie wyników symulacji rekonstrukcji obrazu zadanych profili w oparciu o różne układy projekcji pomiarowych

Na rysunku tym w pierwszej kolumnie przedstawiono trzy różne profile przepływu helu przez kanał. Przyjęto zasadę, że cieplejszej barwie odpowiada większe stężenie helu. W następnych kolumnach pokazano wyniki rekonstrukcji obrazu zadanego profilu przy pomocy kolejnych, coraz szerszych układów projekcji, pokazanych schematycznie na samej górze. Każdy wiersz pokazuje najpierw zadany profil, a następnie wyniki rekonstrukcji obrazu przy użyciu różnych układów projekcji.

Z wyników przeprowadzonej symulacji widać, że już układ projekcji 1 na 3 daje zadowalające rezultaty. Węższa projekcja 1 na 1 identyfikuje już, co prawda, występowanie niejednorodności w obszarze pomiarowym, ale nie daje informacji o miejscu jej występowania.

Szersze układy projekcji, typu 1 na 5, 1 na 7, czy 1 na 9, dają coraz dokładniejsze wyniki, ale wymagają większej komplikacji urządzenia pomiarowego oraz uzyskania szerokiej charakterystyki promieniowania źródła fali, co przy wykorzystaniu standardowych przetworników ultradźwiękowych jest bardzo trudne do osiągnięcia.

Można w związku z tym przyjąć, że zastosowanie projekcji typu 1 na 3 (jeden wysłała falę, trzy naprzeciwległe odbierają) jest dobrym kompromisem pomiędzy możliwością uzyskania wystarczająco dokładnej rekonstrukcji obrazu, a wymaganiami technicznymi układu tomograficznego.

Na podstawie powyższych rozważań określono następujące podstawowe założenia budowy akustycznego systemu pomiarowego:

- Pomiar czasu propagacji fali akustycznej
- Pomiar czasu propagacji tam i z powrotem
- Zastosowanie fali ultradźwiękowej o częstotliwości 108 kHz ($\lambda \approx 3$ mm w powietrzu)
- Wymagana dokładność na poziomie kilku procent
- Zastosowanie prostego układu pomiarowego opartego na pojedynczej parze przetworników do pomiaru średnich wartości parametrów ośrodka
- Zastosowanie układu tomograficznego, wykorzystującego 12 przetworników nadawczo-odbiorczych o szerokości projekcji 1 na 3, do pomiaru pola rozkładu parametrów ośrodka
- Przyjęta metoda rekonstrukcji obrazu ART (Algebraic Reconstruction Technique)

5. Badania doświadczalne

5.1. Zakres i cele badań

W celu doświadczalnej weryfikacji możliwości zastosowania proponowanej metody pomiarowej w różnych warunkach przeprowadzono szereg badań według następującego planu:

Badania wstępne - cel: doświadczalne sprawdzenie teoretycznych podstaw proponowanej metody pomiarowej

- Wyznaczenie składu wzorcowych mieszanin powietrza z helem metodą ultradźwiękową

- Zastosowanie tomografu ultradźwiękowego do pomiaru przestrzennego rozkładu helu oraz niejednorodnego pola temperatury w badanym obszarze

Badania zasadnicze - cel: możliwość zastosowania proponowanej metody ultradźwiękowej w systemie monitorowania wycieków helu

- Pomiary przestrzennego rozkładu helu w laboratoryjnym modelu kanału akceleratora LHC dla różnych przypadków przepływu, weryfikacja metodą elektrochemiczną

Badania dodatkowe - cel: wybrane obszary zastosowań metody ultradźwiękowej

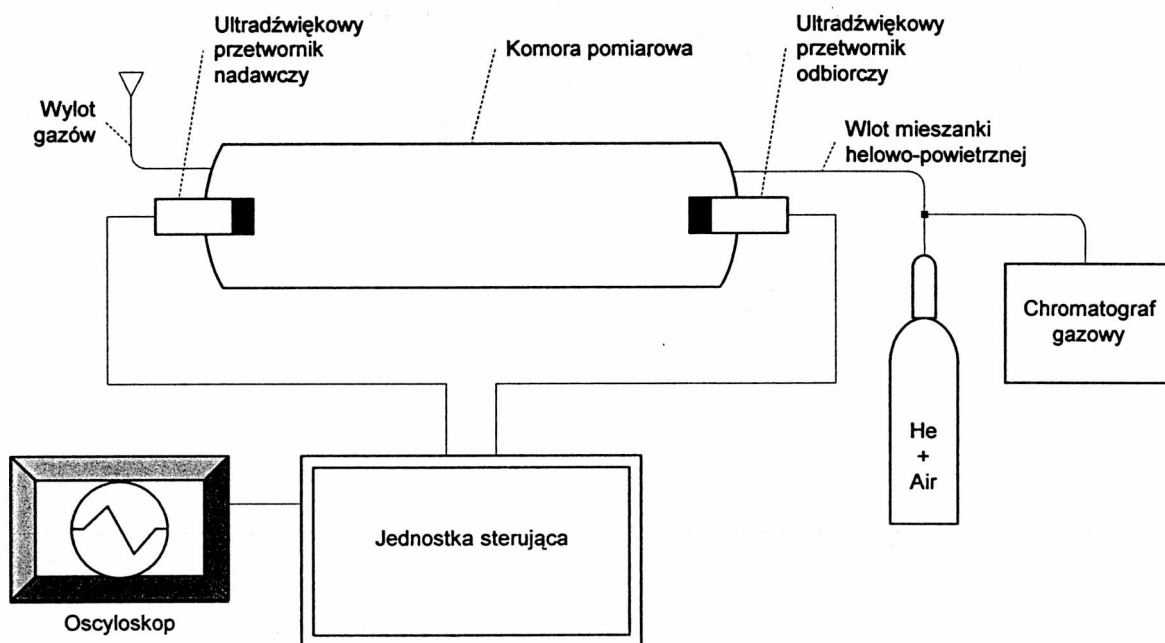
- Pomiary porównawcze szybkości dyfuzji helu metodą ultradźwiękową i elektrochemiczną

- Badania odporności ultradźwiękowego układu pomiarowego na promieniowanie jonizujące

5.2. Wyznaczenie składu wzorcowych mieszanin powietrza z helem metodą ultradźwiękową

W celu eksperymentalnego potwierdzenia możliwości określenia składu mieszaniny na podstawie pomiaru prędkości dźwięku przeprowadzono pomiary przy użyciu wzorcowych mieszanin helu z powietrzem. Badania zostały przeprowadzone we współpracy z Akademią Marynarki Wojennej w Gdyni.

Badania wzorcowe wykonano na specjalnie przygotowanym stanowisku pomiarowym przedstawionym na Rys. 5-1.



Rys. 5-1. Schemat stanowiska do pomiarów wzorcowych

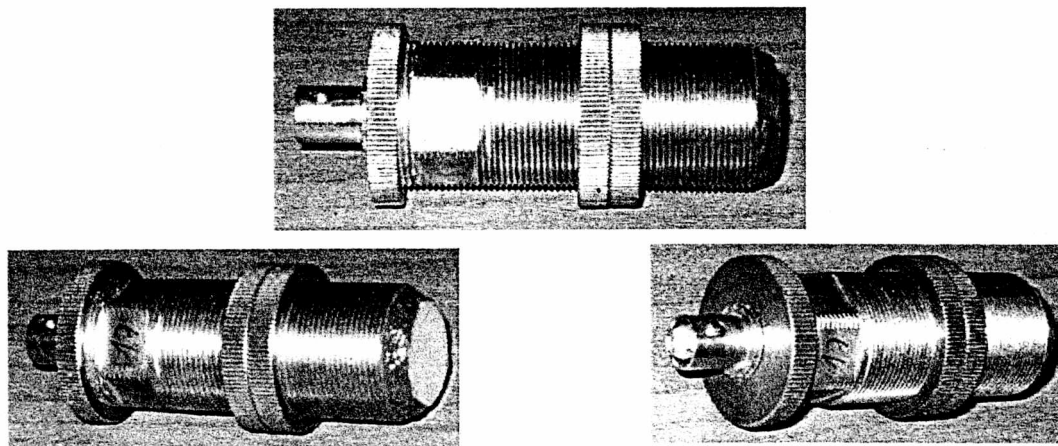
Stanowisko badawcze, wykorzystane do przeprowadzenia pomiarów na wzorcowych mieszaninach helu z powietrzem składało się z komory pomiarowej, układu dostarczania mieszanek gazowych oraz z układu sterującego pracą przetworników. Wyniki odczytywano zarówno przy pomocy mikroprocesorowej jednostki sterującej, jak również przy pomocy oscyloskopu cyfrowego. Komora pomiarowa zbudowana została z rury PCV; jej widok przedstawiono na Rys. 5-2.



Rys. 5-2. Widok zewnętrzny komory pomiarowej, fot. W. Gizicki

Rura po obu końcach zaopatrzona była w plastikowe zamknięcia, w których przewiercono po dwa otwory, większy i mniejszy. Poprzez parę otworów mniejszych następował wlot i wylot analizowanej mieszaniny. Druga para większych otworów służyła do

umieszczenia wewnątrz komory przetworników ultradźwiękowych. Zastosowano dwa identyczne, piezokrystaliczne przetworniki ultradźwiękowe z warstwą dopasowującą, wykonane w Zakładzie Akustyki Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej (Rys. 5-3). Przetworniki pracowały w układzie jeden nadawczy, drugi odbiorczy, przy częstotliwości rezonansowej 108,5 kHz. Moc przetwornika nadawczego wynosiła 30 W przypadające na impuls o czasie trwania 125 ms.



Rys. 5-3. Widok zastosowanych przetworników ultradźwiękowych, fot. W. Gizicki

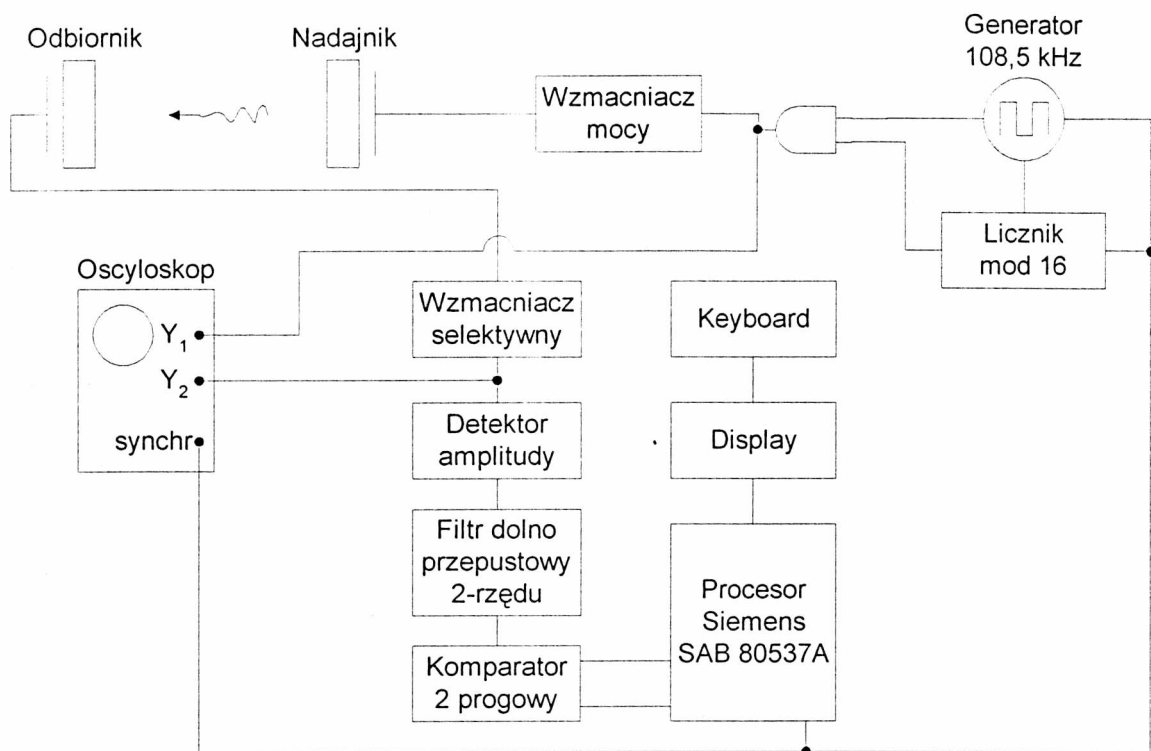
Układ dostarczania mieszanek gazowych składał się z kilku butli z mieszkami o różnym udziale helu w powietrzu, które podłączano po kolei do komory pomiarowej. Po drodze następował pobór mieszanki do analizy na chromatografie gazowym.

Jednostka sterująca miała za zadanie sterować pracą przetworników ultradźwiękowych oraz przetworzyć odebrane sygnały pomiarowe. Schemat blokowy układu sterującego przedstawiono na Rys. 5-4.

Elektroniczny układ sterujący, po stronie nadawczej, składał się ze stabilizowanego kwarcem generatora paczki falowej. Paczka składała się z 16 impulsów prostokątnych o częstotliwości 108,5 kHz. Paczka falowa była następnie wzmacniana we wzmacniaczu mocy do wartości napięcia skutecznego (międzyszczytowego) $U_{p-p} = 300 \text{ V}$ i trafiała do piezokryształu przetwornika nadawczego, gdzie powstawała fala ultradźwiękowa.

Po stronie odbiorczej układ składał się z piezokrystalicznego przetwornika odbiorczego, selektywnego wzmacniacza mocy, detektora amplitudy, filtru dolno przepustowego drugiego rzędu oraz komparatora dwu progowego. Całość sterowana była mikroprocesorem wyzwalającym pomiar i przetwarzającym sygnały otrzymane z komparatora. Wynik pomiaru, w postaci czasu przelotu fali ultradźwiękowej pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem, prezentowano na wyświetlaczu ciekłokrystalicznym. Klawiatura służyła do ręcznego sterowania procesem pomiarowym.

W celu obserwacji przebiegu sygnałów elektrycznych w najważniejszych miejscach układu pomiarowego dołączono dwu-kanalowy, cyfrowy oscyloskop Tektronix TDS 210. Na pierwszy kanał podawano sygnał generujący falę ultradźwiękową w przetworniku nadawczym, a na drugi - sygnał odpowiedzi otrzymany z przetwornika odbiorczego i wzmacniony we wzmacniaczu selektywnym. Sygnał synchronizacji pobierano wprost z mikroprocesora i był to sygnał wyzwalający pomiar. Odczyt czasu propagacji fali ultradźwiękowej otrzymywany był również na oscyloskopie. Mierzono czas, który upłynął od początku pobudzenia przetwornika nadawczego do początku narostu sygnału odpowiedzi na przetworniku odbiorczym.



Rys. 5-4. Schemat blokowy elektronicznego układu sterującego ultradźwiękowym systemem pomiaru szybkości dyfuzji

Do badań użyto sześć butli; cztery z nich zawierały określone mieszaniny helu z powietrzem i po jednej z czystym powietrzem i czystym helem. Skład użytych do badań gazów przedstawiono w Tab. 5-1.

Tab. 5-1. Skład mieszanin użytych do badań podczas pomiarów wzorcowych

nr butli	udział helu w powietrzu, %
0	0
1	$17 \pm 0,49$
2	$38 \pm 0,51$
3	$59 \pm 0,58$
4	$80 \pm 0,52$
5	100

Udział helu w butlach nr 1 - 4 oznaczono przy użyciu chromatografu gazowego VARIAN AEROGRAF 1400 TCD w laboratorium Zakładu Sprzętu Nurkowego i Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. W butli nr 0 znajdowało się powietrze atmosferyczne (o średnim objętościowym udziale helu 0,0005 %). Butla nr 5 zawierała czysty hel (99,99 % He).

Wykonano 5 serii pomiarowych w oparciu o wszystkie rodzaje mieszanek, jak również przy użyciu czystego powietrza i helu. Na podstawie odczytanych na oscyloskopie czasów przelotu fali akustycznej, pomiędzy przetwornikiem nadawczym a odbiorczym, obliczono prędkości dźwięku. Odległość pomiędzy przetwornikami wynosiła 0,294 m, a

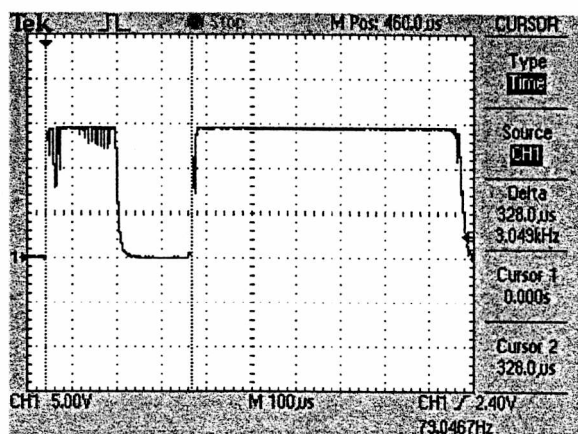
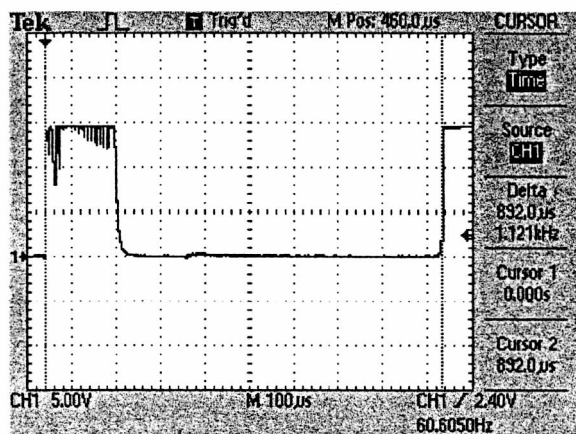
temperatura mieszanin wynosiła 293 K (20 °C). Odczytane wartości oraz obliczone prędkości przedstawiono w Tab. 5-2.

Tab. 5-2. Odczytane czasy propagacji i obliczone prędkości dźwięku dla pięciu serii pomiarów wzorcowych

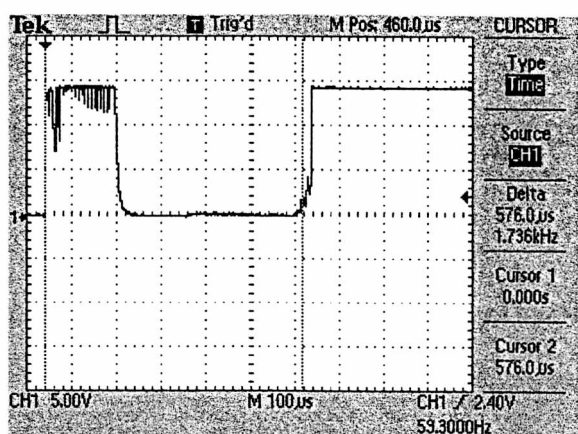
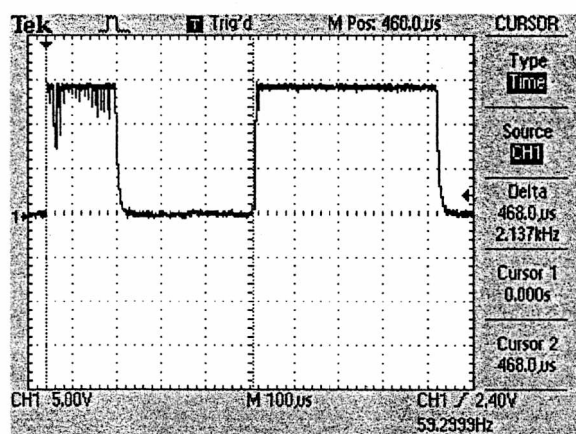
	nr pomiaru	numer butli	udział helu, %	czas propagacji, s	prędkość dźwięku, m/s
seria 1	1	0	0	8,95E-04	328,5
	2	0	0	8,90E-04	330,3
	3	5	100	3,38E-04	869,8
	4	5	100	3,36E-04	875,0
	5	5	100	3,35E-04	877,6
	6	4	80	4,77E-04	616,4
	7	3	59	5,82E-04	505,2
	8	2	38	7,26E-04	405,0
	9	1	17	7,95E-04	369,8
seria 2	10	4	80	4,84E-04	607,4
	11	3	59	5,81E-04	506,0
	12	2	38	7,30E-04	402,7
	13	1	17	7,97E-04	368,9
seria 3	14	4	80	4,71E-04	624,2
	15	3	59	5,80E-04	506,9
	16	2	38	7,35E-04	400,0
	17	1	17	7,97E-04	368,9
seria 4	18	4	80	4,73E-04	621,6
	19	3	59	5,80E-04	506,9
	20	2	38	7,36E-04	399,5
	21	1	17	7,97E-04	368,9
seria 5	22	4	80	4,71E-04	624,2
	23	3	59	5,81E-04	506,0
	24	2	38	7,37E-04	398,9
	25	1	17	7,97E-04	368,9

Wartości czasu propagacji fali akustycznej odczytano przy użyciu oscyloskopu cyfrowego. Przykładowe oscylogramy dla pomiarów nr 1, 3, 6 oraz 7 (udział helu odpowiednio 0 %, 100 %, 80 % oraz 59 %) przedstawiono na Rys. 5-5 i Rys. 5-6. Był to czas od początku pobudzenia przetwornika nadawczego do początku narostu sygnału odpowiedzi na przetworniku odbiorczym. Na oscylogramach wartości te są zaznaczone cienkimi pionowymi liniami.

Na podstawie wyników pomiarowych, przedstawionych w Tab. 5-2, obliczono średnie wartości prędkości propagacji dźwięku w badanych mieszaninach wzorcowych. Wartości te następnie skalibrowano dla czystego powietrza w temperaturze 293 K (20 °C) i na tej podstawie obliczono objętościowy udział helu w badanych mieszaninach za pomocą wzoru (12). Wszystkie te wartości (prędkość średnia, po kalibracji i obliczony udział helu) przedstawiono w Tab. 5-3. W ostatniej kolumnie pokazany jest udział helu w każdej mieszaninie. W butlach nr 1 do 4 został on oznaczony przy pomocy chromatografu gazowego, w butli nr 0 było czyste powietrze, a w butli nr 5 czysty hel.



Rys. 5-5. Przykładowe obrazy uzyskane na ekranie oscyloskopu:
po lewej butla #0 (powietrze), po prawej butla #5 (hel)



Rys. 5-6. Przykładowe obrazy uzyskane na ekranie oscyloskopu:
po lewej butla #4 (80 % helu), po prawej butla #3 (59 % helu)

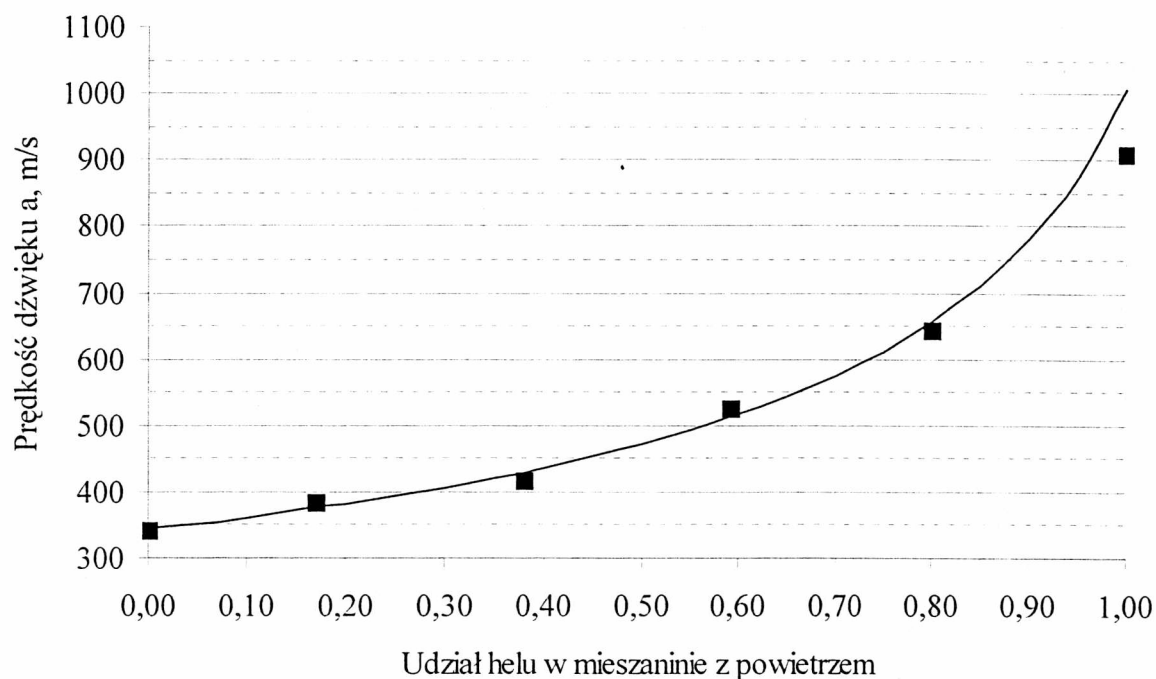
Tab. 5-3. Wartości zmierzonej prędkości dźwięku, średniej i po kalibracji,
oraz udziału helu obliczonego i oznaczonego chromatograficznie
dla poszczególnych mieszanin wzorcowych

nr butli	zmierzona średnia prędkość dźwięku, m/s	prędkość dźwięku po kalibracji, m/s	udział helu obliczony na podstawie zmierzonej prędkości dźwięku, %	udział helu oznaczony chromatografem, %
0	329,4	342,2	0,0	0
1	369,1	383,7	20,8	17 ±0,49
2	401,2	417,0	33,9	38 ±0,51
3	506,2	526,2	62,0	59 ±0,58
4	618,8	643,7	78,7	80 ±0,52
5	874,1	908,9	96,5	100

Maksymalna różnica pomiędzy udziałami helu obliczonymi na podstawie pomiaru ultradźwiękowego i oznaczenia chromatograficznego wyniosła 4 %. Taka różnica w pomiarze udziału helu w powietrzu odpowiada błędowi pomiaru tlenu w wysokości 0,8 %. Dokładność taka jest w pełni wystarczająca w systemie ostrzegania przed spadkiem udziału tlenu w powietrzu i odpowiada założonym wymaganiom postawionym w rozdziale 4.4. Dokładność ta

okazała się zgodna z teoretycznie oszacowaną niepewnością pomiaru udziału helu, przedstawioną w rozdziale 5.7.1.

Dodatkowo w celu porównania otrzymanych prędkości dźwięku dla poszczególnych mieszanin wzorcowych z wartościami teoretycznymi, umieszczono je na wykresie (Rys. 5-7) przedstawiającym teoretyczną zależność prędkości dźwięku od udziału helu w powietrzu. Zależność teoretyczną obliczono na podstawie równania (9) dla temperatury 293 K (20 °C).



