



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA: Nauk Ścisłych i Przyrodniczych

DYSCYPLINA: Nauki o Ziemi i Środowisku

ROZPRAWA DOKTORSKA

*Opracowanie technologii pomiarowej do geometryzacji
podziemnych kawern przeznaczonych na magazynowanie ciekłych
lub gazowych węglowodorów lub sprężonego powietrza*

Autor: mgr inż. Tomasz Kubacka

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Chau Nguyen Dinh

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska

Kraków, 2024



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

FIELD OF SCIENCE: Exact and Natural Sciences

SCIENTIFIC DISCIPLINE: Earth and Environmental Sciences

DOCTORAL DISSERTATION

*Improvement of