Rys. 5-7. Zależność prędkości dźwięku w mieszaninie helu z powietrzem od udziału helu w mieszaninie

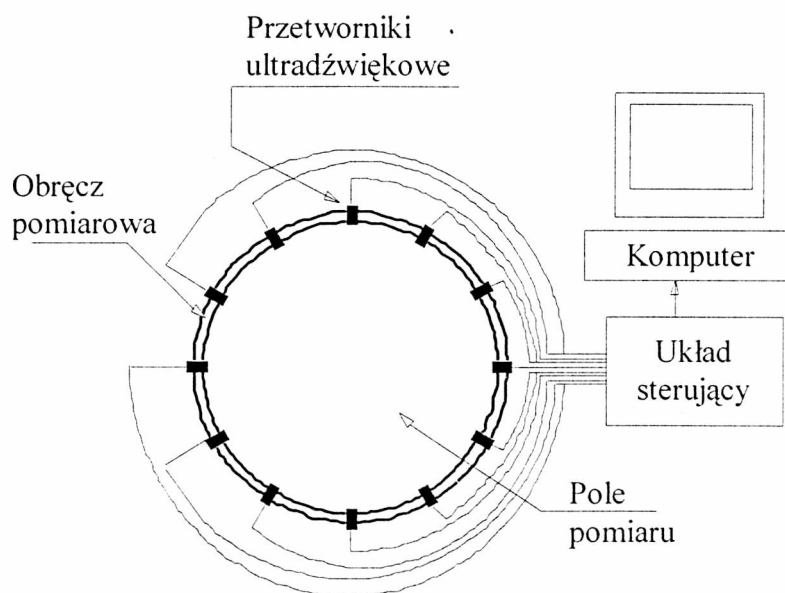
— zależność teoretyczna
■ wartości otrzymane eksperymentalnie

5.3. Zastosowanie tomografu ultradźwiękowego do pomiaru przestrzennego rozkładu helu oraz niejednorodnego pola temperatury w badanym obszarze

W celu sprawdzenia możliwości zastosowania techniki tomografii komputerowej do określania przestrzennego rozkładu udziału składników w mieszaninie gazów przeprowadzono badania z wykorzystaniem prototypowego układu tomografu ultradźwiękowego.

5.3.1. Budowa układu tomografu ultradźwiękowego

Schemat układu tomograficznego przedstawiono na Rys. 5-8.

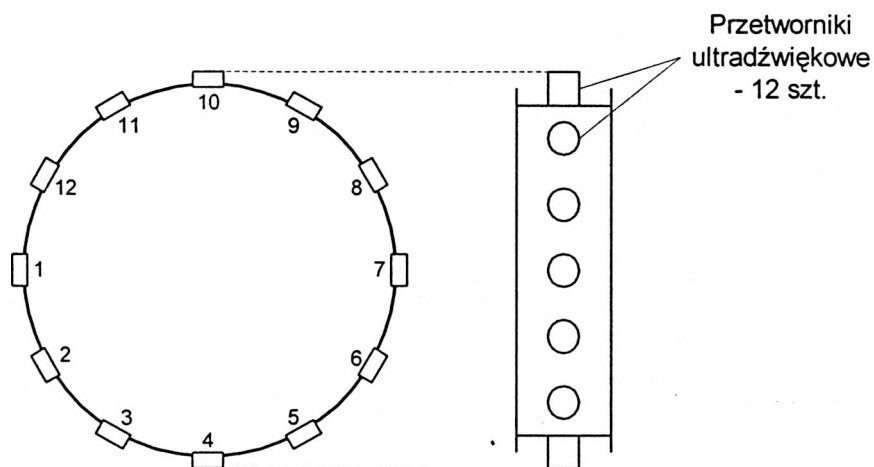


Rys. 5-8. Schemat układu tomograficznego

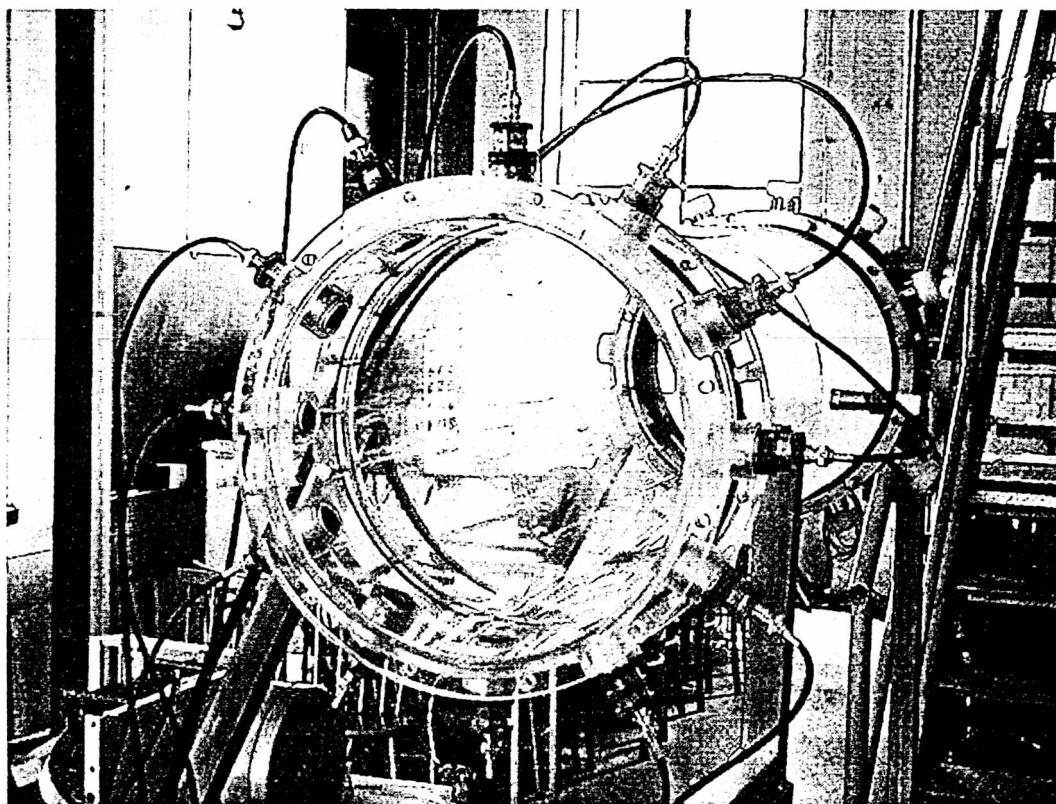
Układ pomiarowy składał się z obręczy pomiarowej wraz z zamontowanymi w niej przetwornikami ultradźwiękowymi, elektronicznego układu sterującego pracą tomografem oraz z komputera klasy PC.

Obręcz pomiarową, o średnicy wewnętrznej 0,292 m, wykonano z pleksi. Miała ona 12 otworów o rozstawie kątowym co 30° , w których zamontowano przetworniki ultradźwiękowe. Schemat obręczy przedstawiono na Rys. 5-9, a jej widok na Rys. 5-10.

W układzie tomografu akustycznego zastosowano zestaw dwunastu jednakowych piezokrystalicznych przetworników ultradźwiękowych z warstwą dopasowującą. Każdy z nich pracował równocześnie jako nadajnik i odbiornik. Były to przetworniki tego samego typu, jak użyte w badaniach wstępnych (rozdz. 5.2). Pracowały one również przy częstotliwości rezonansowej 108,5 kHz i moc przetwornika nadawczego wynosiła 30 W przypadające na impuls o czasie trwania 125 ms. W czasie pomiaru jeden z przetworników wzbudzał falę ultradźwiękową w przestrzeni pomiarowej, a pozostałe pracowały w tym momencie jako odbiorniki. Następnie kolejny wysyłał falę ultradźwiękową i tak dalej, aż do przeprowadzenia pełnego cyklu pomiaru, który obejmował kolejne wzbudzenia każdego przetwornika i zebranie czasów odpowiedzi z pozostałych przetworników.



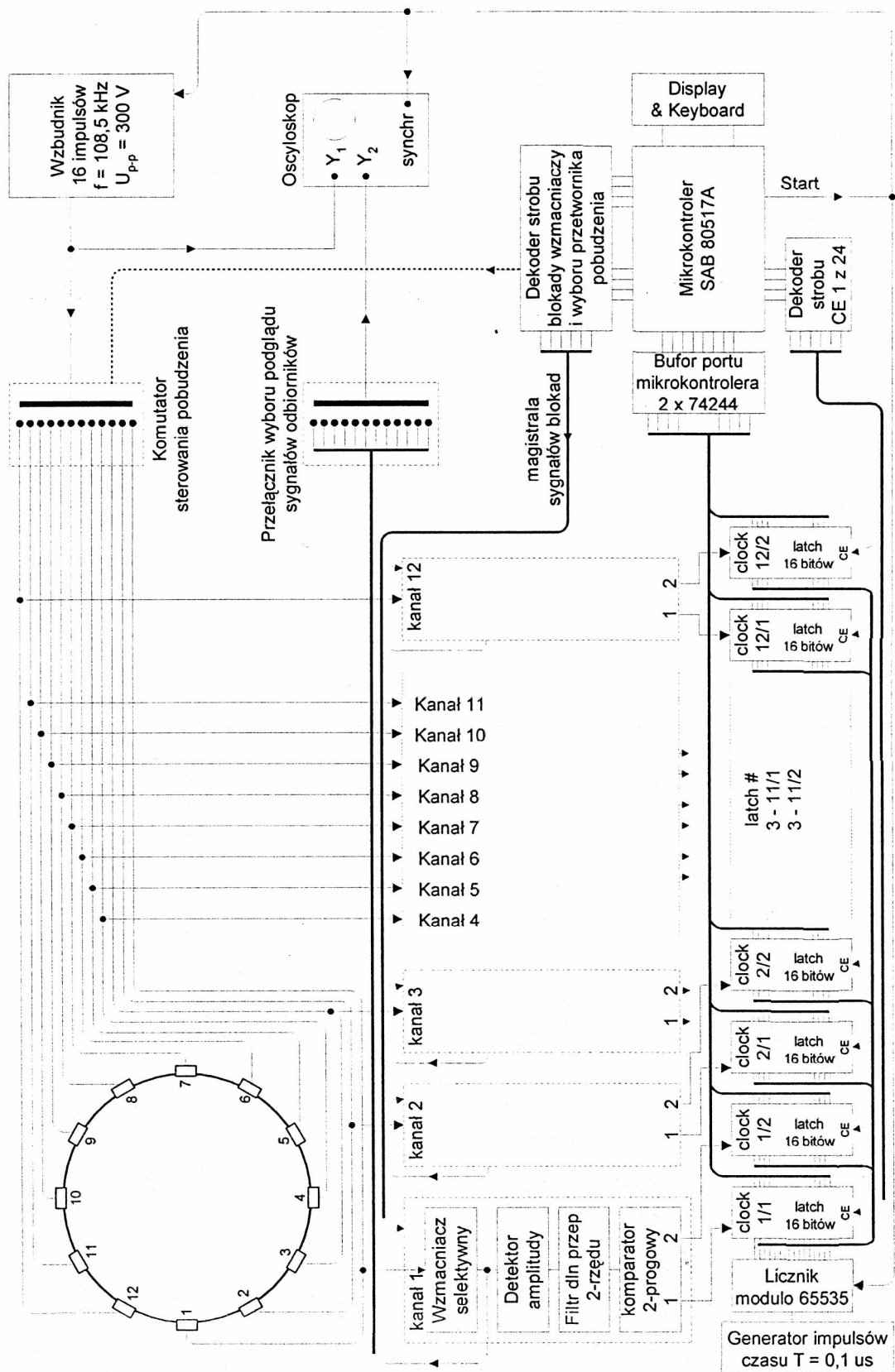
Rys. 5-9. Schemat obręczy pomiarowej układu tomografu ultradźwiękowego



Rys. 5-10. Widok obręczy pomiarowej wykorzystanej do badań, fot. W. Gizicki

Układ elektroniczny tomografu ultradźwiękowego miał za zadanie sterowanie pracą poszczególnych przetworników umieszczonych w obręczy pomiarowej, jak również wstępne przetworzenie, uzyskanych w trakcie pomiaru, sygnałów elektrycznych i przesłanie ich w postaci cyfrowej do komputera w celu interpretacji wyników. Schemat blokowy układu przedstawiono na Rys. 5-11.

Całe urządzenie zaprojektowano i zbudowano w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej w ramach niniejszej pracy.



Rys. 5-11. Schemat blokowy układu elektronicznego tomografu ultradźwiękowego

Zasada pracy układu elektronicznego tomografu ultradźwiękowego jest następująca:

Elektryczny sygnał pobudzający podawany jest w cyklu pomiarowym kolejno na przetworniki wzbudzające za pośrednictwem komutatora elektronicznego sterowanego programowo z mikroprocesora. Sygnałem elektrycznym wzbudzającym jest paczka szesnastu przemiennych impulsów prostokątnych (bez składowej stałej) o amplitudzie międzyszczytowej 300V i częstotliwości rezonansowej 108,5 kHz. Częstotliwość generatora stabilizowana jest rezonatorem kwarcowym, o częstotliwości 14,3245 MHz, a częstotliwość robocza 108,5 kHz jest uzyskiwana w wyniku dzielenia częstotliwości rezonatora przez 132. Stabilność amplitudy wzbudzenia zapewniona jest przez układ stabilizacji mocy wyjściowej generatora. Paczka impulsów wzbudzających formowana jest przez odliczenie 16 okresów przebiegu o częstotliwości 108,5 kHz przy zastosowaniu licznika modulo 16. Procesem odliczenia 16 impulsów i wysłania ich na konkretny czujnik steruje mikroprocesor.

Część odbiorcza układu składa się z dwunastu jednakowych selektywnych wzmacniaczy, dla każdego przetwornika odbiorczego, zakończonych układami komparatorów dwu-progowych współpracujących z dwunastoma podwójnymi rejestrami liczników czasu. Wyjścia rejestrów liczników czasów wchodzi do portu wejściowego mikrokontrolera układu.

Odbiornikiem fali ultradźwiękowej jest przetwornik piezoelektryczny o częstotliwości rezonansu własnego 108,5 kHz. Poziom napięcia przetwornika odbiorczego wymuszonego falą akustyczną w warunkach zmiennego tłumienia ośrodka propagacji na drodze pomiaru wynosi od 0,2 do 20 μ V. Ze względu na możliwość wystąpienia znacznych wahań parametru tłumienia sygnału ultradźwiękowego w kanale pomiarowym, jak również konieczność ograniczenia wpływu sygnałów zakłócających z zakresu akustycznego i innych rodzajów szumów, wzmacniacze odbiorników muszą zapewnić bardzo duże wzmocnienie rzędu 80 - 120 dB, tj. 10^4 - 10^6 V/V, przy stosunku sygnału użytecznego do szumów co najmniej 60dB. Efekt taki osiągnięto poprzez zastosowanie indywidualnych dla każdego przetwornika wzmacniaczy selektywnych. Selektywność wzmacniaczy ogranicza pasmo pracy do częstotliwości pobudzenia 108,5 kHz z pasmem $\pm$ 0,8 kHz i z tłumieniem zakłóceń w obszarze częstotliwości poza-pasmowych na poziomie -70dB. Korzystnym czynnikiem poprawiającym selekcję sygnału użytkowego jest selektywność samych przetworników, które dla częstotliwości spoza rezonansu własnego mają znacznie niższą czułość.

Tak wzmocniony sygnał kierowany jest do detektora amplitudy, a następnie jest wygładzany przez filtr dolnoprzepustowy drugiego rzędu, likwidujący schodkowy charakter obwiedni sygnału amplitudowego. Następny w kolejności jest komparator dwu-progowy. Zastosowane komparatory mają ustawione dwa różne progi poziomu wykrywanej amplitudy sygnału. Każdy z nich jest ustawiony powyżej poziomu szumów własnych wzmacniaczy i szumów odbieranych z przestrzeni pomiarowej. Pojawienie się sygnału użytecznego odbieranej fali ma charakter przebiegu narastającego liniowo od zera (poniżej poziomu szumu) do wartości maksymalnej. Przekroczenie każdego z progów komparacji powoduje wpisanie (zatrzymanie) aktualnego w tym momencie stanu licznika czasu do odpowiadającego danemu komparatorowi (i progowi) rejestru binarnego. Zastosowanie dwóch różnych wartości progów komparacji dla zbocza narastającego sygnału umożliwia korekcję błędu pomiaru czasu wynikającego z wahań amplitudy sygnału odebranego na skutek zmieniającego się tłumienia fali akustycznej na drodze pomiaru.

Licznik czasu jest zerowany i uruchamiany na początku każdego pobudzenia emisji fali do przestrzeni pomiaru. Impulsy czasu o okresie 0,1 μ s są zliczane w liczniku binarnym o pojemności 65535 impulsów, co umożliwia pomiar czasu w zakresie od 0 ms do 6,55 ms. W analizowanym przypadku przy średnicy kanału pomiarowego 0,292 m i w temperaturze 20 °C czas propagacji dla powietrza wynosi ok. 850 μ s, dla helu wynosi ok. 300 μ s i jest określony z dokładnością do 0,1 μ s, co daje błąd względny pomiaru $\delta < 0,03$ %. Błąd względny użytego rezonatora kwarcowego wzorca czasu wynosi $0,5 \cdot 10^{-6}$. Zastosowanie osobnych binarnych

16 bitowych rejestrów czasu dla każdego z progów komparacji każdego toru odbiornika zapobiega niepożądaney koincydencji wyników pomiaru czasu propagacji w przypadku wystąpienia jednakowych opóźnień sygnału odbieranych przez różne czujniki odbiorcze.

W cyklu pomiarowym mikrokontroler włącza komutatorem jeden z dwunastu przetworników w opcję pracy jako wzbudnik nadawczy i wysyła sygnał startu pobudzenia wzbudnika, równocześnie zeruje i uruchamia licznik impulsów czasowych o okresie $0.1 \mu\text{s}$. Zostaje wygenerowana paczka 16 impulsów wzbudzających przetwornik nadawczy. Po czasie propagacji fali pojawiają się narastające zbocza sygnałów odbieranych przekraczające pierwsze progi komparacji po czasie T_1 i drugie progi komparacji po czasie T_2 . Logiczne sygnały komparatorów powodują przepisanie stanu licznika czasu dla czasu T_1 i T_2 do rejestrów binarnych torów pomiarowych wszystkich przetworników odbiorczych. Następnie liczby binarne z rejestrów poszczególnych torów pomiarowych są przesyłane do pamięci mikrokontrolera. Pomiar powtarzany jest 10 razy dla danego przetwornika wzbudzającego, a wyniki pomiaru czasów są uśredniane. Następnie jest wybierany programowo przez mikrokontroler następny przetwornik wzbudzający i cykl pomiaru czasów i przesyłu wyników do pamięci mikrokontrolera powtarza się. Pełny cykl pomiaru czasów propagacji obejmuje pomiar dla pobudzenia każdego z dwunastu przetworników. Następnie realizowana jest procedura obliczeniowa korekcji wyników od błędu tłumienia i skorygowane wyniki pomiarowe zostają wyświetlane na ekranie LCD oraz przesłane do komputera przez port szeregowy RS232 w celu ich wizualizacji i archiwizacji. Proces ten powtarzany w sposób ciągły aktualizuje wyniki pomiaru co około 1,5 s.

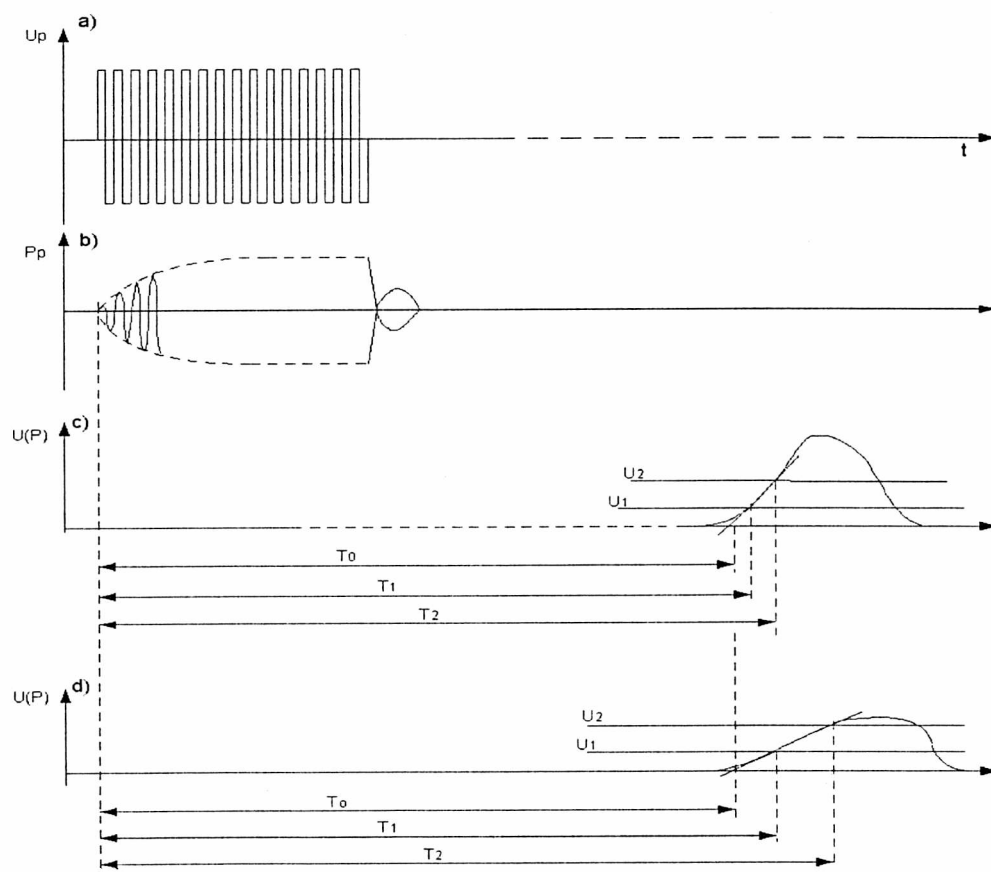
Układ nadajnika i dwunastu torów wzmacniaczy odbiorników fali ultradźwiękowej z układami pomiaru czasu wraz z komutatorem, układem mikrokontrolera i układem zasilania stanowi konstrukcyjnie jeden blok urządzenia połączony z przetwornikami ultradźwiękowymi umieszczonymi na kanale pomiarowym za pomocą przewodów koncentrycznych.

5.3.2. Korekcja błędu pomiaru czasu powstającego na skutek tłumienia fali

Podanie prostokątnej paczki sygnału elektrycznego na przetwornik wzbudzający falę ultradźwiękową (Rys. 5-12a) powoduje, ze względu na mechaniczną bezwładność przetwornika, narastającą rezonansowo amplitudę drgań płaszczyzny promieniowania. Amplituda narasta do momentu zrównania się mocy dostarczanej do przetwornika z mocą strat wynikających z oporu środowiska drgań i własnych strat w samym przetworniku. Obwiednia maksymalnych amplitud drgań przetwornika ma charakter przebiegu inercyjnego pierwszego rzędu (Rys. 5-12b) i taki sam charakter ma amplituda drgań ciśnienia czoła fali akustycznej. Przebieg ten po czasie propagacji, pomniejszony o tłumienie ośrodka dociera do czujnika odbiorczego obciążonego taką samą bezwładnością masy. Wzbudzony w odbiorniku przebieg elektryczny jest narastającą odpowiedzią na pobudzenie mechaniczne w funkcji ciśnienia fali akustycznej. Obwiednia fali elektrycznej sygnału odebranego ma charakter przebiegu inercyjnego drugiego rzędu (Rys. 5-12c). Występują tu niepożądane opóźnienia czasowe związane z własnościami przetworników jak i układu wzmacniającego. Ustanowienie jednego progu wykrywania poziomu odebranego sygnału wnosiłoby znaczny błąd pomiaru czasu przy zmieniającym się tłumieniu amplitudy fali w przestrzeni pomiarowej. Zjawisko to obrazują przebiegi odebranego sygnału przedstawione na Rys. 5-12c i Rys. 5-12d. Korekcja uchybu czasu polega na wyznaczeniu z punktów U_1 i U_2 (wartości stałych progów komparatora) oraz różnicy zmierzonych czasów T_1 i T_2 średniego nachylenia narostu sygnału i następnie wyznaczenia punktu T_0 na osi czasu. Wartość średniego nachylenia narostu sygnału odegranego (przy stałej amplitudzie pobudzenia fali) jest przy tym wskaźnikiem aktualnego tłumienia sygnału w przestrzeni pomiarowej. Umożliwia to obliczeniowe wyznaczenie rzeczywistego czasu propagacji T_0 na podstawie zmierzonych czasów T_1 i T_2 , eliminując opóźnienie wynikające z narastającej amplitudy wzbudzenia fali,

gdzie początek przebiegu paczki impulsów ma jeszcze zbyt małą (wobec tłumienia ośrodka) amplitudę dla wzbudzenia sygnału elektrycznego w przetworniku odbiornika. Poprawka ta jest wyznaczana obliczeniowo i, po odjęciu od czasu T_0 , daje w wyniku rzeczywisty czas propagacji fali.

Wyznaczone wartości uchybów stałych wynikających z właściwości technicznych sprzętu pomiarowego, tzn. opóźnienie wzbudzenia przetwornika nadawczego, opóźnienie grupowe wzmacniaczy selektywnych, itp. zostały wprowadzone do programu obsługi pomiaru mikrokontrolera i stanowią poprawki stałe w algorytmie przetwarzania obliczeniowego wyników pomiaru



Rys. 5-12. Przebiegi sygnałów pomiaru czasu propagacji

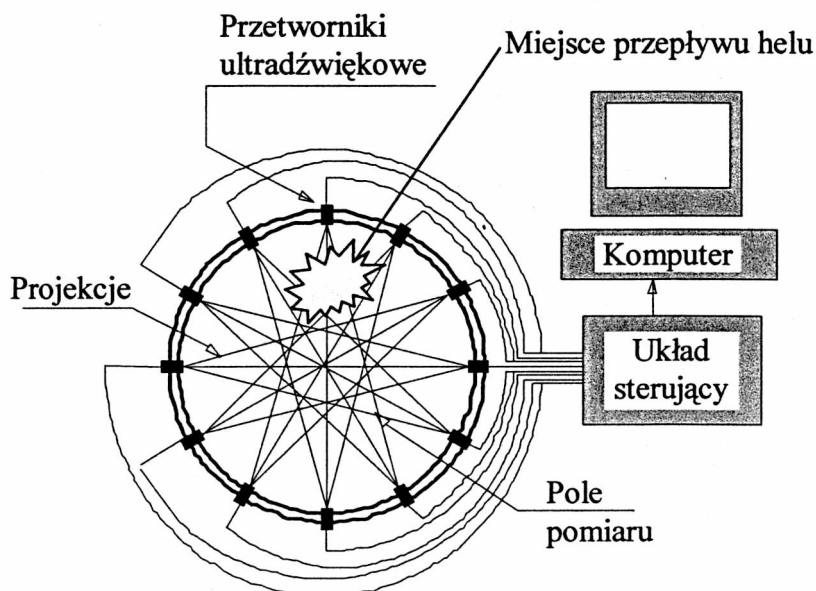
- a) – elektryczny przebieg sygnału pobudzającego przetwornik nadawczy
- b) – przebieg narostu ciśnienia fali akustycznej
- c) – przebieg sygnału odebranego (po detekcji i filtracji) przy małym tłumieniu
- d) – przebieg sygnału odebranego (po detekcji i filtracji) przy dużym tłumieniu

5.3.3. Procedura pomiarowa i uzyskane wyniki

Przedstawiony, prototypowy układ tomografu ultradźwiękowego wykorzystano do pomiaru rozkładu koncentracji helu w powietrzu oraz do rekonstrukcji profilu temperatury podczas punktowego wypływu gorącego powietrza w obszarze pomiarowym. Badania przeprowadzono w pionowym kanale kołowym o średnicy wewnętrznej 0,292 m z zamontowaną do niego obręczą tomograficzną. Wylot helu lub gorącego powietrza umiejscowiono na wysokości 0,1 m (10 cm) pod płaszczyzną obręczy pomiarowej. Temperatura otaczającego powietrza wynosiła 293 K (20 °C). Zastosowano układ projekcji 1 na 3, czyli każdy przetwornik kolejno emituje falę akustyczną, która jest odbierana przez

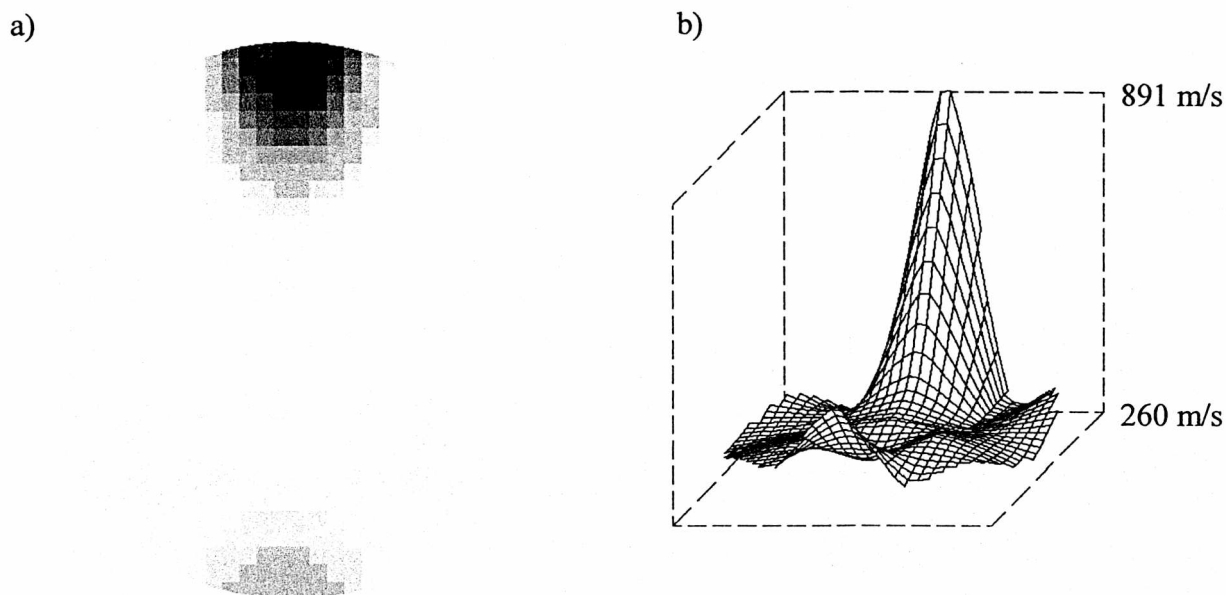
trzy naprzeciwległe przetworniki. Układ taki jest zgodny z przyjętymi założeniami budowy systemu pomiarowego, przedstawionymi w rozdziale 4.4.

Pierwsza część badań dotyczyła rekonstrukcji pola udziału helu w powietrzu. Hel, dostarczany z butli, wypływał dyszą o średnicy 0,09 m (9 cm), ulokowaną blisko brzegu obszaru pomiarowego (Rys. 5-13).



Rys. 5-13. Miejsce wypływu helu do obszaru pomiarowego

W wyniku przeprowadzonej rekonstrukcji obrazu metodą ART na podstawie otrzymanych wartości pomiarowych otrzymano profil lokalnych prędkości dźwięku w płaszczyźnie poprzecznej kanału, przedstawiony na Rys. 5-14.

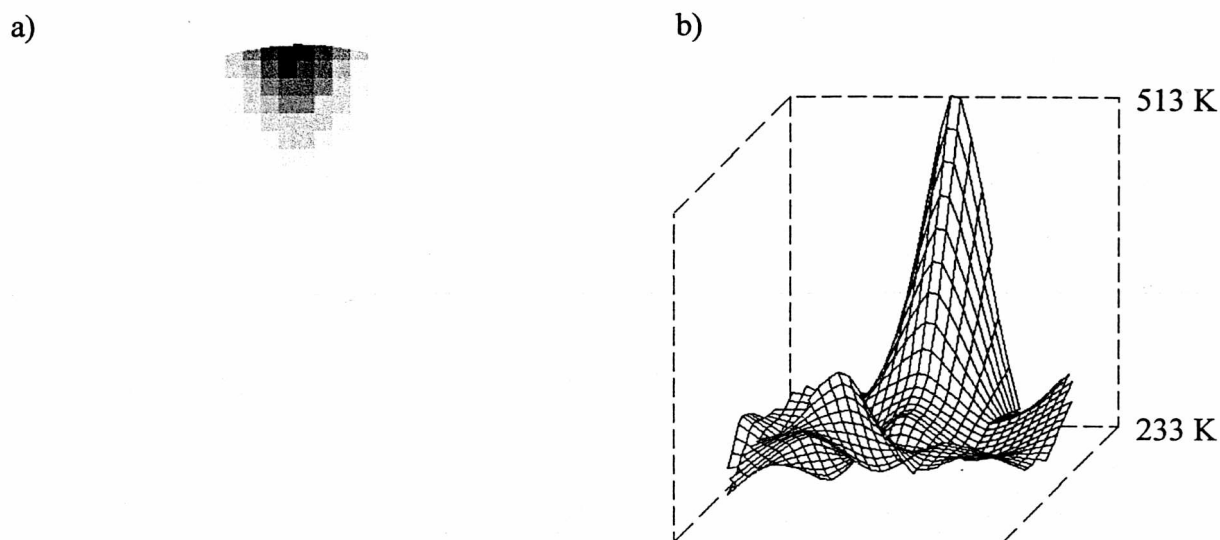


Rys. 5-14. Zrekonstruowane pole prędkości dźwięku w płaszczyźnie pomiarowej,
a) wykres rastrowy b) wykres 3D

Czarny obszar na dwuwymiarowym wykresie rastrowym oraz najwyższy pik na wykresie 3D odpowiadają zrekonstruowanej lokalnej prędkości dźwięku 891 m/s. Prędkości takiej, w temperaturze 293 K (20 °C), odpowiada udział objętościowy helu w powietrzu wynoszący 0,957 (~96 %). Umieszczenie zrekonstruowanego obszaru o najwyższym udziale helu zgadza się z miejscem jego rzeczywistego wypływu.

Druga część badań dotyczyła rekonstrukcji pola temperatury. Procedura pomiarowa była identyczna do poprzedniej, tylko zamiast wypływu helu zastosowano punktowy wypływ gorącego powietrza w obszarze pomiarowym. Gorące powietrze dopływało z nagrzewnicy elektrycznej poprzez dyszę o średnicy 0,06 m (6 cm). Temperatura powietrza na wylocie z dyszy wynosiła 553 K (280 °C). Prędkość powietrza wynosiła 2,56 m/s. Umieszczenie dyszy było identyczne jak w poprzednim przypadku, czyli blisko brzegu obszaru pomiarowego (Rys. 5-13 - zamiast helu, struga gorącego powietrza).

Po przeprowadzeniu pomiarów i rekonstrukcji obrazu, podobnie jak w poprzednim przypadku metodą ART, oraz przeliczeniu lokalnych prędkości dźwięku na odpowiadające im lokalne wartości temperatur w czystym powietrzu, otrzymano pole przestrzennego rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym kanału, pokazane na Rys. 5-15.

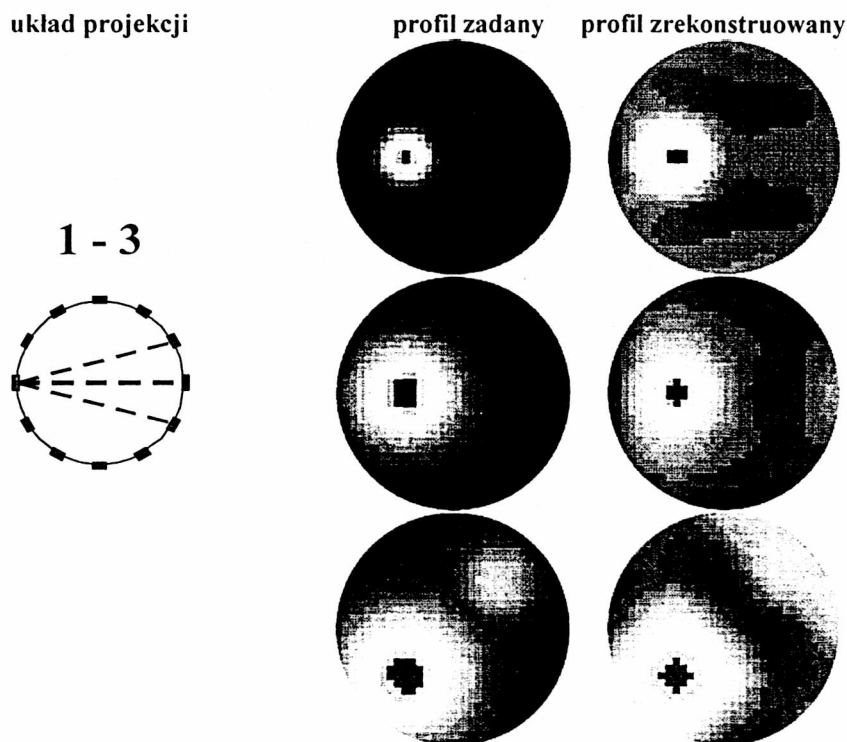


Rys. 5-15. Zrekonstruowane pole rozkładu temperatury w płaszczyźnie pomiarowej,
a) wykres rastrowy b) wykres 3D

Czarny obszar na dwuwymiarowym wykresie rastrowym oraz najwyższy pik na wykresie 3D odpowiadają zrekonstruowanej temperaturze 513 K (240 °C). W rzeczywistości temperatura ta wynosiła 553 K (280 °C). Umieszczenie zrekonstruowanego obszaru maksymalnej temperatury odpowiadało miejscu rzeczywistego wypływu gorącego powietrza z nagrzewnicy.

Zarówno w przypadku rekonstrukcji pola udziału helu, jak i pola temperatury powietrza w przekroju pomiarowym, na Rys. 5-14 oraz na Rys. 5-15 można zauważyć, oprócz prawidłowo zrekonstruowanego miejsca rzeczywistej niejednorodności, także drugi, naprzeciwległy obszar pozornego występowania zaburzenia składu mieszaniny, bądź jej temperatury. Taki błąd w rekonstrukcji obrazu wynika z niewielkiej szerokości projekcji pomiarowych, w tym przypadku typu 1 na 3. Wpływ szerokości projekcji na dokładność rekonstrukcji obrazu przeanalizowany został w rozdziale 4.4. Na Rys. 5-16 przedstawiono jeszcze raz fragment wyników tej symulacji w przypadku zastosowania samej tylko projekcji

typu 1 na 3. Po lewej stronie pokazano typ projekcji pomiarowej. W środkowej kolumnie znajdują się trzy różne zadane teoretycznie profile prędkości dźwięku i w kolumnie prawej, odpowiadające im zrekonstruowane obrazy tomograficzne dla danego typu projekcji.



Rys. 5-16. Wynik symulacji rekonstrukcji obrazu dla projekcji typu 1 na 3

Jak widać na przedstawionej ilustracji zadane obszary wysokiej prędkości dźwięku leżą z boku obszaru pomiarowego. W takim przypadku, używając niezbyt szerokiej projekcji pomiarowej typu 1 na 3, zrekonstruowany obraz zawiera, oprócz prawidłowego profilu, także pozorny obszar podwyższonej prędkości dźwięku. Efekt ten jest widoczny w największym stopniu dla środkowego (pojedynczego i szerszego) zadanego profilu prędkości dźwięku. Teoretyczne przewidywania tej symulacji okazały się zgodne z wynikami rekonstrukcji otrzymanymi w rzeczywistości (Rys. 5-14 oraz Rys. 5-15). Zwiększanie szerokości projekcji pomiarowych pozwala na zmniejszenie, bądź całkowite zniwelowanie tego efektu, ale wiąże się z trudnościami technicznymi wskazanymi w rozdziale 4.4.

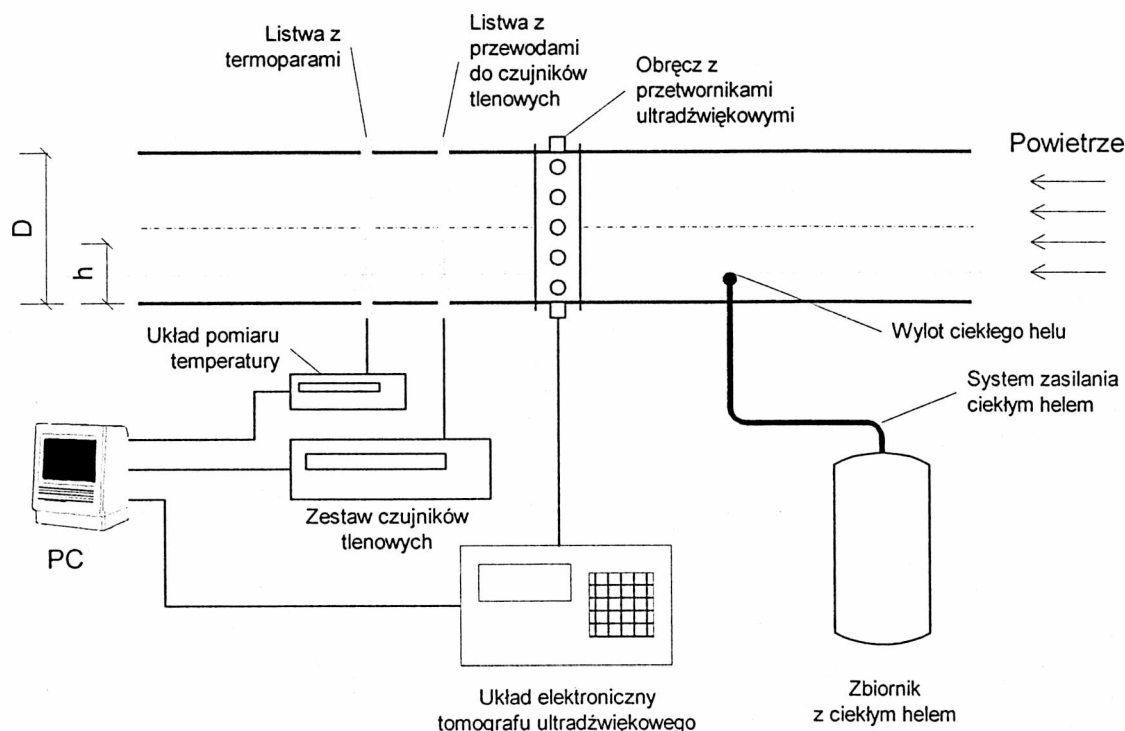
5.4. Pomiary przestrzennego rozkładu helu w modelu kanału akceleratora LHC dla różnych przypadków przepływu, weryfikacja metodą elektrochemiczną

W celu doświadczalnej weryfikacji możliwości zastosowania techniki ultradźwiękowej do wyznaczania przestrzennego rozkładu helu w kanale pomiarowym przeprowadzono pomiary przy użyciu modelu fragmentu tunelu akceleratora LHC budowanego w laboratorium CERN w Genewie. Model został zbudowany w laboratorium Instytutu Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej.

5.4.1. Stanowisko badawcze i procedura pomiarowa

Budowa stanowiska badawczego

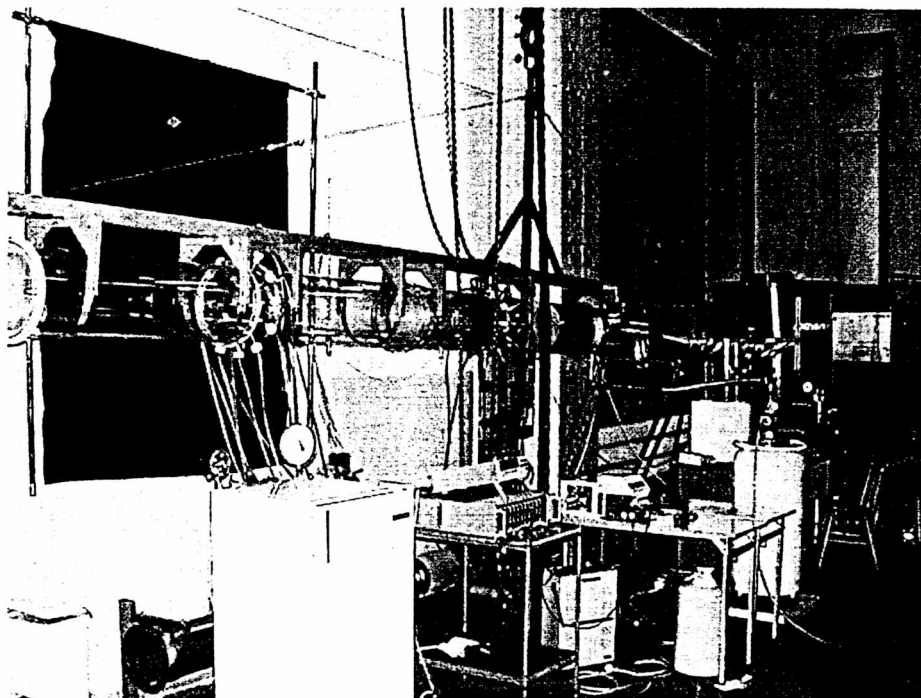
Badania przeprowadzono na specjalnie zbudowanym do tego celu stanowisku doświadczalnym. Schemat ogólny stanowiska przedstawiono na Rys. 5-17, natomiast jego widok na Rys. 5-18.



Rys. 5-17. Schemat stanowiska doświadczalnego do pomiarów przestrzennego wyznaczania rozkładu helu w kanale

Stanowisko to stanowiło część większego modelu tunelu akceleratora LHC w Genewie. Model ten miał za zadanie symulację warunków występujących w rzeczywistym obiekcie akceleratora. Tunel pomiarowy zbudowano ze skróconych ze sobą modułów wykonanych ze stali nierdzewnej oraz z pleksi o średnicy $D = 0,292$ m. Moduły mogły być łączone ze sobą w dowolnej kolejności w celu umożliwienia obserwacji przepływu. Tunel wyposażono w wentylator z regulatorem prędkości obrotowej wraz z układem pomiaru prędkości powietrza oraz prostownice strugi powietrza (w celu uzyskania równomiernego profilu prędkości). Długość modelu wynosiła $L = 9$ m, a zatem $L/D > 30$. Istniała również

możliwość ustawiania modelu tunelu pomiarowego pod różnym kątem. Umożliwiało to symulację różnych warunków przepływu występujących w rzeczywistych obiektach.



Rys. 5-18. Widok stanowiska pomiarowego, fot. W. Gizicki

Samo stanowisko badawcze obejmowało przedstawiony na rysunku fragment modelu. Składało się z układu zasilania ciekłym helem, ultradźwiękowego tomografu komputerowego, porównawczego układu pomiarowego udziału tlenu, układu pomiaru temperatury oraz kamery cyfrowej służącej do wizualizacji przepływu.

System zasilania ciekłym helem zbudowany był ze zbiornika z ciekłym helem (naczynie Dewara) wraz z kriostatem przepływowym i dyszą, przez którą następował wyrzut zimnego helu do tunelu. Ustalenie wartości strumienia przepływu wyrzucanego helu oraz jego parametrów termodynamicznych następowało poprzez zestaw wymiennych dysz o różnej średnicy oraz za pomocą regulatora temperatury współpracującego z czujnikiem temperatury i grzejnikami umieszczonymi wewnątrz kriostatu przepływowego. Zbiornik z helem ustawiony był na wadze elektronicznej w celu wyznaczenia strumienia masy wypływającego helu.

Ultradźwiękowy tomograf komputerowy składał się z obrotowej pomiarowej, zamontowanej bezpośrednio na tunelu, z układem 12 przetworników ultradźwiękowych, elektronicznej jednostki sterującej pracą tomografu, połączonej z komputerem klasy PC oraz z oscyloskopem. Układ ten był identyczny, z przedstawionym w rozdziale 5.3 i tam też znajduje się jego pełny opis.

Porównawczy układ pomiarowy procentowego udziału tlenu zbudowany był z listwy pomiarowej umieszczonej wewnątrz tunelu w pozycji pionowej. Na listwie zamontowano 12, równo rozłożonych na wysokości, końcówek węży zasysających próbki powietrza. Węże połączone zostały do zestawu pomiarowego składającego się z 12 tlenomierzy elektrolitycznych z tlenkiem cyrkonowym. Tlenomierze podłączono do wielokanałowego miernika uniwersalnego Keithley Model 2000, który przesyłał odczytane wartości pomiarowe do komputera za pomocą portu szeregowego RS232.

Układ pomiaru pionowego profilu temperatury w badanej przestrzeni zbudowany był również z pionowej listwy pomiarowej umieszczonej wewnątrz tunelu. Na listwie umieszczono zestaw 12 termopar miedź - konstantan rozłożonych równomiernie wzdłuż

średnicy rury. Wartości temperatur odczytywano za pomocą 12 kanałowego skanera temperatury Cole-Parmer Digi-Sence 92800-10. Skaner przesyłał dane pomiarowe do komputera za pomocą złącza RS232.

Zastosowane urządzenia pomiarowe - tomograf akustyczny, układ czujników mierzących udział tlenu metodą elektrochemiczną oraz układ termopar zamontowano za wylotem dyszy dostarczającej hel do kanału w odległości przekraczającej pięciokrotnie średnicę tunelu ($l > 5D$).

Do wizualizacji przepływu wykorzystano kamerę cyfrową SONY DRC-TRV 30E. Kamera współpracowała bezpośrednio z zainstalowanym na komputerze programem Pinnacle Studio 7. Do oświetlenia wizualizowanego obszaru tunelu pomiarowego zastosowano dwie lampy halogenowe o mocy 1 kW każda.

Procedura pomiarowa

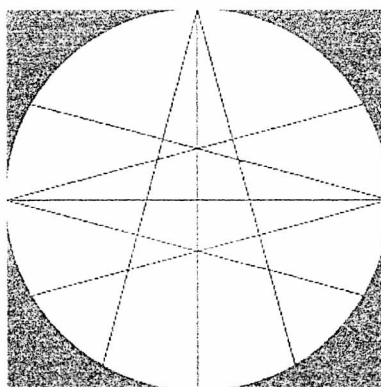
Eksperyment polegał na pomiarze metodą tomograficzną pola koncentracji tlenu w strudze mieszaniny powietrza z helem. Wielkością mierzoną bezpośrednio było pole prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w przekroju pomiarowym. Na jego podstawie możliwe było wyznaczenie pola koncentracji helu i związanego z nim tlenu.

W czasie przeprowadzania badań zmiennym był strumień przepływu powietrza (cztery wartości), symulujący różne warunki przewietrzania rzeczywistego tunelu akceleratora cząstek. Stałymi natomiast były strumień masy uwalnianego helu oraz stopień nachylenia kanału pomiarowego. Były to następujące wartości:

- prędkość powietrza $w_{\text{pow}} = 0; 0,5; 1$ oraz 2 m/s , co odpowiada strumieniom masy:
 $q_{\text{m_pow}} = 0; 0,04; 0,08; 0,16 \text{ kg/s}$
- strumień helu $q_{\text{m_He}} = 0,003 \text{ kg/s}$ (3 g/s)
- pochylenie: $+1,4 \%$

Początkowa temperatura wypływającego helu była stała i wynosiła 20 K . Hel wypływał przez dyszę o średnicy 3 mm . Czas wykonania jednego pomiaru wynosił 5 min ze względu na duże zużycie ciekłego helu.

W związku z ograniczonym czasem wykonania pojedynczego pomiaru, liczba użytych projekcji pomiarowych w układzie tomografu akustycznego została ograniczona do dziewięciu: trzech w pionie i sześciu w poziomie. Ograniczenie to zostało wymuszone względami technicznymi, spowodowanymi dość długim czasem wymaganym do przełączania pracy przetworników z trybu nadawczego na odbiorczy i na odwrót. Układ zastosowanych projekcji pomiarowych przedstawiono na Rys. 5-19.



Rys. 5-19. Schemat projekcji pomiarowych

W Tab. 5-4 pokazano rodzaj urządzeń pomiarowych wykorzystanych podczas przeprowadzania pomiarów oraz rodzaj odczytywanych za ich pomocą danych pomiarowych. Interpretacja danych zmierzonych za pomocą ogniw elektrochemicznych zaczerpnięta została z pozycji [61]. Poniżej podano także wartości parametrów charakteryzujących warunki zewnętrzne podczas eksperymentu

- temperatura: 293 K (20 °C),
- ciśnienie: 980 - 1020 hPa,
- wilgotność: 50 - 60 %.

Tab. 5-4. Urządzenia pomiarowe oraz mierzone za ich pomocą wartości

TOMOGRAF AKUSTYCZNY	- Pole prędkości dźwięku - Pole koncentracji helu i tlenu - Profil koncentracji tlenu na osi pionowej przekroju poprzecznego
OGNIWA ELEKTROCHEMICZNE	- Profil koncentracji tlenu na osi pionowej przekroju poprzecznego
ZESPÓŁ TERMOPAR	- Profil temperatury na osi pionowej przekroju poprzecznego

5.4.2. Wyniki pomiarów i ich analiza

Otrzymane, metodą tomograficzną, rekonstrukcje przekrojów dla wybranych przepływów mieszaniny helu z powietrzem zostały, w celu porównawczym, okrojone do profilu zrekonstruowanej prędkości dźwięku i koncentracji tlenu na linii pionowej średnicy kanału pomiarowego.

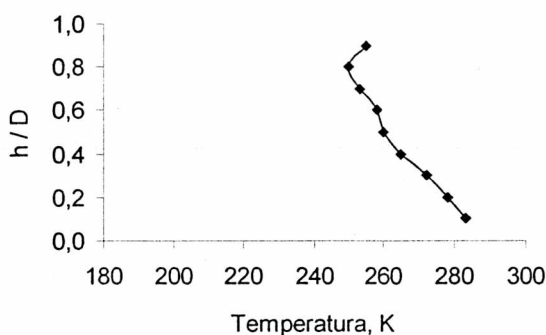
Dla każdego z pomiarów odczytano pole prędkości dźwięku oraz profil temperatury i koncentracji tlenu na linii pionowej średnicy kanału pomiarowego. Otrzymane w wyniku zastosowanej rekonstrukcji obrazu pole rozkładu prędkości dźwięku w całym przekroju pomiarowym dla każdego z przypadków przepływu ograniczono następnie do profilu prędkości na linii pionowej średnicy D obręczy pomiarowej (takiego samego jak dla profilu temperatury i porównawczego profilu koncentracji tlenu). Na podstawie - odczytanych, metodą ultradźwiękową, w każdym punkcie pionowego profilu - wartości prędkości oraz zmierzonej w tym punkcie temperatury obliczono udział helu w mieszaninie z powietrzem, a następnie udział samego tlenu. Zmierzony przy pomocy termopar profil temperatury, jak również zrekonstruowany na podstawie pomiaru tomograficznego profil prędkości dźwięku, otrzymany na ich podstawie profil koncentracji tlenu na linii pionowej średnicy kanału pomiarowego oraz podobny profil koncentracji tlenu zmierzony za pomocą ogniw elektrochemicznych [61] dla przypadku braku przepływu powietrza ($w_{pow} = 0$ m/s) przedstawiono na Rys. 5-20. Przedstawiony na tym rysunku profil prędkości dźwięku pokazano zarówno w postaci bezpośrednio zrekonstruowanej, jak również po wyeliminowaniu wpływu temperatury, a więc uzależniony już tylko od składu chemicznego powietrza. W tym celu prędkości dźwięku zostały przeliczone do stałej temperatury $T = 293$ K (20 °C) za pomocą równania (11). Dodatkowo wyniki pomiarów w postaci tabelarycznej przedstawiono w Tab. 5-5. Wszystkie wartości zarówno w tabeli, jak i na rysunkach podano w zależności od wysokości względnej h/D . Średnica tunelu D oraz wysokość h pokazano na Rys. 5-17.

Tab. 5-5. Wyniki pomiarów tomograficznych i porównawczych
 strumień masy helu $q_{m_He} = 0,003 \text{ kg/s}$,
 nachylenie tunelu $+1,4 \%$,
 prędkość powietrza $w_{pow} = 0 \text{ m/s}$

h/D	Tempera- tura	Prędkość dźwięku		Udział tlenu	
		rzeczy- wista	odniesiona do 293 K	tomo- graficznie	elektro- chemicznie
-	°C	m/s	m/s	%	%
0,9	-18	406	436	13	5
0,8	-23	411	445	12	4
0,7	-20	413	445	12	6
0,6	-15	407	433	13	9
0,5	-13	398	422	14	6
0,4	-8	393	413	14	14
0,3	-1	389	404	15	16
0,2	5	382	392	16	20
0,1	10	373	379	17	20

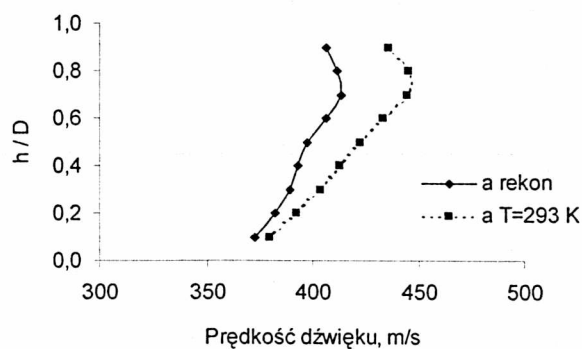
a)

Profil temperatury



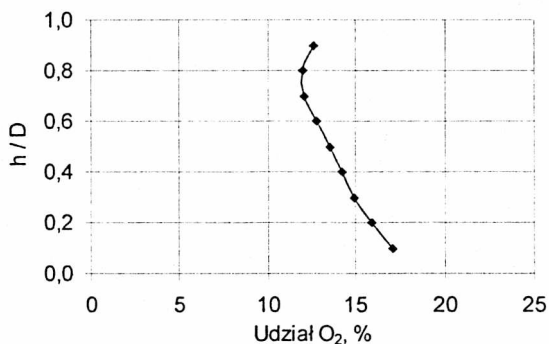
b)

Profil zrekonstruowanej prędkości

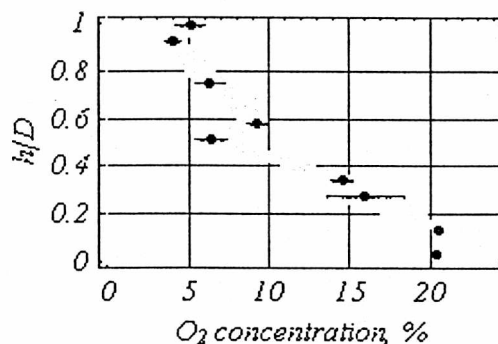


c)

Profil koncentracji tlenu



d)



**Rys. 5-20. Wyniki pomiaru - nachylenie tunelu $+1,4 \%$, strumień masy helu $q_{m_He} = 0,003 \text{ kg/s}$,
 prędkość przepływu powietrza $w_{pow} = 0 \text{ m/s}$.**

a) Profil temperatury

b) Profil prędkości dźwięku zrekonstruowany (a rekon)
 oraz po wyeliminowaniu wpływu temperatury (a T=20 °C)

c) Profil koncentracji tlenu wyznaczony tomograficznie,

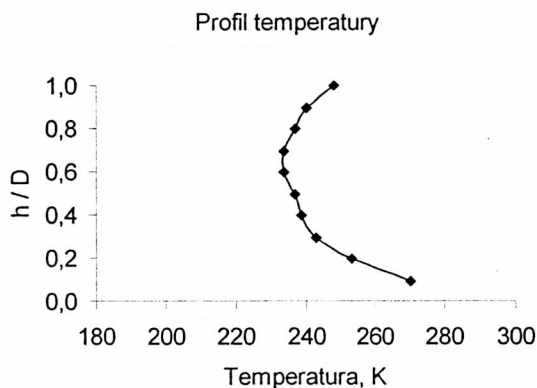
d) Profil koncentracje tlenu zmierzony za pomocą ogniw elektrochemicznych [61].

W podobny sposób profile temperatury, prędkości dźwięku oraz zmierzonej dwiema metodami koncentracji tlenu na linii pionowej średnicy kanału pomiarowego dla przypadku przepływu powietrza z prędkością $w_{\text{pow}} = 0,5 \text{ m/s}$ przedstawiono na Rys. 5-21. Wyniki pomiarów w postaci tabelarycznej przedstawione zostały w Tab. 5-6.

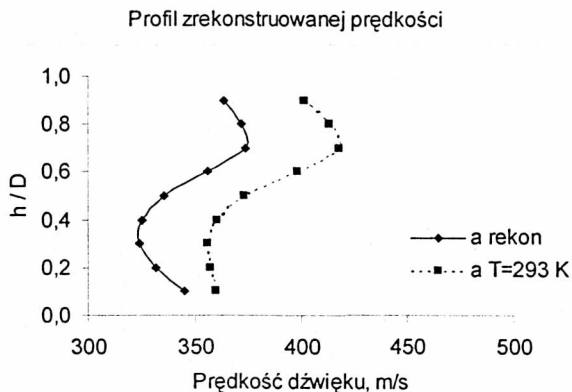
Tab. 5-6. Wyniki pomiarów tomograficznych i porównawczych
strumień masy helu $q_{m_{\text{He}}} = 0,003 \text{ kg/s}$,
nachylenie tunelu $+1,4 \%$,
prędkość powietrza $w_{\text{pow}} = 0,5 \text{ m/s}$

h/D	Tempera- tura	Prędkość dźwięku		Udział tlenu	
		rzeczy- wista	odniesiona do 293 K	tomo- graficznie	elektro- chemicznie
-	°C	m/s	m/s	%	%
0,9	-33	364	402	15	16
0,8	-36	371	413	14	11
0,7	-39	373	418	14	16
0,6	-39	356	398	15	13
0,5	-36	336	373	18	13
0,4	-34	326	361	19	11
0,3	-30	324	356	19	15
0,2	-20	332	357	19	17
0,1	-3	345	359	19	20

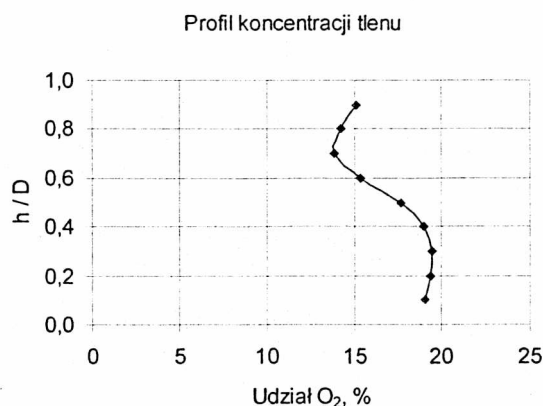
a)



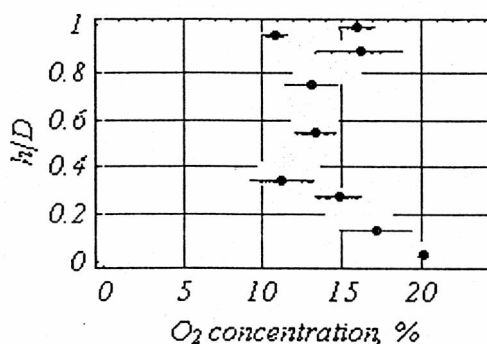
b)



c)



d)



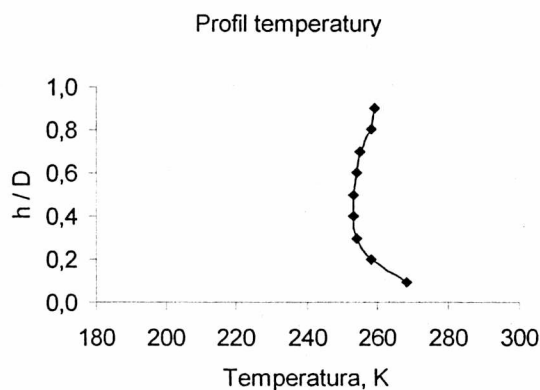
Rys. 5-21. Wyniki pomiaru - nachylenie tunelu $+1,4 \%$, strumień masy helu $q_{m_{\text{He}}} = 0,003 \text{ kg/s}$,
prędkość przepływu powietrza $w_{\text{pow}} = 0,5 \text{ m/s}$.

Wyniki pomiarów dla przepływu powietrza z prędkością $w_{\text{pow}} = 1 \text{ m/s}$ przedstawiono w podobny sposób na Rys. 5-22. Wyniki te w postaci tabelarycznej zestawiono w Tab. 5-7.

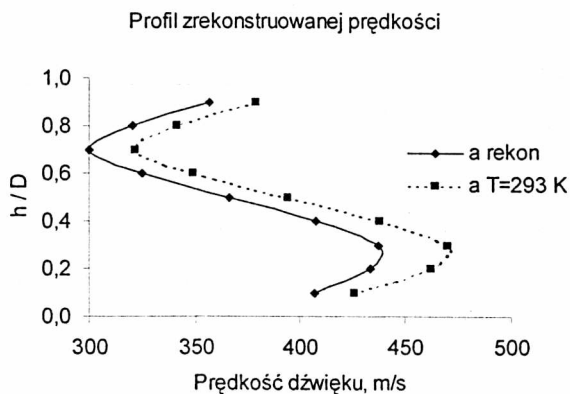
Tab. 5-7. Wyniki pomiarów tomograficznych i porównawczych
 strumień masy helu $q_{m,\text{He}} = 0,003 \text{ kg/s}$,
 nachylenie tunelu $+1,4 \%$,
 prędkość powietrza $w_{\text{pow}} = 1 \text{ m/s}$

h/D	Tempera- tura	Prędkość dźwięku		Udział tlenu	
		rzeczy- wista	odniesiona do 293 K	tomo- graficznie	elektro- chemicznie
-	°C	m/s	m/s	%	%
0,9	-14	356	379	17	20
0,8	-15	321	342	21	19
0,7	-18	300	322	21	21
0,6	-19	325	349	20	19
0,5	-20	366	394	16	15
0,4	-20	407	438	12	16
0,3	-19	437	470	11	17
0,2	-15	434	462	11	19
0,1	-5	407	426	13	20

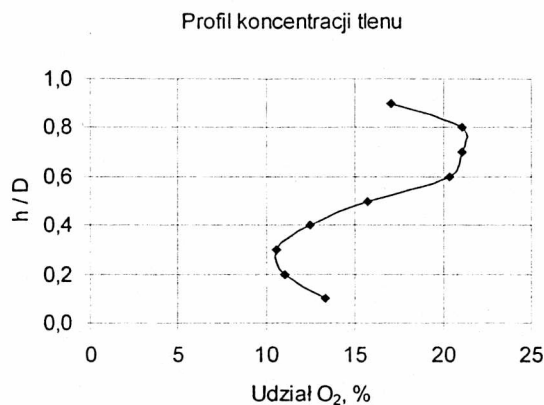
a)



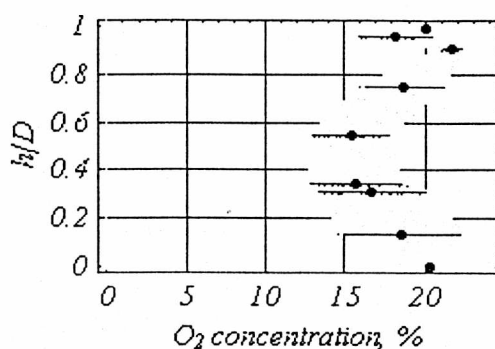
b)



c)



d)



Rys. 5-22. Wyniki pomiaru - nachylenie tunelu $+1,4 \%$, strumień masy helu $q_{m,\text{He}} = 0,003 \text{ kg/s}$, prędkość przepływu powietrza $w_{\text{pow}} = 1 \text{ m/s}$.

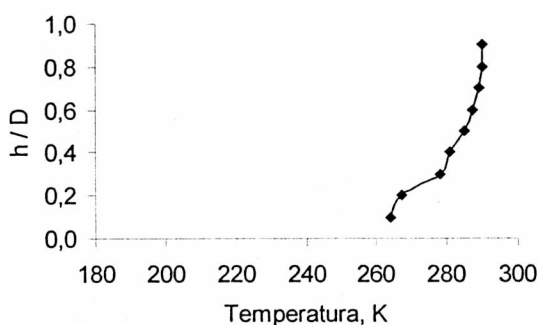
Wyniki pomiarów dla ostatniego z przypadków prędkości przepływu powietrza wynoszącego $w_{\text{pow}} = 2 \text{ m/s}$ przedstawiono na Rys. 5-23. Tabelaryczne zestawienie otrzymanych wyników dla tego przypadku przedstawiono w Tab. 5-8.

Tab. 5-8. Wyniki pomiarów tomograficznych i porównawczych
strumień masy helu $q_{m_{\text{He}}} = 0,003 \text{ kg/s}$,
nachylenie tunelu $+1,4 \%$,
prędkość powietrza $w_{\text{pow}} = 2 \text{ m/s}$

h/D	Tempera- tura	Prędkość dźwięku		Udział tlenu	
		rzeczy- wista	odniesiona do 293 K	tomo- graficznie	elektro- chemicznie
-	°C	m/s	m/s	%	%
0,9	17	353	355	20	20
0,8	17	341	342	21	20
0,7	16	334	337	21	21
0,6	14	347	351	20	20
0,5	12	363	368	18	18
0,4	8	362	369	18	14
0,3	5	355	365	18	13
0,2	-6	359	376	17	15
0,1	-9	370	390	16	18

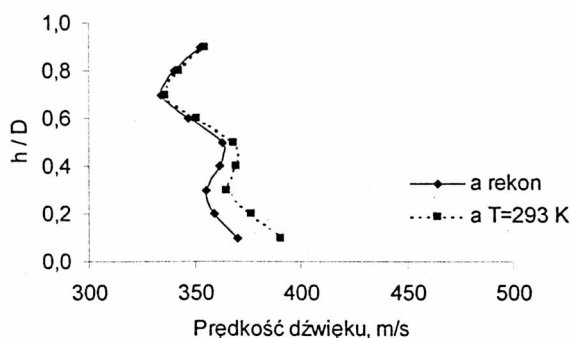
a)

Profil temperatury



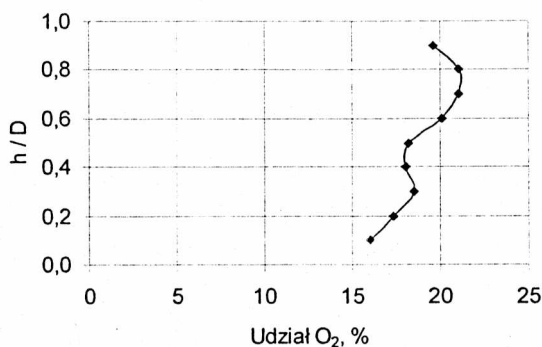
b)

Profil zrekonstruowanej prędkości

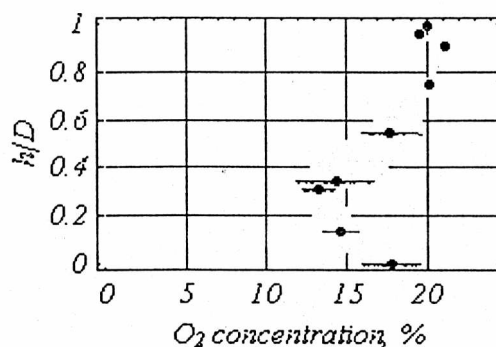


c)

Profil koncentracji tlenu



d)



Rys. 5-23. Wyniki pomiaru - nachylenie tunelu $+1,4 \%$, strumień masy helu $q_{m_{\text{He}}} = 0,003 \text{ kg/s}$,
prędkość przepływu powietrza $w_{\text{pow}} = 2 \text{ m/s}$.

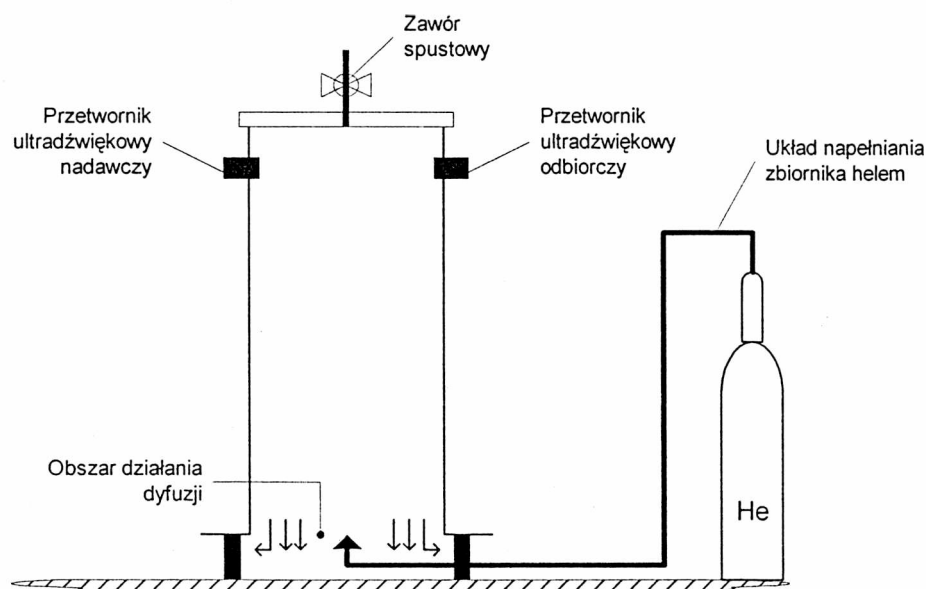
Przeprowadzone pomiary wykazały dobrą jakościową zgodność otrzymanych metodą ultradźwiękową profili koncentracji tlenu w tunelu pomiarowym w stosunku do referencyjnego pomiaru za pomocą klasycznych ogniów elektrochemicznych. Istniejące odstępstwa ilościowe można wytłumaczyć ograniczoną, z powodów technicznych, ilością projekcji pomiarowych. Opracowanie bardziej zaawansowanego technicznie urządzenia wykorzystującego pełen zakres projekcji pozwoli na zwiększenie dokładności rekonstruowanych profili koncentracji tlenu w atmosferze znajdującej się w badanym obszarze.

5.5. Pomiary porównawcze szybkości dyfuzji helu metodą ultradźwiękową i elektrochemiczną

W celu doświadczalnego sprawdzenia możliwości zastosowania proponowanej metody do pomiarów szybkości dyfuzji wybranego gazu, przeprowadzono badania porównawcze w odniesieniu do klasycznej metody pomiaru udziału tlenu za pomocą ogniw elektrochemicznych. Szybkość dyfuzji jest tutaj rozumiana jako szybkość zmiany stężenia jednego gazu w drugim następująca w wyniku procesu dyfuzyjnego wymieszania.

Stanowisko badawcze i procedura pomiarowa

W skład układu pomiarowego wchodził zbiornik zbudowany z przezroczystej rury z tworzywa sztucznego, zamkniętej od góry pokrywą z uszczelnieniem typu o-ring. Zbiornik był otwarty ku dołowi i ustawiony został na podpórkach, aby umożliwić swobodny dostęp powietrza. Pokrywa górna posiadała otwór z zamontowanym zaworem kulowym, umożliwiającym otworenie lub odcięcie przepływu gazu. W górnej części pionowych ścian zbiornika, na przeciwnych stronach zamontowano parę przetworników ultradźwiękowych (jeden nadawczy, a drugi odbiorczy), stanowiących część ultradźwiękowego systemu pomiarowego. Przetworniki umiejscowiono w odległości 0,96 m od dolnego, otwartego, krańca zbiornika i jednocześnie bezpośrednio pod pokrywą górną. Zbiornik wyposażono w układ napelniania heliem z butli. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na Rys. 5-24.



Rys. 5-24. Schemat stanowiska pomiarowego do pomiaru szybkości dyfuzji

Zastosowano ultradźwiękowy system pomiarowy identyczny z tym, jaki użyto podczas badań wstępnych. Opis jego budowy zamieszczono w rozdziale 5.2. Składał się z dwóch przetworników piezoelektrycznych połączonych z elektronicznym układem sterującym i z oscyloskopem. Jednostka sterująca wysyłała sygnał pobudzający pracę przetwornika nadawczego i odbierała sygnał odpowiedzi z przetwornika odbiorczego. Sygnał ten był następnie odpowiednio wzmacniany i na jego podstawie obliczano prędkość propagacji fali akustycznej. Wynik pomiaru pokazywał wbudowany wyświetlacz LCD. Dodatkowo, zarówno wysyłany sygnał pobudzenia, jak i odebrany sygnał odpowiedzi przekazywano na wejście oscyloskopu dwukanałowego.

Aby przeprowadzić pomiar szybkości dyfuzji całkowicie napełniano zbiornik helem. W tym celu otwierano najpierw zawór spustowy, a następnie poprzez układ napełniania wpuszczano do zbiornika gazowy hel. Za pomocą ultradźwiękowego systemu pomiarowego mierzono czas przelotu fali ultradźwiękowej i na jego podstawie obliczano prędkość fali w ośrodku. Po ustabilizowaniu się wartości prędkości na poziomie wskazującym obecność czystego helu zamykano zawór spustowy i następnie, po upływie chwili, odcinano dopływ helu poprzez układ napełniania. W tym momencie zaczynał się pomiar. Czas przelotu fali ultradźwiękowej odczytywano co 10 minut i na jego podstawie obliczano udział helu w powietrzu w obszarze na wysokości zamontowanych przetworników ultradźwiękowych. Całkowity czas trwania pojedynczego pomiaru wynosił 3 godziny.

W celu weryfikacji otrzymanych wyników pomiarowych przeprowadzono numeryczną symulację szybkości dyfuzji helu do powietrza na podstawie rozwiązania równania dyfuzji dla przypadku jednowymiarowego (wynikającego z II prawa Ficka) w postaci

$$\frac{\partial z_{He}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 z_{He}}{\partial x^2} \quad (40)$$

przy następujących warunkach brzegowych

$$\left. \frac{\partial z_{He}}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad - \text{z jednej strony zbiornik jest zamknięty, czyli przy ścianie nie ma gradientu stężenia helu}$$

$$z_{He} \Big|_{x=0} = 0 \quad - \text{z drugiej strony zbiornik jest otwarty i hel dyfunduje do nieskończonej objętości powietrza (zerowy udział helu zaraz za otwartym końcem zbiornika)}$$

gdzie:

z_{He} - objętościowy udział helu w powietrzu, mol/mol,

t - czas, s,

D - kinematyczny współczynnik dyfuzji helu do powietrza, $D = 0,624 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ [87],

L - długość zbiornika, m,

x - współrzędna przestrzenna zorientowana wzdłuż osi zbiornika, $x = 0$ dla końca otwartego oraz $x = L$ dla końca zamkniętego.

Dodatkowo przeprowadzono badania porównawcze pomiaru szybkości dyfuzji w takich samych warunkach, ale przy pomocy czujników elektrochemicznych. Stanowisko pomiarowe było identyczne z pokazanym na Rys. 5-24, tylko w miejsce przetworników ultradźwiękowych zostały zamontowane ogniwa elektrochemiczne do pomiaru udziału tlenu. Na podstawie tego pomiaru obliczano udział helu w powietrzu.

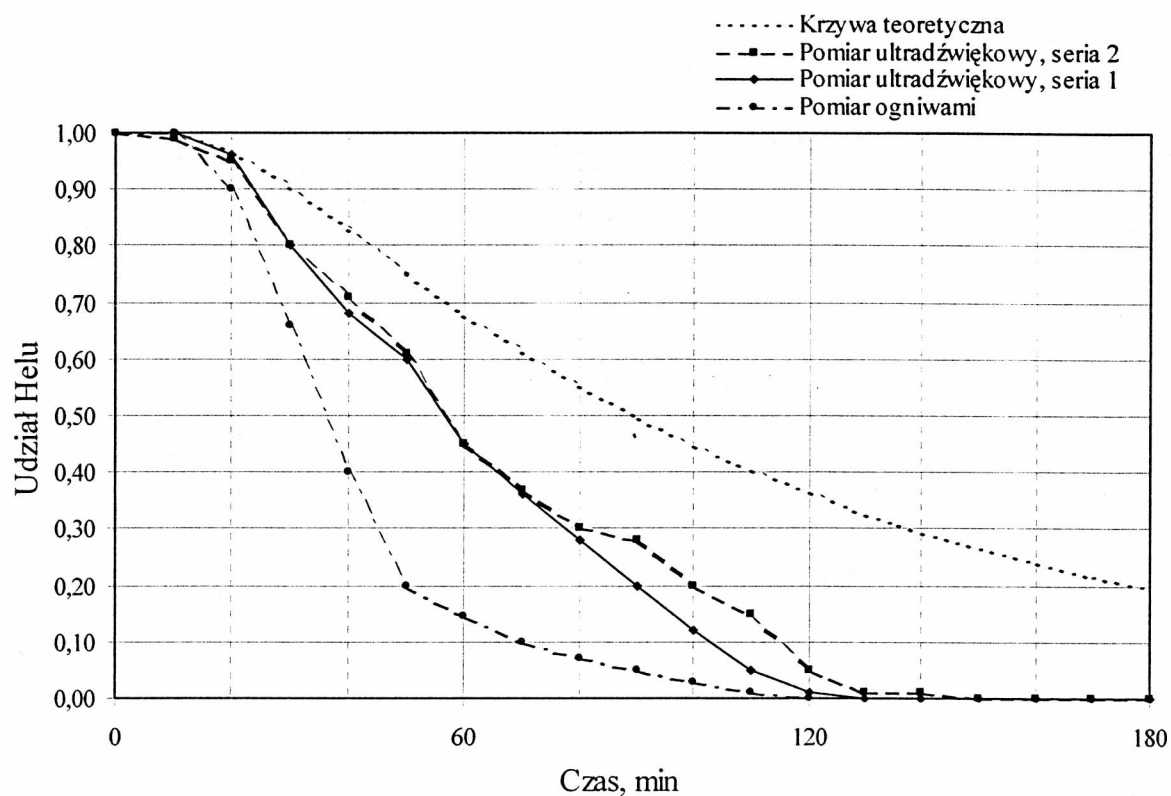
Wyniki pomiarów porównawczych i ich analiza

W wyniku przeprowadzonych pomiarów szybkości dyfuzji helu do powietrza przy wykorzystaniu techniki ultradźwiękowej oraz klasycznych ogniów elektrochemicznych, jak również wykonanej symulacji numerycznej, otrzymano wyniki przedstawione w Tab. 5-9.

Tab. 5-9. Wyniki pomiarów szybkości dyfuzji

Czas	Udział helu w powietrzu na wysokości układu pomiarowego			
	Teoretyczny	Metoda ultradźwiękowa seria I	Metoda ultradźwiękowa seria II	Ogniwa elektro- chemiczne
min	mol / mol	mol / mol	mol / mol	mol / mol
0	1,00	1,00	1,00	1,00
10	1,00	1,00	0,99	1,00
20	0,97	0,96	0,95	0,90
30	0,91	0,80	0,80	0,66
40	0,83	0,68	0,71	0,40
50	0,75	0,60	0,61	0,20
60	0,68	0,45	0,45	0,14
70	0,61	0,36	0,37	0,10
80	0,55	0,28	0,30	0,07
90	0,50	0,20	0,28	0,05
100	0,45	0,12	0,20	0,03
110	0,40	0,05	0,15	0,01
120	0,36	0,01	0,05	0,00
130	0,33	0,00	0,01	0,00
140	0,30	0,00	0,01	0,00
150	0,27	0,00	0,00	0,00
160	0,24	0,00	0,00	0,00
170	0,22	0,00	0,00	0,00
180	0,19	0,00	0,00	0,00

Na Rys. 5-25 przedstawiono graficzne porównanie otrzymanych wartości pomiarowych. Udział helu reprezentuje molowy udział tego gazu w powietrzu na wysokości zamontowanych urządzeń pomiarowych, czyli pod górną pokrywą zbiornika.



Rys. 5-25. Krzywe szybkości dyfuzji

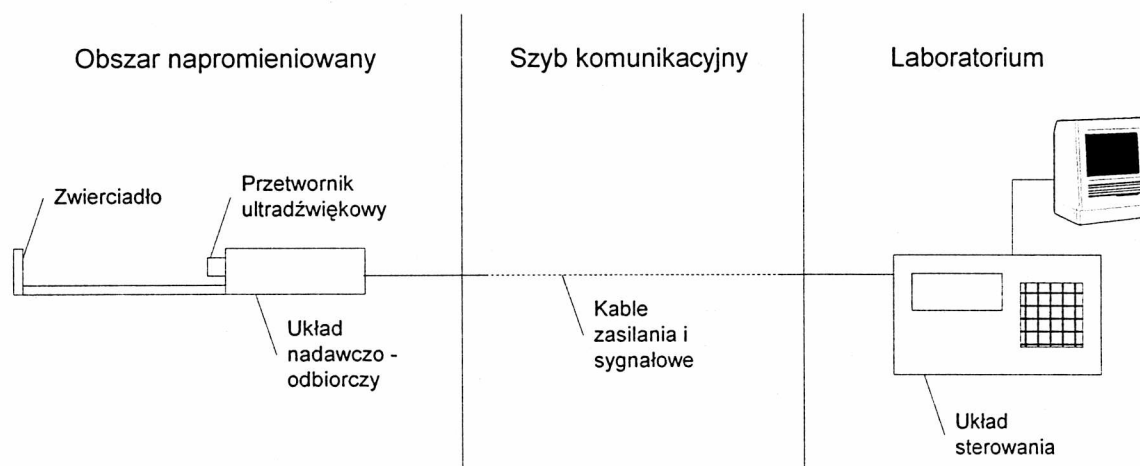
Wyniki porównawczych pomiarów szybkości dyfuzji helu i powietrza wskazują na dużo wyższą przydatność metody ultradźwiękowej, w stosunku do wykorzystania standardowych ogniw elektrochemicznych. Głównym powodem takiego stanu rzeczy jest nieinwazyjność metody ultradźwiękowej, która nie powoduje zaburzeń w składzie czynnika w badanej objętości pomiarowej. Takie zaburzenia powoduje natomiast użycie klasycznej metody pomiarowej, opartej na ogniwach elektrochemicznych, które wymagają zassania pewnej objętości czynnika. Drugą ważną zaletą metody ultradźwiękowej, w przeciwieństwie do klasycznej, jest duża szybkość pomiaru, umożliwiającą jego przeprowadzanie w czasie rzeczywistym.

5.6. Badania odporności ultradźwiękowego układu pomiarowego na promieniowanie jonizujące

W celu sprawdzenia możliwości wykorzystania opisywanej techniki pomiarowej w dużych instalacjach kriogenicznych, takich jak akceleratory cząstek, przeprowadzono badania trwałości urządzenia pomiarowego, będącego pod działaniem promieniowania jonizacyjnego. Testy te wykonano w laboratoriach Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN w Genewie. Eksperyment miał na celu zbadanie wpływu długotrwałego przebywania w środowisku radiacyjnym na trwałość piezoceramicznych przetworników ultradźwiękowych i zastosowanego układu elektroniki. Test polegał na zainstalowaniu i uruchomieniu dwóch systemów pomiarowych, a następnie na regularnym sprawdzaniu prawidłowości pracy urządzeń pomiarowych aż do ich uszkodzenia przez promieniowanie jonizujące. Badania te wykonano w laboratorium badawczym wpływu promieniowania jonizującego TCC2, będącego częścią składową akceleratora SPS (Super Proton Synchrotron).

5.6.1. Stanowisko badawcze

Do badań zaprojektowano specjalny układ pomiarowy przedstawiony na Rys. 5-26.



Rys. 5-26. Schemat układu pomiarowego podczas testów odporności na promieniowanie

Układ ten składał się z trzech części.

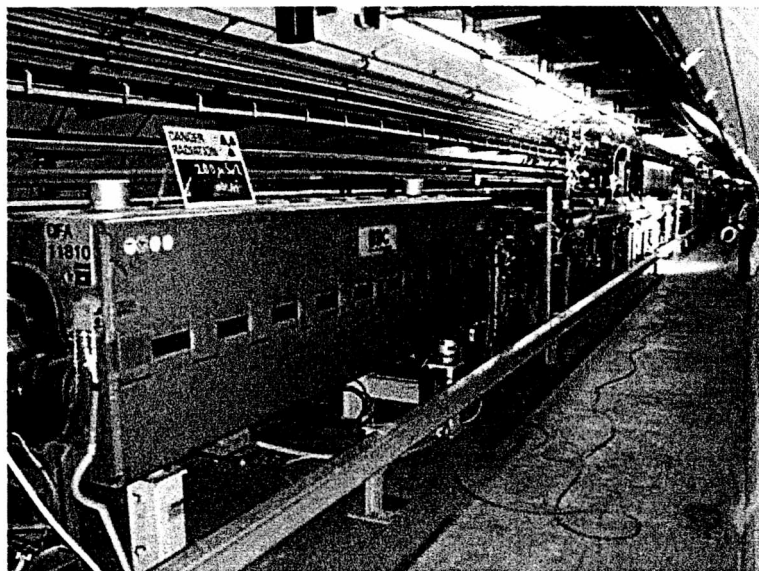
Pierwsza część, pomiarowa, mieściła się bezpośrednio wewnątrz tunelu akceleratora w obszarze będącym pod wpływem promieniowania jonizującego (Rys. 5-27). Zainstalowane tam zostało urządzenie do pomiaru prędkości dźwięku.

Druga część, kable zasilające i sygnałowe, mieściła się w szybie komunikacyjnym, łączącym tunel akceleratora z pomieszczeniami na powierzchni Ziemi.

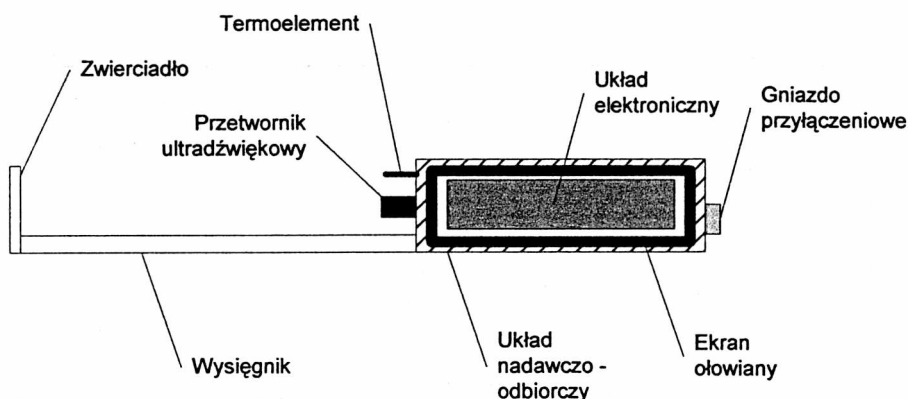
Trzecia część układu, mikroprocesorowy sterownik pracy miernika prędkości dźwięku, umieszczono w laboratorium w części naziemnej akceleratora. Urządzenie wyzwało pomiary, odczytywało wyniki i przekazywało je do komputera klasy PC.

Urządzenie do pomiaru prędkości dźwięku, mieszczące się w strefie napromieniowanej, zbudowano z układu elektronicznego, współpracującego z dwoma piezoceramicznymi przetwornikami ultradźwiękowymi, pracującymi przy częstotliwości rezonansowej 108,5 kHz oraz z termorezystorem Ni 160. Jeden przetwornik pracował jako nadajnik, a drugi jako odbiornik fali ultradźwiękowej. Układ elektroniczny umieszczono w ekranie składającym się z 12 warstw jednomilimetrowej blachy ołowianej o łącznej grubości

12 mm. Całość układu zamknięto w prostokątnej, aluminiowej obudowie. Z obudowy wyprowadzono na zewnątrz końcówkę termoelementu oraz przetworniki wycelowane w kierunku zwierciadła umieszczonego na wysięgniku. Schemat i wygląd urządzenia pokazano na Rys. 5-28 i Rys. 5-29.



Rys. 5-27. Widok wnętrza tunelu akceleratora, fot. CERN

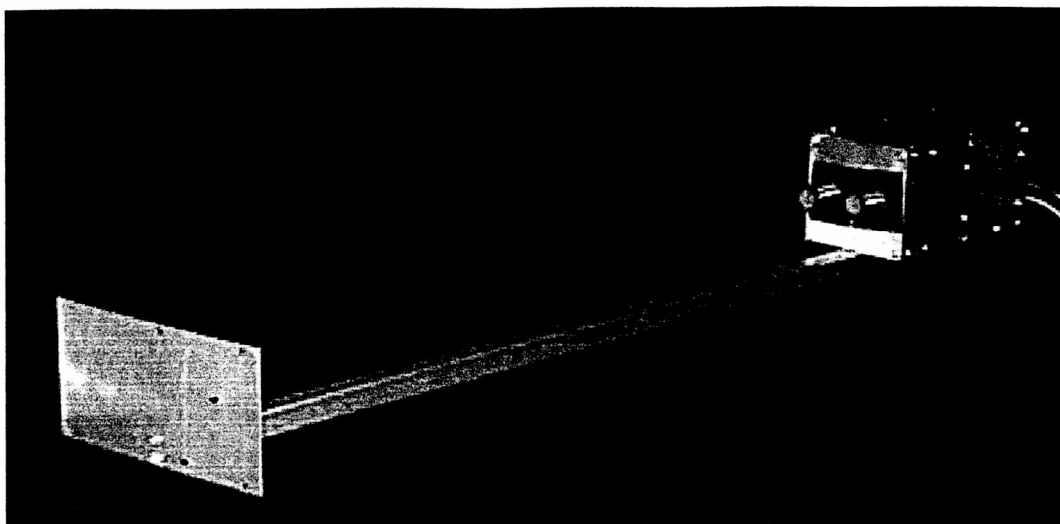


Rys. 5-28. Schemat urządzenia do pomiaru prędkości dźwięku umieszczonego w strefie napromieniowanej

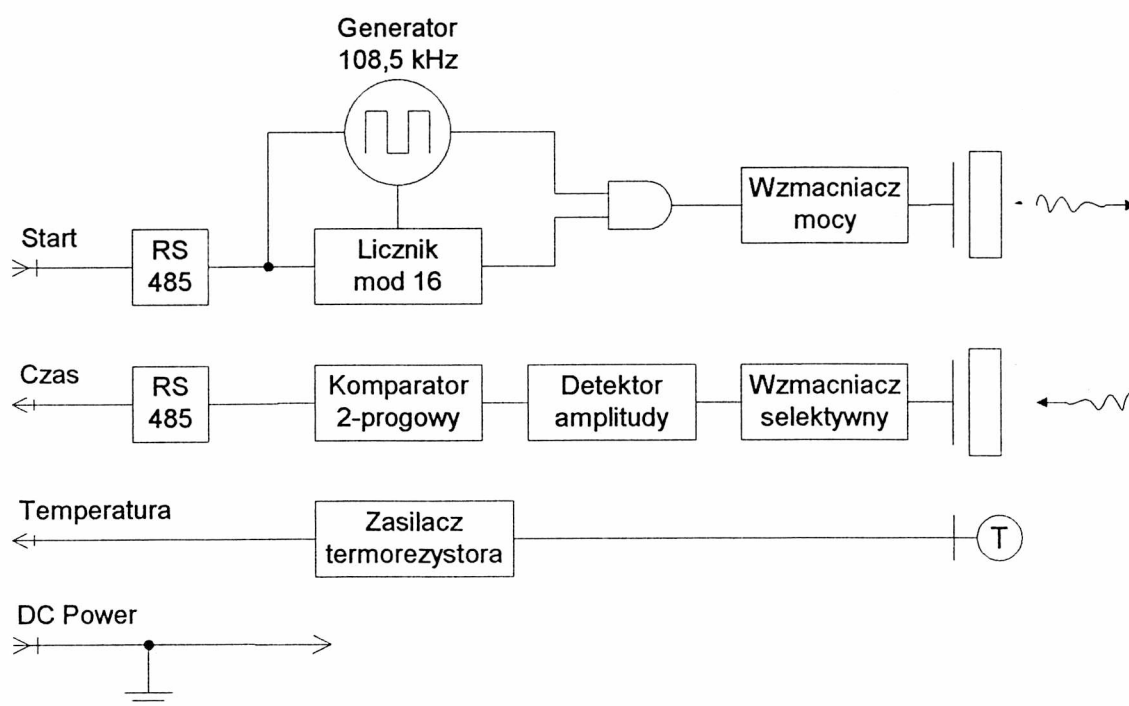
Układ elektroniczny miał za zadanie, po wyzwoleniu pomiaru poprzez urządzenie sterujące w laboratorium na powierzchni Ziemi, wysłać paczkę falową za pomocą przetwornika nadawczego i za pomocą przetwornika odbiorczego odebrać sygnał odbity od zwierciadła. Sygnał odebrany, po odpowiednim przetworzeniu, był wysyłany z powrotem do urządzenia sterującego w celu wyznaczenia czasu propagacji fali po znanej drodze. Dodatkowo układ mierzył temperaturę powietrza w obszarze rozprzestrzeniania się fali ultradźwiękowej.

Układ elektroniczny po stronie nadawczej składał się z generatora częstotliwości stabilizowanej kwarem, licznika modulo 16, bramki logicznej oraz wzmacniacza mocy wyjściowej sygnału elektrycznego. Po stronie odbiorczej zaś ze wzmacniacza selektywnego, detektora amplitudy oraz komparatora 2-progowego. Komunikacja układu z urządzeniem sterującym odbywała się za pomocą portu RS 485 stanowiącego pętlę prądową (4 - 20 mA),

uodparniającą przesyłane sygnały na zakłócenia EM. Schemat blokowy układu przedstawiono na Rys. 5-30.



Rys. 5-29. Wygląd zewnętrzny urządzenia do pomiaru prędkości dźwięku, fot. W. Gizicki



Rys. 5-30. Schemat blokowy układu elektronicznego do pomiaru prędkości dźwięku w strefie napromieniowanej

Urządzenie sterujące, mieszczące się w laboratorium przedstawiono na Rys. 5-31. Urządzenie to podłączono do komputera, zawiadującego częstotliwością pomiarów i zapisującego wyniki pomiarowe.

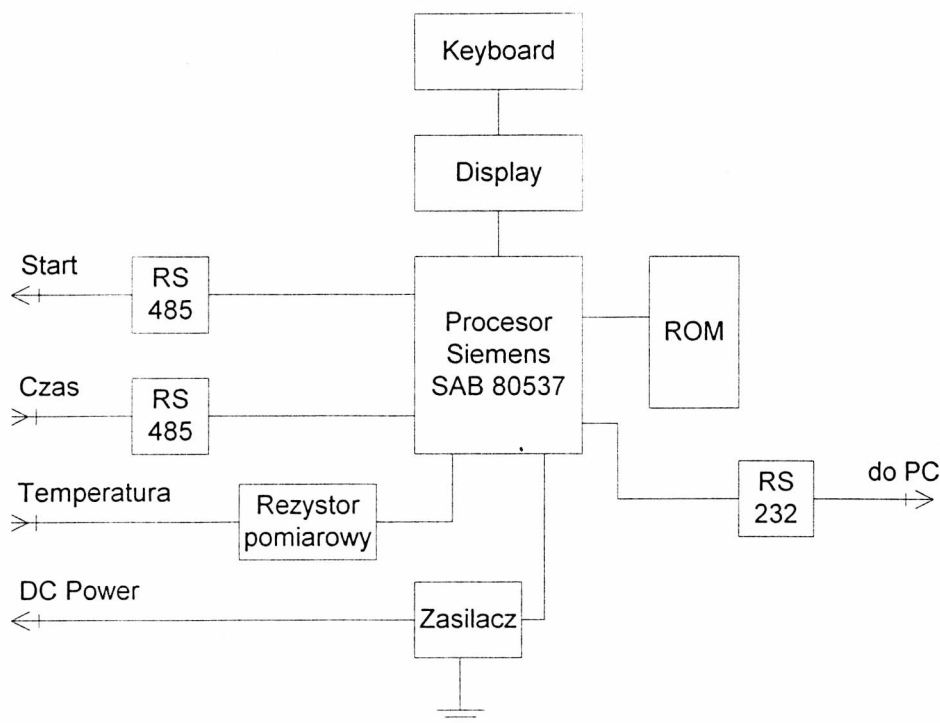


Rys. 5-31. Układ sterowania i akwizycji danych, fot. W. Gizicki

Układ elektroniczny urządzenia sterującego zbudowany był z mikroprocesora SIMENS SAB 80537, układu pamięci ROM, wyświetlacza ciekłokrystalicznego, klawiatury, portów komunikacji z urządzeniem pomiarowym (RS 485) i komputerem (RS 232) oraz zasilacza. Schemat blokowy układu przedstawiono na Rys. 5-32.

W pamięci mikroprocesora (E-PROM) został zainstalowany specjalny program do wyzwalania pomiarów w określonym przedziale czasowym oraz wstępnej obróbki wyników. Po wyzwoleniu pomiaru mikroprocesor wysyłał sygnał START do urządzenia pomiarowego umieszczonego w tunelu akceleratora. W urządzeniu pomiarowym stabilizowany kwarcowo generator wraz z licznikiem generował paczkę falową (burst) składającą się z 16 impulsów prostokątnych o częstotliwości 108,5 kHz. Każdy impuls o okresie $9,2 \cdot 10^{-6}$ s ($9,2 \mu\text{s}$) miał amplitudę całkowitą (międzyszczytową) 300 V bez składowej stałej. Amplituda była symetryczna, aby uniknąć stałych naprężeń wstępnych kryształu nadajnika. Sygnał ten był następnie wzmacniany i kierowany do przetwornika piezokrystalicznego, gdzie generowana była fala ultradźwiękowa. Moc szczytowa pobudzenia wynosiła 40 W, przy impedancji kryształu nadajnika 300Ω (dla częstotliwości rezonansowej 108,5 kHz). Fala ultradźwiękowa, po odbiciu od zwierciadła, trafiała do przetwornika odbiorczego, w którym zamieniana była z powrotem na sygnał elektryczny. Sygnał ten następnie był wzmacniany we wzmacniaczu selektywnym o częstotliwości środkowej 108,5 kHz i szerokości pasma 2 kHz (dla spadków na końcach przedziału -3 dB). Współczynnik wzmocnienia wynosił około 100 dB (tj. około $100\,000 \text{ V/V}$). Sygnał odbiorczy trafiał następnie do detektora amplitudy i do komparatora 2-progowego, który odczytywał dwa punkty na krzywej narostu amplitudy sygnału. Oba sygnały wyjściowe komparatora były następnie wysyłane z powrotem do mikroprocesora w urządzeniu sterującym.

Cała operacja wyzwalania pomiaru i odczytania odpowiedzi była powtarzana 100 razy i następnie mikroprocesor korzystając z zapisanego w pamięci E-PROM algorytmu obliczał średnie czasy odpowiedzi z wszystkich pomiarów i na ich podstawie aproksymował dokładny czas przelotu fali ultradźwiękowej pomiędzy przetwornikami. Aproksymacja była dokonywana ze względu na występującą inercję piezokryształów przetworników.



Rys. 5-32. Schemat blokowy układu elektronicznego urządzenia sterującego pomiarami

Zmierzony w ten sposób czas propagacji był uzależniony od szukanego składu chemicznego powietrza, ale też i od temperatury. W celu wyeliminowania jej wpływu dodatkowo zainstalowano termorezystor mierzący temperaturę w przestrzeni propagacji fali ultradźwiękowej. Otrzymany czas propagacji w związku z tym przeliczany był na czas propagacji dla przyjętej temperatury bazowej $T_0 = 289 \text{ K}$ ($16 \text{ }^\circ\text{C}$) zgodnie ze wzorem

$$t_0 = t \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (41)$$

gdzie:

- t_0 - czas propagacji w temperaturze bazowej, s,
- t - rzeczywisty zmierzony czas propagacji, s,
- T - zmierzona temperatura, K,
- T_0 - temperatura bazowa, K.

Uzyskane dane pomiarowe - czas propagacji (dla temperatury bazowej) i temperatura prezentowano na wyświetlaczu LCD i przesyłano do komputera w celu ich archiwizacji. Widok ogólny urządzeń sterujących pomiarami i prowadzących akwizycję uzyskanych wyników, mieszczących się w laboratorium w części naziemnej akceleratora, pokazano na Rys. 5-33.



Rys. 5-33. Widok ogólny stanowiska pomiarowego w części naziemnej akceleratora, fot. W. Gizicki

5.6.2. Wyniki badań wpływu promieniowania jonizacyjnego na układ pomiarowy i ich analiza

Badania rozpoczęły się 21 maja 2003 roku i trwały do listopada 2003 roku, kiedy oba systemy przestały już funkcjonować. Użyto do nich dwóch identycznych, opisanych wyżej zestawów pomiarowych. Jeden z nich pracował w trybie aktywnym, tj. automatycznie w sposób ciągły wyzwał pomiar i zapisywał wyniki co 15 min. Drugi zestaw pracował w trybie pasywnym, tj. zostawał ręcznie włączany i wykonywał pomiar tylko raz w tygodniu. Rozgraniczenie takie podyktowane było warunkami pracy akceleratora, w których raz w tygodniu był dostęp obsługi technicznej i właściwie tylko wtedy istniała konieczność monitorowania składu atmosfery w kanale. Wyniki pomiarów odczytywanych cotygodniowo przy użyciu systemu pasywnego przedstawiono w Tab. 5-10. Poszczególne kolumny w tabeli oznaczają odpowiednio:

Data	- Data (dzień i miesiąc 2003 roku) wykonania pomiaru;
Czas	- Czas (w dniach) od początku zainstalowania systemu i rozpoczęcia badań do chwili pomiaru;
Czas propagacji	- Czas (w milisekundach) propagacji fali ultradźwiękowej pomiędzy przetwornikiem nadawczym i odbiorczym;
Temperatura	- Temperatura (w °C) powietrza w obszarze propagacji fali ultradźwiękowej zmierzona termorezystorem;
Czas propagacji (po kompensacji temperatury)	- Czas (w milisekundach) propagacji fali ultradźwiękowej pomiędzy przetwornikiem nadawczym i odbiorczym, po przeliczeniu do temperatury bazowej $T = 289 \text{ K}$ (16 °C);
Prędkość dźwięku (po kompensacji temperatury)	- Prędkość (w m/s) propagacji fali ultradźwiękowej po przeliczeniu do temperatury bazowej $T = 289 \text{ K}$ (16 °C);

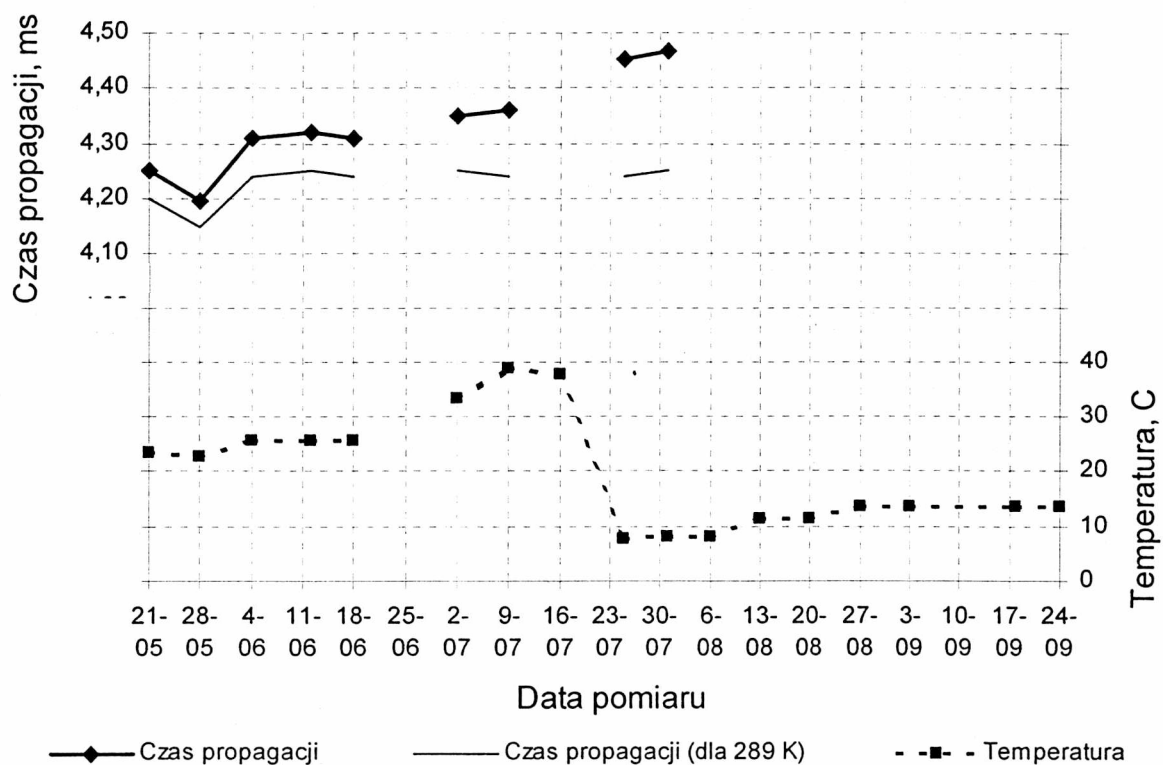
Tab. 5-10. Wyniki pomiarów czasu propagacji i temperatury przy użyciu pasywnego zestawu pomiarowego

Data	Czas	Czas propagacji	Temperatura	Czas propagacji (po kompensacji temperatury)	Prędkość dźwięku (po kompensacji temperatury)
	dni	ms	°C	ms	m/s
21-05	0	4,27	25,2	4,20	333
28-05	7	4,21	25,1	4,15	337
4-06	14	4,31	25,6	4,24	330
12-06	22	4,30	22,3	4,25	329
18-06	28	4,31	25,3	4,24	330
25-06	35	-	-	-	-
2-07	42	4,39	35,5	4,25	329
9-07	49	4,42	40,7	4,24	330
16-07	56	-	34,7	-	-
25-07	65	4,18	7,8	4,24	330
31-07	71	4,19	8,1	4,25	329
6-08	77	-	8,1	-	-
13-08	84	-	11,2	-	-
20-08	91	-	11,2	-	-
27-08	98	-	13,4	-	-
3-09	105	-	13,4	-	-
18-09	120	-	13,4	-	-
24-09	126	-	13,4	-	-

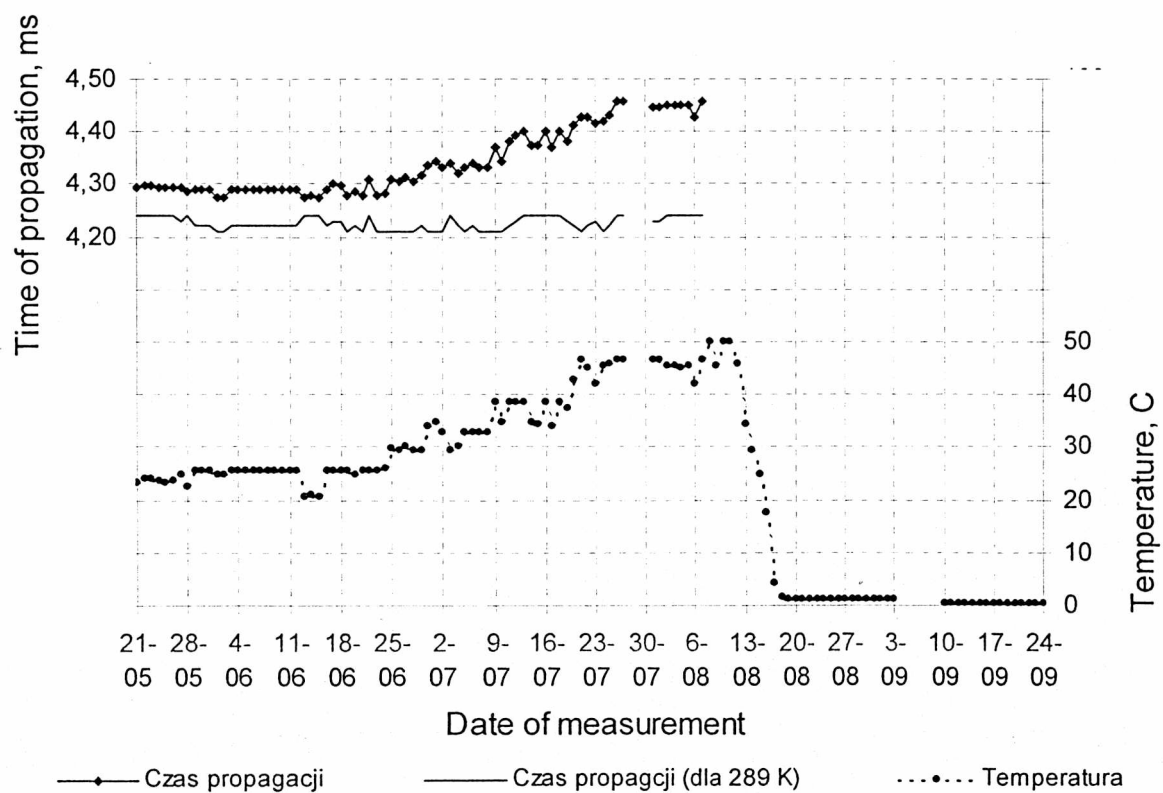
Wykres wartości czasu propagacji, odczytanej temperatury oraz dodatkowo czasu propagacji przeliczonego dla stałej temperatury $T = 289 \text{ K}$ (16 °C) w zależności od czasu działania systemu pomiarowego przedstawiono na Rys. 5-34

W podobny sposób przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzanych w trybie ciągłym z zastosowaniem systemu aktywnego. Wykres wartości czasów propagacji (zmierzonego oraz przeliczonego dla stałej temperatury $T = 289 \text{ K}$), jak również odczytanej temperatury w zależności od czasu działania systemu aktywnego pokazano na Rys. 5-35. Wyniki te przedstawiono również w tabeli zamieszczonej na końcu pracy w dodatku B. W zestawieniu tym przedstawiono średni wynik, z odczytywanych co 15 minut pomiarów, na dany dzień. Oznaczenia kolumn w tabeli są identyczne jak w objaśnionych oznaczeniach z tabeli poprzedniej.

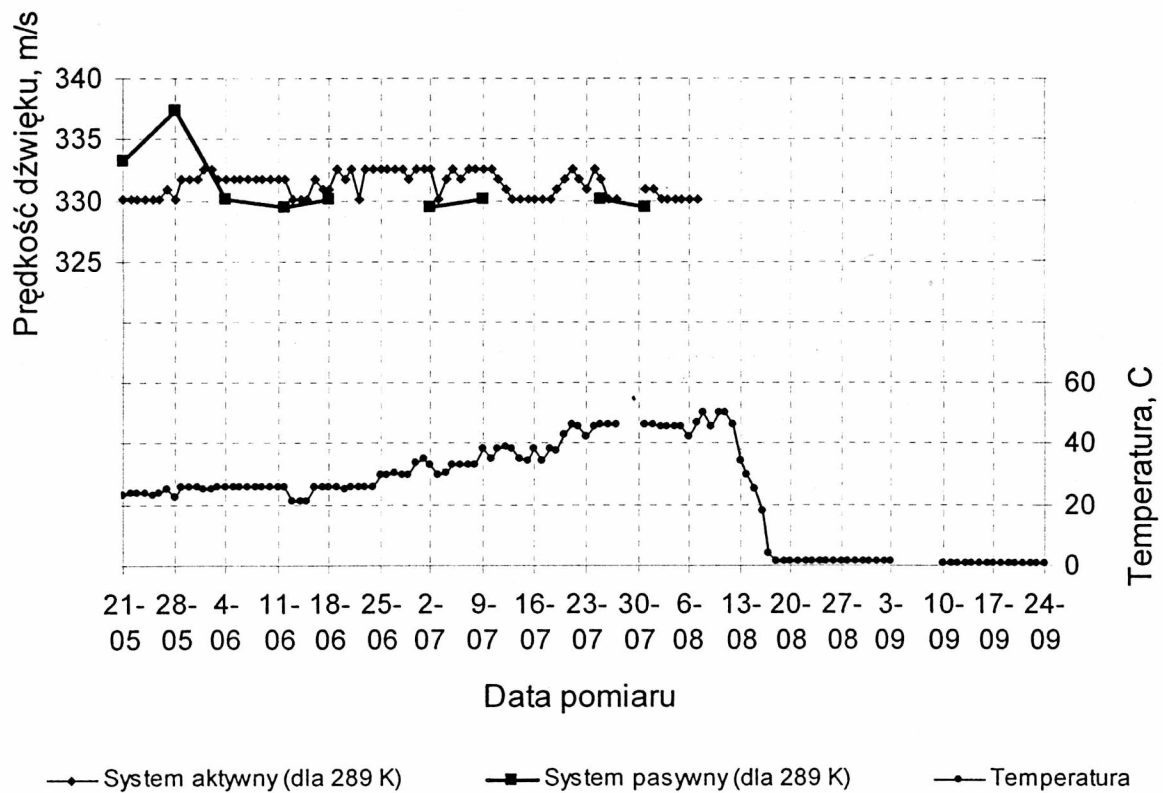
Na Rys. 5-36 przedstawiono porównanie wyników działania obu systemów: pasywnego i aktywnego. Na wykresie tym w zależności od czasu działania przedstawiono wartości prędkości propagacji przeliczonej dla stałej temperatury $T = 16 \text{ °C}$. Zmierzone wartości prędkości dźwięku są bliskie sobie dla obu przypadków systemów pomiarowych. W obu przypadkach też czas bezawaryjnego działania systemów był do siebie zbliżony.



Rys. 5-34. Wyniki działania systemu pasywnego



Rys. 5-35. Wyniki działania systemu aktywnego



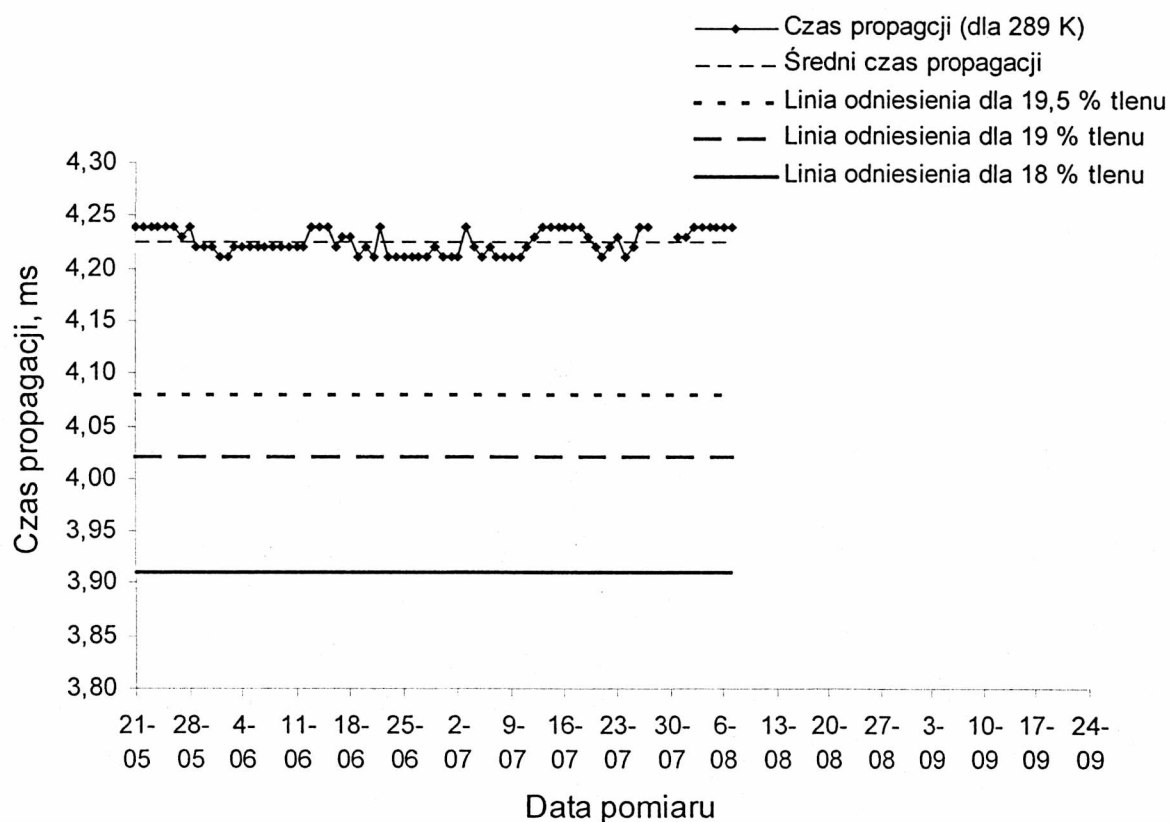
Rys. 5-36. Porównanie wyników działania systemów aktywnego i pasywnego.
Prędkość dźwięku po przeliczeniu na stałą temperaturę $T = 289 \text{ K}$ (16°C)

Stabilność wyników

System pasywny:

Największa odchyłka zmierzonych wartości czasu propagacji (po przeliczeniu na jednakową temperaturę $T = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$) od wartości średniej, wynoszącej $0,004229\text{ s}$ ($4,229\text{ ms}$), wyniosła $0,00008\text{ s}$ ($0,08\text{ ms}$). Odpowiada ona $3,8\%$ udziału helu w powietrzu, który to udział powoduje spadek koncentracji tlenu w powietrzu o $0,8\%$, czyli do wartości $20,2\%$. Jest to wartość daleko odbiegająca od wartości granicznej udziału tlenu w powietrzu, wynoszącej 18% , która powinna wyzwać alarm związany z zagrożeniem życia ludzi.

Na Rys. 5-37 przedstawiono w sposób graficzny porównanie wartości odczytanych czasów propagacji, mierzonych za pomocą systemu aktywnego, i ich wartości średniej z liniami odniesienia przedstawiającymi wartości czasu propagacji dla krytycznego udziału tlenu w powietrzu na poziomie 18% . Dodatkowo przedstawiono linie odniesienia dla jeszcze bardziej restrykcyjnych kryteriów bezpieczeństwa, odpowiadających wartościom udziału tlenu w powietrzu na poziomie 19% , a nawet $19,5\%$ (por. Tab. 2-2).

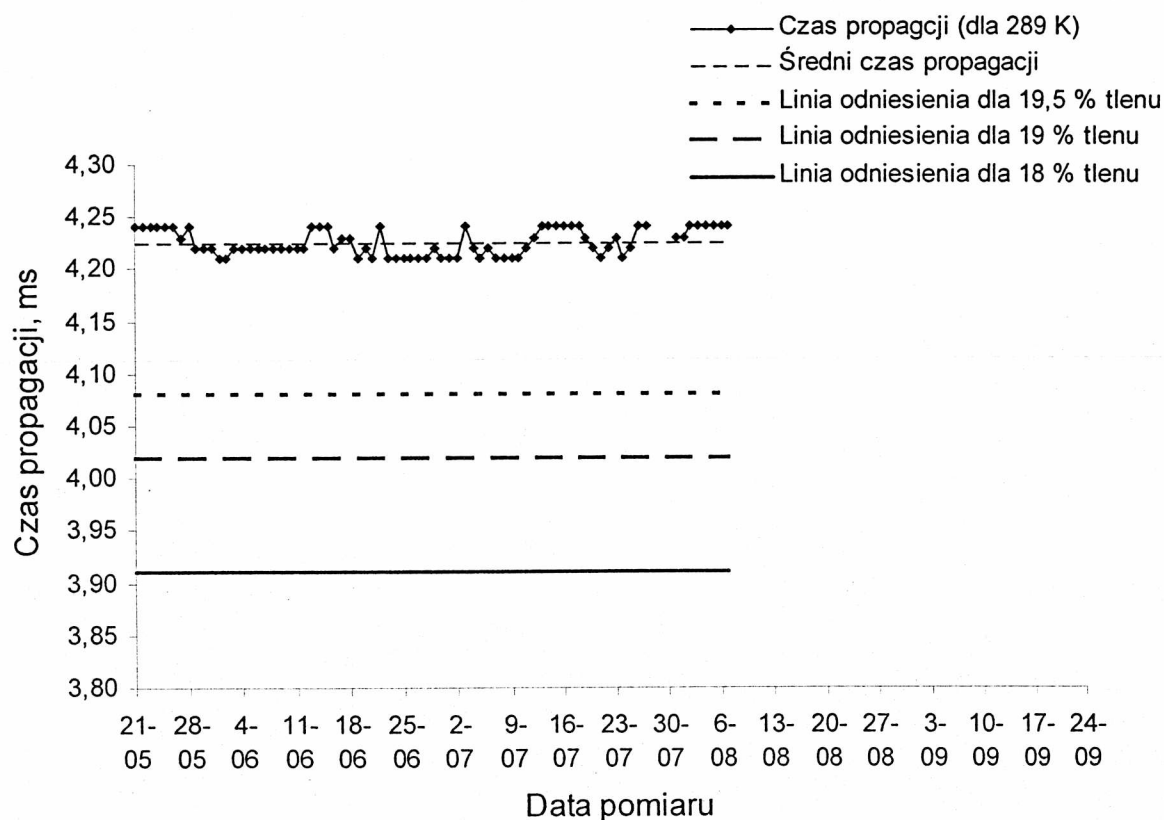


Rys. 5-37. Pomiar systemem pasywnym. Rzeczywiste i średnie wartości czasu propagacji oraz linie odniesienia reprezentujące graniczny udział tlenu w powietrzu

System aktywny:

Największa odchyłka zmierzonych wartości czasu propagacji (po przeliczeniu na jednakową temperaturę $T = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$) od wartości średniej, wynoszącej $0,004224\text{ s}$ ($4,224\text{ ms}$), wyniosła $0,000016\text{ s}$ ($0,016\text{ ms}$). Odpowiada ona $0,8\%$ udziału helu w powietrzu, który to udział powoduje spadek koncentracji tlenu w powietrzu o $0,17\%$, czyli do wartości $20,83\%$. Jest to wartość jeszcze bardziej, niż w przypadku systemu pasywnego, odbiegająca od wartości granicznej udziału tlenu w powietrzu, wynoszącej 18% , która powinna wyzwać alarm związany z zagrożeniem życia ludzi.

Na Rys. 5-38 przedstawiono w sposób graficzny porównanie wartości odczytanych czasów propagacji, mierzonych za pomocą systemu aktywnego, i ich wartości średniej z liniami odniesienia przedstawiającymi wartości czasu propagacji dla krytycznego udziału tlenu w powietrzu na poziomie 18% . Dodatkowo przedstawiono linie odniesienia dla jeszcze bardziej restrykcyjnych kryteriów bezpieczeństwa, odpowiadających wartościom udziału tlenu w powietrzu na poziomie 19% , a nawet $19,5\%$ (por. Tab. 2-2).

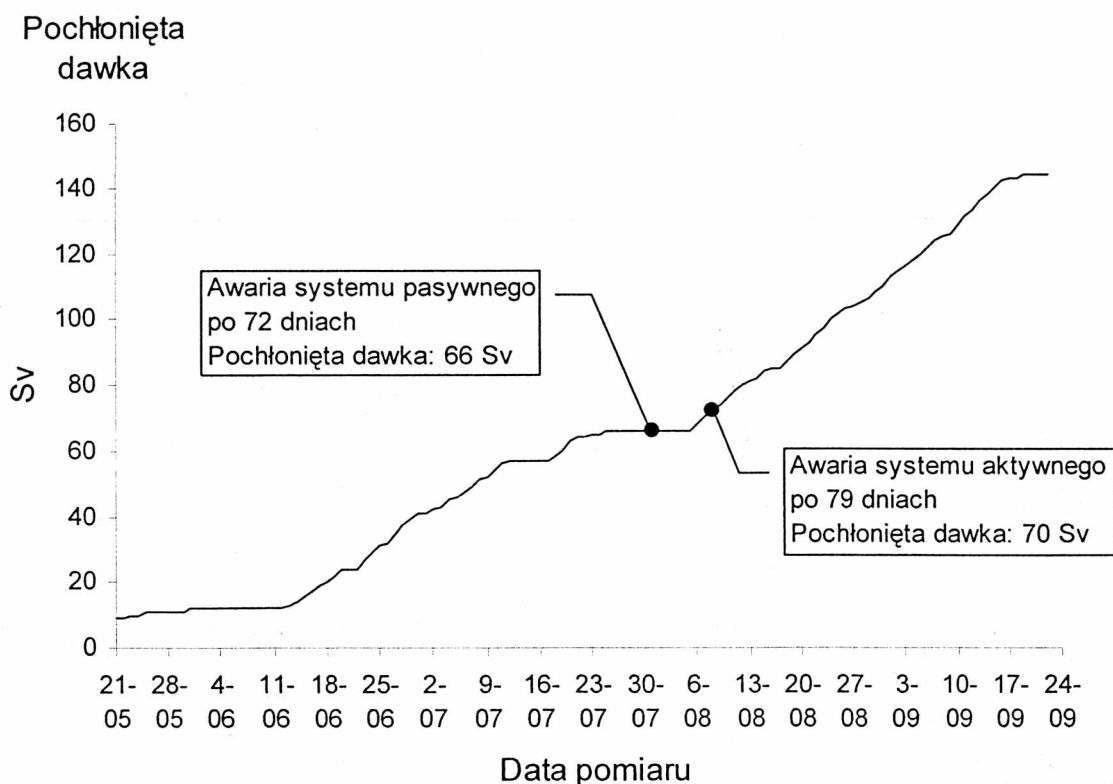


Rys. 5-38. Pomiar systemem aktywnym. Rzeczywiste i średnie wartości czasu propagacji oraz linie odniesienia reprezentujące graniczny udział tlenu w powietrzu

Szczegółowa analiza niepewności pomiaru czasu propagacji za pomocą tej metody oraz dla przypadku systemu aktywnego przedstawiona została w rozdziale 5.7.2.

Zaabsorbowane dawki promieniowania

Oba systemy pomiarowe, pasywny i aktywny, umieszczono w specjalnym obszarze tunelu akceleratora, w którym dokonywane były testy wytrzymałości urządzeń pomiarowych na prace w obecności promieniowania jonizującego. W bezpośrednim sąsiedztwie testowanych urządzeń pomiarowych znajdował się dozymetr służący do pomiaru pochłoniętej dawki promieniowania. Wykres przedstawiający skumulowaną pochłoniętą dawkę promieniowania jonizującego w czasie trwania eksperymentu przedstawiono na Rys. 5-39. Na rysunku tym naniesiono punkty reprezentujące moment awarii systemu pasywnego i aktywnego. System pasywny przestał działać po 72 dniach i zaabsorbowaniu dawki w ilości 66 Sv. Awaria systemu aktywnego nastąpiła po 79 dniach i po pochłonięciu dawki 70 Sv. Zaabsorbowane dawki powinny być wyrażone w grejach, które to jednostki stosuje się do oceny wpływu promieniowania na materię, ale są wyrażone w sivertach, które są odpowiednikami grejów w przypadku organizmów żywych. Sytuacja taka wystąpiła w wyniku awarii dozymetrów zainstalowanych w laboratorium TCC2. W przypadku występujących tam warunków jednostki te mogą być jednakże ze sobą bezpośrednio porównywane.



Rys. 5-39. Dawka promieniowania jonizacyjnego pochłonięta przez dozymetr znajdujący się w pobliżu urządzenia pomiarowego podczas eksperymentu

Analiza wyników

Oba urządzenia pomiarowe, wykorzystujące technikę pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej do określania stężenia helu w powietrzu, wykazały się dobrą jakością pomiarów, powtarzalnością wyników, jak również wystarczającą odpornością na działanie promieniowania jonizacyjnego, ze względu na przewidywane dawki promieniowania występujące w miejscu normalnej pracy urządzenia.

Stabilność odczytywanych wyników pomiarowych jest dobra. Jak to zostało pokazane na Rys. 5-37 oraz na Rys. 5-38 największe odchyłki odczytanych wartości od wartości średniej są na poziomie 3,8 % helu co odpowiada spadkowi udziału tlenu o 0,8 % dla systemu pasywnego, oraz na poziomie 0,8 % helu, czyli spadek udziału tlenu o 0,17 % dla systemu aktywnego. Spadki udziału tlenu powodujące zagrożenie dla życia lub zdrowia ludzi wynoszą od 1,5 % (do 19,5 % O_2) w przypadku najbardziej restrykcyjnym do 3 % (do 18 % O_2) w zwykle stosowanym przypadku. Odchyłki występujące podczas pomiarów są na dużo niższym poziomie i nie stwarzają niebezpieczeństwa wszczynania przypadkowych alarmów.

Urządzenia pomiarowe umieszczone były podczas testów w specjalnym obszarze akceleratora SPS, przeznaczonym do testowania przyrządów i zapewniającym zwiększone dawki promieniowania niż w miejscach, w których mogą pracować urządzenia elektroniczne podczas normalnego użytkowania akceleratora [41]. Jak widać na Rys. 5-39 oba testowane urządzenia przestały działać po otrzymaniu dawki promieniowania wynoszącej 66 do 70 Sv. Jest to dawka dużo większa niż roczne dawki w miejscach przeznaczonych na urządzenia elektroniczne w tunelu akceleratora. Taka dawka w przypadku rozwijanego obecnie nowego akceleratora LHC pod Genewą wynosi około kilku Gy rocznie [42]. Jak wspomniano wyżej dawki te wyrażone w różnych jednostkach można w tych warunkach ze sobą porównać. Badania dowiodły, że testowana urządzenie mogłoby bezawaryjnie pracować w takich warunkach przez co najmniej 10 lat.

Dodatkowo z rysunku Rys. 5-36 wynika, że ciągłe działanie systemu aktywnego pod obecność promieniowania jonizującego nie stwarza dodatkowego zagrożenia awarią systemu pomiarowego w porównaniu do systemu pasywnego, włączanego tylko podczas cotygodniowych przerw w działaniu akceleratora.

5.7. Ocena niepewności pomiarowej

Ocena niepewności pomiarów została dokonana w niniejszej pracy na podstawie publikacji [3, 45, 102]. Ocenę taką przeprowadzono dla pomiarów udziału helu we wzorcowych mieszaninach powietrza z helem zaprezentowanych w rozdziale 5.2 oraz dla pomiarów prędkości dźwięku wykonanych podczas badań odporności ultradźwiękowego układu pomiarowego na promieniowanie jonizujące (rozdział 5.6).

5.7.1. Niepewność pomiaru udziału helu w mieszaninach wzorcowych

Udział objętościowy z_{He} helu w mieszaninie z powietrzem wyznaczamy za pomocą przytoczonej wcześniej zależności (12), która dla tego przypadku będzie miała postać

$$z_{He} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (42)$$

Przy czym wartości członów A, B, C należy obliczyć na podstawie poniższych wzorów

$$A = \frac{a^2}{RT} (\kappa_{pow} - \kappa_{He})(M_{He} - M_{pow}) \quad (43)$$

$$B = \frac{a^2}{RT} [M_{pow} (\kappa_{pow} - 2\kappa_{He} + 1) + M_{He} (\kappa_{He} - 1)] - (\kappa_{pow} - \kappa_{He}) \quad (44)$$

$$C = \frac{a^2}{RT} (\kappa_{He} - 1)M_{pow} + \kappa_{pow} - \kappa_{pow}\kappa_{He} \quad (45)$$

gdzie:

- a^2 - zmierzona średnia prędkość dźwięku w mieszaninie, m/s,
- T - zmierzona średnia temperatura w mieszaninie, K,
- $\bar{R}$ - uniwersalna stała gazowa, J/(mol · K),
- $M_{He, pow}$ - masa molowa helu lub powietrza, kg/mol,
- $\kappa_{He, pow}$ - wykładnik adiabaty helu lub powietrza.

Jak widać w powyższym wzorze, udział helu obliczany jest na podstawie pomiaru średniej prędkości dźwięku w ośrodku oraz jego średniej temperatury. Obie te wielkości obarczone są jakąś niepewnością pomiaru. We wzorze (42) występują jeszcze wartości uniwersalnej stałej gazowej, wykładnika adiabaty oraz masy molowej składników mieszaniny. Wielkości te jednak są przyjmowane z odpowiednich tabel i w związku z tym ich niepewność może zostać pominięta. Dodatkowo wyznaczenie prędkości dźwięku odbywa się również w sposób pośredni za pomocą pomiaru odległości i czasu propagacji fali akustycznej. W związku z tym występują trzy wielkości mierzone w sposób bezpośredni. Sposoby ich pomiaru oraz związane z nimi błędy graniczne pokazano w Tab. 5-11.

Ze względu na to, że podczas badań nie otrzymano wystarczająco dużych serii pomiarowych do przeprowadzenia analizy statystycznej, ograniczono się do obliczenia równorzędnej niepewności standardowej typu B.

Tab. 5-11. Sposób pomiaru oraz błędy graniczne mierzonych wielkości fizycznych (pomiaru wzorcowe)

Wielkość fizyczna	Sposób pomiaru	Błąd graniczny Δg
Temperatura T	termometr rtęciowy	1 K
Odległość l	przymiar liniowy	0,001 m (1 mm)
Czas propagacji t	oscylloskop	0,00001 s (10 μ s)

Niepewność standardowa pomiaru temperatury T $u_{sBT} = \frac{\Delta g_T}{\sqrt{3}} = 0,58 \text{ K}$

Niepewność standardowa pomiaru odległości l $u_{sBl} = \frac{\Delta g_l}{\sqrt{3}} = 0,00058 \text{ m (0,58 mm)}$

Niepewność standardowa pomiaru czasu propagacji t $u_{sBt} = \frac{\Delta g_t}{\sqrt{3}} = 0,0000058 \text{ s (5,8 } \mu\text{s)}$

Na podstawie tych wartości można obliczyć maksymalne niepewności względne

Niepewność pomiaru temperatury $u_{BT} = \frac{u_{sBT}}{T} = 0,2 \%$

Niepewność pomiaru odległości $u_{Bl} = \frac{u_{sBl}}{l} = 0,2 \%$

Niepewność pomiaru czasu propagacji $u_{Bt} = \frac{u_{sBt}}{t_{\min}} = 1,8 \%$

Prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w badanej mieszaninie wyznaczano w sposób pośredni ze wzoru

$$a = \frac{l}{t} \quad (46)$$

Wielkości wejściowe (odległość i czas) są wzajemnie niezależne, więc w celu wyznaczenia złożonej niepewności standardowej pomiaru prędkości dźwięku a skorzystano ze wzoru

$$u_{ca} = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial l}\right)^2 \cdot u_{sBl}^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial t}\right)^2 \cdot u_{sBt}^2} \quad (47)$$

Ponieważ maksymalna względna niepewność pomiaru odległości jest o rząd mniejsza od niepewności pomiaru czasu, można założyć że niepewność pomiaru odległości będzie miała pomijalny wpływ i wykluczyć związany z nią człon z powyższego wzoru. Przyjmując najniekorzystniejszy przypadek maksymalna złożona niepewność standardowa pomiaru prędkości dźwięku wynosić będzie

$$u_{ca} = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial t}\right)^2 \cdot u_{sBt}^2} = \sqrt{\left(\frac{-l}{t^2}\right)^2 \cdot u_{sBt}^2} = 15 \text{ m/s} \quad (48)$$

Wartość ta odpowiada maksymalnej niepewności względnej $u_a = 1,7 \%$

Mając już określone niepewności pomiaru prędkości dźwięku i temperatury można przystąpić do wyznaczenia złożonej niepewności standardowej pomiaru udziału helu w mieszaninie. Ponieważ wzór (42) jest zbyt skomplikowany, aby liczyć bezpośrednio z niego pochodne cząstkowe, wyznaczono najpierw niepewności poszczególnych jego członów A , B oraz C ((43), (44), (45)). Podobnie jak w poprzednim przypadku, maksymalna względna niepewność pomiaru temperatury jest o rząd mniejsza od niepewności pomiaru prędkości dźwięku i jej wpływ został pominięty. W związku z tym obliczono tylko pochodne cząstkowe po prędkości a .

W celu uproszczenia obliczeń przyjęto następujące dodatkowe stałe:

$$A_1 = \frac{(\kappa_{pow} - \kappa_{He})(M_{He} - M_{pow})}{\bar{R}} \quad (49)$$

$$B_1 = \frac{M_{pow}(\kappa_{pow} - 2\kappa_{He} + 1) + M_{He}(\kappa_{He} - 1)}{\bar{R}} \quad (50)$$

$$C_1 = \frac{(\kappa_{He} - 1)M_{pow}}{\bar{R}} \quad (51)$$

Postać wyjściowa, wartości pochodnych cząstkowych po prędkości a , maksymalnych złożonych niepewności standardowych oraz maksymalnych niepewności względnych dla poszczególnych członów A , B i C przedstawiono w Tab. 5-12.

Tab. 5-12. Wyniki obliczeń niepewności dla poszczególnych członów A , B i C

Człon	Postać	$\frac{\partial}{\partial a}$	maksymalna złożona niepewność standardowa	maksymalna niepewność względna
A	$A_1 \frac{a^2}{T}$	$\frac{2A_1}{T}a$	$u_{cA} = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial a}\right)^2} \cdot u_{ca}^2 = 0,004$	$u_A = \frac{u_{cA}}{A} = 1,3 \%$
B	$B_1 \frac{a^2}{T} - (\kappa_{pow} - \kappa_{He})$	$\frac{2B_1}{T}a$	$u_{cB} = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial a}\right)^2} \cdot u_{ca}^2 = 0,014$	$u_B = \frac{u_{cB}}{B} = 1,7 \%$
C	$C_1 \frac{a^2}{T} + \kappa_{pow} - \kappa_{pow}\kappa_{He}$	$\frac{2C_1}{T}a$	$u_{cC} = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)^2} \cdot u_{ca}^2 = 0,011$	$u_C = \frac{u_{cC}}{C} = 14,2 \%$

Złożoną niepewność standardową pomiaru udziału helu w mieszaninie z powietrzem obliczono, korzystając z podobnego wzoru jak dla niepewności pomiaru prędkości dźwięku. Wzór ten zastosowano wprowadzając dodatkowe założenie, że dla tego przypadku chcąc oszacować niepewności standardową pomiaru udziału helu przyjmuje się, że członów A , B i C są wzajemnie niezależne.

$$u_{cz} = \sqrt{\left(\frac{\partial z_{He}}{\partial A}\right)^2 \cdot u_{cA}^2 + \left(\frac{\partial z_{He}}{\partial B}\right)^2 \cdot u_{cB}^2 + \left(\frac{\partial z_{He}}{\partial C}\right)^2 \cdot u_{cC}^2} \quad (52)$$

Podobnie jak w poprzednich przypadkach, maksymalna względna niepewność członu C jest o rząd wielkości większa od niepewności członów A oraz B i na tej podstawie wpływ tych dwóch ostatnich został pominięty.

$$u_{cz} = \sqrt{\left(\frac{\partial z_{He}}{\partial C}\right)^2} \cdot u_{cz}^2 = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{B^2 - 4AC}}\right)^2} \cdot u_{cz}^2 = 0,015 = 1,5 \% \quad (53)$$

Ponieważ testowane urządzenie pomiarowe może być wykorzystywane w systemach bezpieczeństwa, to zalecane jest określenie niepewności rozszerzonej U według wzoru

$$U = k \cdot u_c \quad (54)$$

We wzorze tym k oznacza współczynnik rozszerzenia. Współczynnik ten dla przedziału o poziomie ufności 95 % jest równy 2 i wtedy

$$U_{Z_{He}} = 3 \%$$

5.7.2. Niepewność pomiaru czasu propagacji urządzeniem wykorzystanym podczas badań odporności ultradźwiękowego układu pomiarowego na promieniowanie jonizujące

Z uwagi na to, że podczas pomiarów prędkości dźwięku za pomocą systemu aktywnego (rozdział 5.6) otrzymano wystarczająco dużą serię niezależnych pomiarów, określenia niepewności pomiaru dokonano metodą typu A, czyli na podstawie analizy statystycznej. Uzyskana seria pomiarowa przedstawiona została w załączniku B.

Obliczono średni czas $\bar{t}$ propagacji fali akustycznej dla n pomiarów

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = 0,004224 \text{ s} \quad (55)$$

Niepewność pojedynczego pomiaru czasu propagacji obliczono za pomocą odchylenia standardowego eksperymentalnie otrzymanych wartości pomiarowych

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = 0,000012 \text{ s} \quad (56)$$

Niepewność rozszerzoną pojedynczego pomiaru otrzymano przyjmując przedział ufności 95 % i dla takiego przedziału współczynnik rozszerzenia $k = 2$

$$U = k \cdot u_A = 0,000024 \text{ s} \quad (57)$$

W celu porównawczym obliczono dodatkowo względną niepewność pojedynczego pomiaru czasu propagacji za pomocą przyrządu testowanego w obecności promieniowania jonizacyjnego (system aktywny)

$$u_t = \frac{U}{\bar{t}} = 0,6 \% \quad (58)$$

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Podsumowanie

W pracy przeanalizowano teoretyczne podstawy możliwości wykorzystania ultradźwiękowej techniki pomiarowej do wyznaczania zarówno średnich udziałów składników, jak i ich przestrzennych rozkładów w dwuskładnikowych mieszaninach gazów. W oparciu o przeprowadzone rozważania sformułowano założenia pozwalające na skonstruowanie nowych przyrządów pomiarowych wykorzystujących technikę akustyczną. Realizacja celu pracy podzielona została na trzy etapy:

- Przegląd aktualnego stanu wiedzy dotyczącego możliwości wyznaczania składu mieszanin gazów, a w szczególności wykorzystania metod akustycznych do tego celu
- Teoretyczna analiza podstaw zastosowania metody ultradźwiękowej
- Doświadczalna weryfikacja działania ultradźwiękowego systemu pomiarowego, w tym tomografu komputerowego. Pomiary wpływu promieniowania jonizującego na pracę ultradźwiękowego systemu pomiarowego.

W pierwszym etapie określono obszary potencjalnych zastosowań analizowanej techniki pomiarowej. Są to w szczególności duże systemy kriogeniczne wykorzystywane np. do chłodzenia nadprzewodzących akceleratorów cząstek, zbudowanych z magnesów wykonanych ze stopu NbTi i kriostatowanych ciekłym helem. Technika może być również zastosowana w przypadku innych instalacji przemysłowych, tam gdzie wykorzystywanie większych ilości gazów technicznych wiąże się z możliwością ich wydostania się do otoczenia i narażenia zdrowia lub życia przebywających w pobliżu ludzi. Wskazano również na specyficzne warunki występujące w dużych systemach kriogenicznych zainstalowanych w akceleratorach związane z obecnością promieniowania jonizacyjnego i tym samym określonymi wymaganiami dotyczącymi urządzeń pomiarowych.

Aby osadzić proponowaną metodę pomiarową w kontekście innych dostępnych metod dokonano przeglądu technik pomiaru udziałów takich gazów, jak tlen oraz hel. Przeanalizowano wady i zalety tych metod, zwracając szczególną uwagę na występujące problemy w pomiarze tlenu za pomocą standardowych ogniw elektrochemicznych w obecności lekkich molekuł helu. Problem ten jest szczególnie istotny w dużych instalacjach kriogenicznych wykorzystujących do działania ilości helu dochodzące do kilkudziesięciu Mg, które na skutek nie dających się wykluczyć zdarzeń awaryjnych mogą być uwolnione do otoczenia.

Dokonano przeglądu aktualnych obszarów zastosowań techniki ultradźwiękowej w różnych środowiskach (gaz, ciecz, ciała stałe), jak również dostępnych metod wytwarzania fal ultradźwiękowych w tych środowiskach. Wskazano na wady i zalety związane z wykorzystaniem tej techniki pomiarowej.

W drugim etapie przeprowadzono szczegółową teoretyczną analizę możliwości wykorzystania własności propagacji fali ultradźwiękowej do wyznaczania składu binarnych mieszanin gazów lub ich temperatury, w przypadku ośrodków o znanym składzie. Dokonano identyfikacji rodzajów gazów, których własności pozwalają na zastosowanie metody akustycznej, jak również przeanalizowano występujące ograniczenia związane z wykorzystaniem fal ultradźwiękowych. Wyprowadzono ogólną zależność (wzór (12))

pozwalającą na obliczanie udziału badanego składnika w mieszaninie na podstawie zmierzonej prędkości propagacji fali akustycznej oraz temperatury ośrodka.

Przedstawiono podstawy działania techniki ultradźwiękowej tomografii komputerowej, w tym przegląd metod rekonstrukcji obrazu. Przeanalizowano dokładnie wpływ rodzajów projekcji pomiarowych na dokładność rekonstruowanego obrazu tomograficznego.

Na podstawie przeprowadzonej analizy teoretycznej zagadnienia opracowano i przedstawiono podstawowe założenia budowy ultradźwiękowego systemu pomiarowego. Założenia te dotyczą dwóch wersji przyrządu pomiarowego. Pierwszy, uproszczony, służący do pomiaru średniego składu mieszaniny, bądź jej temperatury. Drugi, natomiast, oparty na tomografii ultradźwiękowej, służący do wyznaczania przestrzennego rozkładu tych wielkości w ośrodkach niejednorodnych.

W trzecim etapie przeprowadzono badania doświadczalne, które miały na celu weryfikację przyjętych założeń dotyczących budowy i warunków działania ultradźwiękowego systemu pomiarowego.

Zaprojektowano i wykonano trzy prototypowe ultradźwiękowe urządzenia pomiarowe. Dwa z nich były to uproszczone urządzenia służące do wyznaczania średnich wartości takich parametrów, jak skład mieszaniny lub jej temperatura. Pierwsze urządzenie zastosowano do wzorcowych pomiarów składu mieszaniny helu z powietrzem, natomiast drugie posłużyło do testów sprawdzających możliwość zastosowania proponowanej metody pomiarowej w warunkach obecności promieniowania jonizacyjnego. Trzecim przyrządem pomiarowym był ultradźwiękowy tomograf komputerowy pracujący w środowisku gazowym. Przy jego pomocy przeprowadzono szereg pomiarów sprawdzających jego przydatność do wyznaczania przestrzennych rozkładów udziału składników mieszaniny, bądź jej temperatury.

Tomograf ultradźwiękowy przetestowany został również podczas pomiarów rozkładu helu w znajdującym się w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, modelu fragmentu tunelu akceleratora LHC konstruowanego obecnie w CERN. Pomiary wykonano dla różnych przypadków przepływu mieszaniny helu i powietrza. Dodatkowo wykonano porównawcze pomiary szybkości dyfuzji helu do powietrza za pomocą metody ultradźwiękowej oraz klasycznej metody pomiaru udziału tlenu za pomocą ogniów elektrochemicznych. Pomiary potwierdziły zalety metod nieinwazyjnych.

Pozytywne wyniki testów przeprowadzonych w warunkach radiacyjnych i wyrażane zainteresowanie proponowaną metodą pomiarową sprawiają, że testowane urządzenia mogą stać się elementami systemów bezpieczeństwa w budowanym akceleratorze LHC w laboratorium CERN pod Genewą.

Na koniec przeprowadzono analizę niepewności pomiarów składu wzorcowych mieszanin powietrza z helem oraz prędkości dźwięku w ultradźwiękowym systemie ostrzegania przed spadkiem tlenu testowanym w laboratorium CERN.

Wnioski końcowe

Wnioski teoretyczne:

1. Eksploatacja dużych helowych systemów kriogenicznych, wymaga ze względów bezpieczeństwa monitorowania składu atmosfery pod kątem stwierdzenia i zapobieżenia skutkom potencjalnych wycieków kriogenu do otoczenia.
2. Stosowanie standardowych ogniów elektrochemicznych do określania składu powietrza napotyka w pewnych warunkach na problemy techniczne powodowane obecnością lekkich molekuł helu, bądź działaniem promieniowania jonizacyjnego. Z tego powodu

konieczne są badania nad rozwojem nowych, alternatywnych metod wyznaczania składu mieszanin gazowych, w szczególności mieszanin kriogenów z powietrzem.

3. Metody takie mogą być rozwinięte w oparciu o technikę ultradźwiękową, dotychczas bardzo mało wykorzystywaną do pomiarów w środowiskach gazowych. Tematyka zastosowania techniki ultradźwiękowej w takich ośrodkach jest bardzo ubogo reprezentowana w dostępnej literaturze naukowej, a w szczególności brak jest doniesień o wykorzystaniu techniki tomografii komputerowej w ośrodkach gazowych.
4. Możliwość wykorzystania metody pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej do określania średniego składu binarnych mieszanin gazów, takich jak mieszaniny powietrza z helem, wodorem, metanem lub radonem jest w pełni uzasadniona (Rys. 4-1). W przypadku ośrodka gazowego o znanym składzie metoda ta może służyć do pomiaru jego temperatury.
5. Użycie techniki tomografii ultradźwiękowej pozwala na rekonstrukcję przestrzennego rozkładu składników mieszaniny lub temperatury w przestrzeni pomiarowej. Jest to szczególnie istotne w przypadku obecności w badanym ośrodku lokalnych nagromadzeń badanego gazu.
6. Zastosowanie uproszczonych układów projekcji pomiarowych pozwala na wystarczająco wierną rekonstrukcję obrazu tomograficznego (Rys. 4-11).

Wnioski praktyczne:

1. Badania doświadczalne potwierdziły możliwość wyznaczenia składu wybranych mieszanin powietrza z helem. Wyniki pomiarów odpowiadają zarówno przewidywaniom teoretycznym (Rys. 5-7), jak i porównawczym pomiarom przeprowadzonym za pomocą metody chromatograficznej. Niepewność wyznaczenia udziału tlenu w mieszaninie wyniosła poniżej 1 %.
2. Zastosowanie ultradźwiękowego tomografu komputerowego umożliwiło wystarczająco dobrą rekonstrukcję obrazu występowania niejednorodności składu lub temperatury ośrodka w obszarze pomiarowym (Rys. 5-14, Rys. 5-15). Występujące pewne niezgodności można wytłumaczyć dosyć ograniczoną szerokością projekcji pomiarowych, co zostało zresztą przewidziane podczas teoretycznej analizy (Rys. 5-16).
3. Przeprowadzone pomiary rozkładu helu w laboratoryjnym modelu tunelu akceleratora LHC budowanego w CERN, dla różnych przypadków przepływu mieszaniny helu z powietrzem, wykazały dobrą jakościowo zgodność otrzymanych profili koncentracji tlenu w stosunku do referencyjnego pomiaru za pomocą zwykłych ogniw elektrochemicznych (Rys. 5-20, Rys. 5-21, Rys. 5-22, Rys. 5-23). Zgodność ta uzyskana została nawet mimo silnie ograniczonego układu projekcji pomiarowych.
4. Ultradźwiękowa metoda pomiarowa ma szczególną przydatność wszędzie tam, gdzie wymagane są niezakłócone warunki wewnątrz przestrzeni pomiarowej, jak również szybkość wykonania pomiaru, np. w przypadku pomiaru zjawiska dyfuzji.
5. Technika ultradźwiękowa może być stosowana w warunkach promieniowania jonizacyjnego. Przeprowadzone pomiary potwierdziły wystarczającą odporność ultradźwiękowego systemu pomiarowego na pracę w warunkach obecności promieniowania jonizacyjnego. Wykazana została dobra stabilność wyników pomiarów, zapewniająca brak fałszywych alarmów systemu ostrzegawczego przed spadkiem koncentracji tlenu w atmosferze (Rys. 5-38).

7. Literatura

- [1] - Adamowski J. C., Buiocchi F., Simon C., Silva E. C. N., *Ultrasonic measurement of density of liquids*, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 97, pp. 354-361, Acoustical Society of America, 1995
- [2] - Amaldi U., *The importance of particle accelerators*, Proceedings of the Seventh European Particle Accelerator Conference (EPAC 2000), Austria, Vienna, 26-30 June 2000
- [3] - Arendarski J., *Niepewność pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003
- [4] - Arenius D., Curry D., Hutton A., Mahoney K., Prior S., Robertson H., *Investigation of personal and fixed head oxygen deficiency hazard monitor performance for helium gas*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Madison, Wisconsin, 16-20 July 2001, vol.47, pp. 1784-1791, American Institute of Physics, 2002
- [5] - Arnold K., Ziemann A., Raabe A., *Tomographic monitoring of wind and temperature at different heights above the ground*, Acta Acustica - Acustica, vol. 87, pp. 703-708, S.Hirzel Verlag - EAA, 2001
- [6] - Asher R. C., *Ultrasonic sensors in the chemical and process industries*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol. 16, pp. 959-963, The Institute of Physics, 1983
- [7] - Aymar R., *ITER overview*, Fusion Engineering and Design, vol. 36, pp. 9-21, Elsevier, 1997
- [8] - Aymar R., *ITER achievements by July 1998 and future prospects*, Fusion Engineering and Design, vol. 46, pp. 115-127, Elsevier, 1999
- [9] - Bangerter R. O., *The US Heavy Ion Fusion Program*, Fusion Engineering and Design, vol. 32-33, pp. 27-32, Elsevier, 1996
- [10] - Bartels H.-W., Poucet A., Cambi G., Gordon C., Gaeta M., Gulden W., Honda T., Iseli M., Jahn H., Koonce J., Kveton O., Merrill B., Mitchell N., Moore R. L., Petti D., Polkinghorne S., Porfiri M. T., Raeder J., Saji G., Stubbe E., Piet S. J., Topilski L., Uckan N., VanHove W., *ITER reference accidents*, Fusion Engineering and Design, vol. 42, pp. 13-19, Elsevier, 1998
- [11] - Beck M. S., Williams R. A., *Process tomography: a European innovation and its applications*, Measurement Science and Technology, vol. 7, pp. 215-224, The Institute of Physics, 1996
- [12] - Beckord P., Höfelmann G., Luck H. O., Franken D., *Temperature and velocity fields measurements using ultrasonic computer tomography*, Heat and Mass Transfer, vol. 33, pp. 395-403, Springer, 1998
- [13] - Berlincourt D., *Piezoelectric ceramics: Characteristics and applications*, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 70, pp. 1586-1595, Acoustical Society of America, 1981
- [14] - Brodzinski K., Chorowski M., Gizicki W., Ostropolski W., Riddone G., *The applicability of ultrasonic Oxygen Deficiency Hazard detectors in the LHC accelerator tunnel*, Twentieth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC 20), Pekin, Chiny, 2004 - materiał przyjęty do publikacji
- [15] - Cassidy K., *Risk assessment and safety of the large cryogenic systems and plant in the UK and Europe*, Cryogenics, vol. 33, pp. 755-761, Elsevier, 1993
- [16] - Chen Q. X., Payne P. A., *Industrial applications of piezoelectric polymer transducers*, Measurement Science and Technology, vol. 6, pp. 249-267, The Institute of Physics, 1995

- [17] - Chong C. P., Li H. L., Chan H. L. W., Liu P. C. K., *Study of 1-3 composite transducer for ultrasonic wirebonding application*, Ceramics International, vol. 30, pp. 1141-1146, Elsevier, 2004
- [18] - Chorowski M., Gizicki W., Wach J., *Acoustic tomography in helium-air mixture*, 2nd International Symposium on Process Tomography in Poland, Wrocław 11th-12th September 2002, Politechnika Wrocławska, 2002
- [19] - Chorowski M., Gizicki W., Wach J., *Application of acoustic tomography in helium-air mixture content monitoring*, Proceedings of the Nineteenth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC 19), Grenoble, France, 2002, Narosa Publishing House, New Delhi, 2003
- [20] - Chorowski M., Gizicki W., Wach J., *Możliwości wykorzystania ultradźwięków do wyznaczania rozkładów przestrzennych binarnych mieszanin gazów stosowanych w instalacjach kriogenicznych*, Chłodnictwo, vol. 37, nr 6, s. 26-31, SIGMA NOT, Warszawa, 2002
- [21] - Chorowski M., Konopka G., Riddone G., *An experimental study of cold helium dispersion in air*, CP613, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Madison, Wisconsin, 16-20 July 2001, vol. 47, pp. 1452-1459, American Institute of Physics, 2002
- [22] - Chorowski M., Konopka G., Riddone G., Rybkowski D., *Experimental simulation of helium discharge into the LHC tunnel from the supercritical helium supply header in the LHC cryogenic distribution line*, LHC-ACR Internal Note 2002-01, Geneva, 2002
- [23] - Chorowski M., Konopka G., Riddone G., *Helium discharge and dispersion in the LHC accelerator tunnel in case of cryogenic failure*, Proc. 18th International Cryogenic Engineering Conference, Mumbai, India, 2000, Ed. By Narayankhedkar
- [24] - Chorowski M., Erdt W., Konopka G., Riddone G., *Oxygen deficiency hazard (ODH) monitoring system in the LHC tunnel*, LHC Project Report 523, Geneva, 13 December 2001
- [25] - Chorowski M., Lebrun Ph., Riddone G., *Preliminary risk analysis of the LHC Cryogenic System*, Advances in Cryogenic Engineering 45 B, pp. 1309-1316, Plenum, New York, USA, 2000
- [26] - Dabill D. W., Groves J. A., Lamont D. R., *The effect of pressure on portable gas monitoring equipment during compressed air tunneling*, The Annals of Occupational Hygiene, vol. 40, pp. 11-28, Elsevier, 1996
- [27] - Dabin Y., *Large accelerator vacuum system engineering*, Vacuum 67, p.347-357, Elsevier, 2002
- [28] - Dain Y., Lueptow R. M., *Acoustic attenuation in three-component gas mixtures-Theory*, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 109, pp. 1955-1964, Acoustical Society of America, 2001
- [29] - Dain Y., Lueptow R. M., *Acoustic attenuation in a three-gas mixture-Results*, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 110, pp. 2974-2979, Acoustical Society of America, 2001
- [30] - Daynes H. A., *Gas analysis by measurement of thermal conductivity*, pp.1-10, Cambridge University Press, London, 1933
- [31] - Dentan M., *Radiation effects on electronics components and circuits*, Materiały udostępnione przez CERN, Genewa
- [32] - Devoret M., Sullivan N. S., Esteve D., Deschamps P., *Simple thermal conductivity cell using a miniature thin film printed circuit for analysis of binary gas mixtures*, Review of Scientific Instruments, vol. 51, pp. 1220-1224, The American Institute of Physics, 1980

- [33] - Dietz J. and the ITER Joint Central Team, *The ITER fusion experiment*, Vacuum 47 (6-8), p.911-918, Elsevier, 1996
- [34] - Dobrucki A., *Podstawy akustyki*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1992
- [35] - Edeskuty F. J., *Accidents with cryogenic fluids and what can we learn from them*, CP613, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Madison, Wisconsin, 16-20 July 2001, Vol. 47, pp. 1743-1758, American Institute of Physics, 2002
- [36] - Edeskuty F. J., Stewart W. F., *Safety in the handling of cryogenic fluids*, Plenum Press, New York, 1996
- [37] - Ejakov S. G., Phillips S., Dain Y., Lueptow R. M., Visser J. H., *Acoustic attenuation in gas mixtures with nitrogen: Experimental data and calculations*, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 113, pp. 1871-1879, Acoustical Society of America, 2003
- [38] - Etkin A., Williams T., Musselino S., Robinson T., Frankel B., Heyder R., *The RHIC personnel safety system*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, vol. 499, pp. 388-391, Elsevier, 2003
- [39] - Evans L. R., *The Large Hadron Collider Project*, 16th International Cryogenic Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, 20-24 May 1996
- [40] - Evans L. R., *LHC Accelerator physics and technology challenges*, Proc. Particle Accelerator Conference, New York, 1999
- [41] - Fynbo C. A., Stevenson G. R., *Qualification of the radiation environment in the TCC2 experimental Test Area*, LHC Project Note 235, Geneva, 15 December 2000
- [42] - Fynbo C. A., Stevenson G. R., *Radiation environment in the main ring of the LHC*, LHC Project Seminar, Geneva, 22 November 2001
- [43] - Gajda M. A., Ahmed H., *Applications of thermal silicon sensors on membranes*, Sensors and Actuators A, vol. 49, pp. 1-9, Elsevier, 1995
- [44] - Gilmore R. S., *Industrial ultrasonic imaging and microscopy*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 29, pp. 1389-1417, The Institute of Physics, 1996
- [45] - Główny Urząd Miar, *Wyrażanie niepewności pomiaru - przewodnik*, Warszawa, 1999
- [46] - Green R. E. Jr., *Non-contact ultrasonic techniques*, Ultrasonics, vol. 42, pp. 9-16, Elsevier, 2004
- [47] - Greenwood M. S., Skorpik J. R., Bamberger J. A., Harris R. V., *On-line ultrasonic density sensor for process control of liquids and slurries*, Ultrasonics, vol. 37, pp. 159-171, Elsevier, 1999
- [48] - Gudra T., Opielinski K. J., *Ultrasonic transducers working in the air with the continuous wave within the 50-500 kHz frequency range*, Ultrasonics, vol. 42, pp. 453-458, Elsevier, 2004
- [49] - Hauptmann P., Hoppe N., Püttmer A., *Application of ultrasonic sensors in the process industry*, Measurement Science and Technology, vol. 13, pp. R73-R83, The Institute of Physics, 2002
- [50] - Hauptmann P., Lucklum R., Püttmer A., Henning B., *Ultrasonic sensors for process monitoring and chemical analysis: state-of-the-art and trends*, Sensors and Actuators A, vol. 67, pp. 32-48, Elsevier, 1998
- [51] - Hay D., Nunes R., *Radiation tolerance tests of flammable gas and oxygen deficiency detection detectors performed at the CERN TCC2 radiation facility*, ST Note, CERN, Geneva, 16 December 2002
- [52] - Herman G. T., *Image Reconstruction from Projections: The Fundamentals of Computerized Tomography*, Academic Press, New York, 1980

- [53] - Holliday D. V., Pieper R. E., *Bioacoustical oceanography at high frequencies*, ICES Journal of Marine Science, vol. 52, pp. 279-296, ICES, 1995
- [54] - Hoyle B. S., *Process tomography using ultrasonic sensors*, Measurement Science and Technology, vol. 7, pp. 272-280, The Institute of Physics, 1996
- [55] - Huguet M., *The ITER magnet system*, Fusion Engineering and Design 36, p.23-32, Elsevier, 1997
- [56] - Iarocci M. A., Brown D., Sondericker J., Wu K. C., Benson J., Farah Y., Lac C., Morgillo A., Nicoletti A., Quimby E., Rank J., Rehak M., Werner A., *RHIC cryogenics*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, vol. 499, pp. 264-279, Elsevier, 2003
- [57] - Kalinowski E., *Termodynamika, Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1984
- [58] - Kim D. L., Oh Y. K., Jung Y. S., Choi C. H., Lee J. M., Kim Y. S., Park Y. M., Lee G. S., *Cryogenic system for KSTAR Tokamak*, CP613, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Madison, Wisconsin, 16-20 July 2001, Vol. 47, pp. 55-59, American Institute of Physics, 2002
- [59] - Kimura M., Manaka J., Satoh S., Takano S., Igarashi N., Nagai K., *Application of the air-bridge microheater to gas detection*, Sensors and Actuators B, vol. 24-25, pp. 857-860, Elsevier, 1995
- [60] - Kocache R., *The measurement of oxygen in gas mixtures*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol. 19, pp. 401-412, The Institute of Physics, 1986
- [61] - Konopka-Cupiał G., *Badania przepływów mieszanin płynów kriogenicznych i powietrza*, Raport Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, nr 04/2004, seria: Preprinty, Wrocław, 2004
- [62] - Kossoff G., *Basic physics and imaging characteristics of ultrasound*, World Journal of Surgery, vol. 24, pp. 134-142, Societe Internationale de Chirurgie / Springer, 2000
- [63] - Krautkrämer J., Krautkrämer H., *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer, Berlin, 1990
- [64] - Lammerink T. S. J., Dijkstra F., Houkes Z., van Kuijk J., *Intelligent gas-mixture flow sensor*, Sensors and Actuators A, vol. 46-47, pp. 380-384, Elsevier, 1995
- [65] - Lavrentyev A. I., Beals J. T., *Ultrasonic measurement of the diffusion bond strength*, Ultrasonics, vol. 38, pp. 513-516, Elsevier, 2000
- [66] - Lebrun Ph., *The Large Hadron Collider, A Megascience Project*, LHC Project Report 374, Geneva, 2000
- [67] - Lebrun Ph., *Large cryogenic helium refrigeration system for the LHC*, 3rd International Conference on Cryogenics & Refrigeration (ICCR), Hangzhou, China, 22-25 April 2003
- [68] - Lech M., Wach J., *Acoustic tomography in combustion*, International Journal of Power and Energy Systems, vol. 21, no. 1, pp. 1-4, ACTA Press, 2001
- [69] - Lundstrom I., *Hydrogen sensitive MOS structures, Part 1: principles and applications*, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 1, pp. 403-426, Elsevier, 1981
- [70] - MacLennan D. N., Holliday D. V., *Fisheries and plankton acoustics: past, present and future*, ICES Journal of Marine Science, vol. 53, pp. 513-516, ICES International Council for the Exploration of the Sea, 1996
- [71] - Maiani L., *The future for CERN*, The European Physical Journal C: Particles and Fields, vol. 34, pp. 85-90, Springer, 2004
- [72] - Malecki I., *Jak fala akustyczna „widzi” strukturę ośrodka?*, Archiwum akustyki, 14, 2, 111-120, PWN, Wrocław, 1979

- [73] - Manthey W., Krömer N., Magori V., *Ultrasonic transducers and transducer arrays for applications in air*, Measurement Science and Technology, vol. 3, pp. 249-261, The Institute of Physics, 1992
- [74] - Mason P. V., *Safety issues of space liquid-helium and solid-cryogen systems*, CP613, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Madison, Wisconsin, 16-20 July 2001, Vol. 47, pp. 1759-1767, American Institute of Physics, 2002
- [75] - McClements D. J., Povey M. J. W., *Scattering of ultrasound by emulsions*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 22, pp. 38-47, The Institute of Physics, 1989
- [76] - Mitchell N., *Simulations of the operational control of a cryogenic plant for a superconducting burning-plasma tokamak*, Fusion Engineering and Design, vol. 54, pp. 97-115, Elsevier, 2001
- [77] - Munk W., Worcester P., Wunsch C., *Ocean Acoustic Tomography*, Cambridge University Press, 1995
- [78] - Nashchokin V. V., *Engineering thermodynamics and heat transfer*, Mir Publishers, Moscow, 1979
- [79] - Oxygen Deficiency Hazard, *Safety Instruction*, 1999, normy obowiązujące w USA, materiały udostępnione przez Brookhaven National Laboratory, USA
- [80] - Panakkal J. P., Ghosh J. K., Roy P. R., *Use of ultrasonic velocity for measurement of density of sintered fuel pellets*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 17, pp. 1791-1795, The Institute of Physics, 1984
- [81] - Peterson T., *Helium and nitrogen ODH analysis for ICB Engineering Laboratory*, Fermilab, 1991, materiały udostępnione przez Fermi National Accelerator Laboratory, USA
- [82] - Phillips S., Dain Y., Lueptow R. M., *Theory for a gas composition sensor based on acoustic properties*, Measurement Science and Technology, vol. 14, pp. 70-75, The Institute of Physics, 2003
- [83] - Phipps M. R., Jaluria Y., Eklund T., *Helium-based simulation of smoke spread due to fire in enclosed spaces*, Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, Vol.317-2, IMECE, 1995
- [84] - Pijolat C., Tournier G., Breuil P., Matarin D., Nivet P., *Hydrogen detection on a cryogenic motor with a SnO₂ sensors network*, Sensors and Actuators B, vol. 82, pp. 166-175, Elsevier, 2002
- [85] - Polturak E., Garrett S. L., Lipson S. G., *Precision acoustic gas analyzer for binary mixtures*, Review of Scientific Instruments, vol. 57, pp. 2837-2841, The American Institute of Physics, 1986
- [86] - Rego R., Caetano N., Mendes A., *Development of a new gas sensor for binary mixtures based on the permselectivity of polymeric membranes. Application to carbon dioxide/methane and carbon dioxide/helium mixtures*, Analytica Chimica Acta, vol. 511, pp. 215-221, Elsevier, 2004
- [87] - Reid R. C., Prausnitz J. M., Sherwood T. K., *The properties of gases and liquids*, McGraw-Hill, Inc., 1977 (Russian translation 1982)
- [88] - Schickert M., *Progress in Ultrasonic SAFT-Imaging of Concrete*, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 2003, Berlin, Germany, 16-19 September 2003
- [89] - Sharkov B.Yu., Alexeev N.N., Churazov M.D., Golubev A.A., Koshkarev D.G., Zenkevich P.R., *Heavy ion fusion energy program in Russia*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 464, p.1-5, Elsevier, 2001
- [90] - Sheen S.-H., Chien H.-T., Raptis A. C., *Ultrasonic techniques for detecting helium leaks*, Sensors and Actuators B 71, p. 197-202, Elsevier, 2000

- [91] - Sielschott H., *Measurement of horizontal flow in a large scale furnace using acoustic vector tomography*, Flow Measurement and Instrumentation, vol. 8, pp. 191-197, Elsevier, 1997
- [92] - Silk M. G., *Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing*, Bristol, 1984
- [93] - Simon I., Arndt M., *Thermal and gas-sensing properties of a micromachined thermal conductivity sensor for the detection of hydrogen in automotive applications*, Sensors and Actuators A, vol. 97-98, pp. 104-108, Elsevier, 2002
- [94] - Soyars W. M., Schiller J. L., *Open channel helium flow during rupture event*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Madison, Wisconsin, 16-20 July 2001, vol. 47, p. 1776-1783, American Institute of Physics, 2002
- [95] - Stanek R., Kilmer J., *Evolution of cryogenic safety at Fermilab*, Cryogenics, vol. 33, pp. 809-812, Elsevier, 1993
- [96] - Strilka T., Sajben M., Nagy P., *Continuous monitoring of binary gas mixture concentration with application to turbine blade cooling experiments*, Journal of Turbomachinery, vol. 122, pp. 570-578, ASME, 2000
- [97] - Talarczyk E., *Podstawy techniki ultradźwięków*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1990
- [98] - Tardy P., Coulon J.-R., Lucat C., Menil F., *Dynamic thermal conductivity sensor for gas detection*, Sensors and Actuators B, vol. 98, pp. 63-68, Elsevier, 2004
- [99] - Thuraisingham R. A., *Sound speed in bubbly water at megahertz frequencies*, Ultrasonics, vol. 36, pp. 767-773, Elsevier, 1998
- [100] - Tinge J. T., Mencke K., Bosgra L., Drinkenburg A. A. H., *Ultrasonic gas analyser for high resolution determination of binary-gas composition*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol. 19, pp. 953-956, The Institute of Physics, 1986
- [101] - Tressler J. F., Alkoy S., Dogan A., Newnham R. E., *Functional composites for sensors, actuators and transducers*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 30, pp. 477-482, Elsevier, 1999
- [102] - Turzeniecka D., *Analiza dokładności wybranych przybliżonych metod oceny niepewności*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1999
- [103] - Wade G., *Human uses of ultrasound: ancient and modern*, Ultrasonics 38, p.1-5, Elsevier, 2000
- [104] - Warburton P. R., Sawtelle R. S., Watson A., Wang A. Q., *Failure prediction for a galvanic oxygen sensor*, Sensors and Actuators B, vol. 72, pp. 197-203, Elsevier, 2001
- [105] - Xu L. J., Han Y., Xu L. A., Yang J., *Application of ultrasonic tomography to monitoring gas/liquid flow*, Chemical Engineering Science, vol. 52, pp. 2171-2183, Elsevier, 1997
- [106] - Xu L. J., Xu L. A., *Gas/liquid two-phase flow regime identification by ultrasonic tomography*, Flow Measurement and Instrumentation, vol. 8, pp. 145-155, Elsevier, 1997
- [107] - Ziemann A., Arnold K., Raabe A., *Acoustic tomography in the atmospheric surface layer*, Annales Geophysicae 17, p. 139-148, Springer, 1999
- [108] - Ziemann A., Arnold K., Raabe A., *Acoustic travel time tomography - a method for remote sensing of the atmospheric surface layer*, Meteorology and Atmospheric Physics 71, p. 43-51, Springer, 1999
- [109] - Zipser L., Wächter F., *Acoustic sensor for ternary gas analysis*, Sensors and Actuators B, vol. 26-27, pp. 195-198, Elsevier, 1995
- [110] - Zipser L., Wächter F., Franke H., *Acoustic gas sensors using airborne sound properties*, Sensors and Actuators B, vol. 68, pp. 162-167, Elsevier, 2000
- [111] - Żyszkowski Z., *Podstawy elektro-akustyki*, WNT, Warszawa, 1984

Załącznik A - Szczegółowe wyprowadzenie wzoru do obliczenia udziału objętościowego gazów wchodzących w skład mieszaniny

Punktem wyjścia jest wzór (9), czyli:

$$a = \sqrt{\left(\frac{1}{\sum \frac{z_i}{\kappa_i - 1}} + 1 \right) \cdot \frac{\bar{R}T}{\sum z_i M_i}} \quad (59)$$

Zakładając, że mieszanina składa się z dwóch składników X i Y, powyższy wzór możemy rozpisać:

$$a = \sqrt{\left(\frac{1}{\frac{z_X}{\kappa_X - 1} + \frac{z_Y}{\kappa_Y - 1}} + 1 \right) \cdot \frac{\bar{R}T}{z_X M_X + z_Y M_Y}} \quad (60)$$

Celem jest znalezienie z_X , czyli udziału składnika X w mieszaninie składającej się z X oraz Y. Przyjmując, że $z_X + z_Y = 1$, to

$$z_Y = 1 - z_X \quad (61)$$

Wówczas dalsze przekształcenia będą wyglądały następująco

$$\frac{a^2}{\bar{R}T} = \left(\frac{1}{\frac{z_X}{\kappa_X - 1} + \frac{1 - z_X}{\kappa_Y - 1}} + 1 \right) \cdot \frac{1}{z_X M_X + (1 - z_X) M_Y} \quad (62)$$

$$\frac{a^2}{\bar{R}T} = \left(\frac{1}{\frac{z_X (\kappa_Y - \kappa_X) + \kappa_X - 1}{(\kappa_X - 1)(\kappa_Y - 1)}} + 1 \right) \cdot \frac{1}{z_X (M_X - M_Y) + M_Y} \quad (63)$$

W celu uproszczenia obliczeń przyjęto oznaczenia pomocnicze

$$K = \kappa_Y - \kappa_X \quad m = M_X - M_Y$$

$$q = (\kappa_X - 1)(\kappa_Y - 1) \quad p = \kappa_X - 1$$

$$s = \frac{a^2}{\bar{R}T}$$

Po ich uwzględnieniu otrzymano wzór

$$s = \left(\frac{1}{\frac{z_X \cdot K + p}{q}} + 1 \right) \cdot \frac{1}{z_X \cdot m + M_Y} \quad (64)$$

i dalej

$$s = \frac{q + z_X \cdot K + p}{z_X \cdot K + p} \cdot \frac{1}{z_X \cdot m + M_Y} \quad (65)$$

$$s = \frac{z_X \cdot K + p + q}{z_X^2 \cdot Km + z_X \cdot mp + z_X \cdot KM_Y + pM_Y} \quad (66)$$

$$sKm \cdot z_X^2 + s(mp + KM_Y) \cdot z_X + spM_Y = z_X \cdot K + p + q \quad (67)$$

$$sKm \cdot z_X^2 + [s(mp + KM_Y) - K] \cdot z_X + (spM_Y - q - p) = 0 \quad (68)$$

Podstawiając

$$A = sKm \quad (69)$$

$$B = s(mp + KM_Y) - K \quad (70)$$

$$C = spM_Y - q - p \quad (71)$$

Otrzymamy

$$A \cdot z_X^2 + B \cdot z_X + C = 0 \quad (72)$$

Po rozwiązaniu i odrzuceniu pierwiastka niemającego sensu fizycznego otrzymano ostateczny wzór na udział składnika X w mieszaninie z Y

$$z_X = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (73)$$

przy czym

$$A = \frac{a^2}{RT} (\kappa_Y - \kappa_X)(M_X - M_Y) \quad (74)$$

$$B = \frac{a^2}{RT} [M_Y (\kappa_Y - 2\kappa_X + 1) + M_X (\kappa_X - 1)] - (\kappa_Y - \kappa_X) \quad (75)$$

$$C = \frac{a^2}{RT} (\kappa_X - 1)M_Y + \kappa_Y - \kappa_X \kappa_Y \quad (76)$$

gdzie:

- a^2 - zmierzona średnia prędkość dźwięku w mieszaninie, m/s,
- T - zmierzona średnia temperatura w mieszaninie, K,
- $\bar{R}$ - uniwersalna stała gazowa, J/(mol · K),
- $M_{X,Y}$ - masa molowa składnika X lub Y, kg/mol,
- $\kappa_{X,Y}$ - wykładnik adiabaty i -tego składnika.

Załącznik B

**Wyniki pomiarów czasu propagacji i temperatury
przy użyciu aktywnego zestawu pomiarowego (opis na stronie 76)**

Data	Czas	Czas propagacji	Temperatura	Czas propagacji (po kompensacji temperatury)	Prędkość dźwięku (po kompensacji temperatury)
	dni	ms	C	ms	m/s
21-05	0	4,29	23,3	4,24	330
22-05	1	4,30	23,9	4,24	330
23-05	2	4,30	24,0	4,24	330
24-05	3	4,29	23,5	4,24	330
25-05	4	4,29	23,3	4,24	330
26-05	5	4,29	23,5	4,24	330
27-05	6	4,29	24,9	4,23	331
28-05	7	4,29	22,4	4,24	330
29-05	8	4,29	25,6	4,22	332
30-05	9	4,29	25,6	4,22	332
31-05	10	4,29	25,6	4,22	332
1-06	11	4,27	24,9	4,21	333
2-06	12	4,27	24,9	4,21	333
3-06	13	4,29	25,5	4,22	332
4-06	14	4,29	25,5	4,22	332
5-06	15	4,29	25,6	4,22	332
6-06	16	4,29	25,6	4,22	332
7-06	17	4,29	25,5	4,22	332
8-06	18	4,29	25,6	4,22	332
9-06	19	4,29	25,6	4,22	332
10-06	20	4,29	25,5	4,22	332
11-06	21	4,29	25,6	4,22	332
12-06	22	4,29	25,6	4,22	332
13-06	23	4,28	20,8	4,24	330
14-06	24	4,28	21,1	4,24	330
15-06	25	4,28	20,8	4,24	330
16-06	26	4,29	25,5	4,22	332
17-06	27	4,30	25,6	4,23	331
18-06	28	4,30	25,5	4,23	331
19-06	29	4,28	25,6	4,21	333
20-06	30	4,28	24,9	4,22	332
21-06	31	4,28	25,7	4,21	333
22-06	32	4,31	25,6	4,24	330
23-06	33	4,28	25,5	4,21	333
24-06	34	4,28	25,9	4,21	333
25-06	35	4,31	29,7	4,21	333
26-06	36	4,31	29,5	4,21	333
27-06	37	4,31	30,1	4,21	333
28-06	38	4,31	29,5	4,21	333
29-06	39	4,32	29,5	4,22	332

Data	Czas	Czas propagacji	Temperatura	Czas propagacji (po kompensacji temperatury)	Prędkość dźwięku (po kompensacji temperatury)
	dni	ms	C	ms	m/s
30-06	40	4,34	33,8	4,21	333
1-07	41	4,34	34,7	4,21	333
2-07	42	4,33	33,0	4,21	333
3-07	43	4,34	29,5	4,24	330
4-07	44	4,32	30,1	4,22	332
5-07	45	4,33	32,8	4,21	333
6-07	46	4,34	32,8	4,22	332
7-07	47	4,33	32,8	4,21	333
8-07	48	4,33	32,8	4,21	333
9-07	49	4,37	38,4	4,21	333
10-07	50	4,34	34,7	4,21	333
11-07	51	4,38	38,4	4,22	332
12-07	52	4,39	38,7	4,23	331
13-07	53	4,40	38,4	4,24	330
14-07	54	4,38	34,7	4,24	330
15-07	55	4,37	34,5	4,24	330
16-07	56	4,40	38,4	4,24	330
17-07	57	4,37	34,0	4,24	330
18-07	58	4,40	38,4	4,24	330
19-07	59	4,38	37,3	4,23	331
20-07	60	4,41	42,8	4,22	332
21-07	61	4,43	46,4	4,21	333
22-07	62	4,43	45,2	4,22	332
23-07	63	4,42	42,0	4,23	331
24-07	64	4,42	45,6	4,21	333
25-07	65	4,43	45,8	4,22	332
26-07	66	4,46	46,4	4,24	330
27-07	67	4,46	46,4	4,24	330
28-07	68	-	-	-	-
29-07	69	-	-	-	-
30-07	70	-	-	-	-
31-07	71	4,45	46,4	4,23	331
1-08	72	4,45	46,4	4,23	331
2-08	73	4,45	45,4	4,24	330
3-08	74	4,45	45,4	4,24	330
4-08	75	4,45	45,2	4,24	330
5-08	76	4,45	45,4	4,24	330
6-08	77	4,43	42,0	4,24	330
7-08	78	4,46	46,6	4,24	330
8-08	79	-	50,0	-	-
9-08	80	-	45,4	-	-
10-08	81	-	50,0	-	-
11-08	82	-	50,0	-	-
12-08	83	-	45,9	-	-

Data	Czas	Czas propagacji	Temperatura	Czas propagacji (po kompensacji temperatury)	Prędkość dźwięku (po kompensacji temperatury)
	dni	ms	C	ms	m/s
13-08	84	-	34,4	-	-
14-08	85	-	29,5	-	-
15-08	86	-	24,9	-	-
16-08	87	-	17,7	-	-
17-08	88	-	4,1	-	-
18-08	89	-	1,6	-	-
19-08	90	-	1,0	-	-
		-		-	-
24-09	126				

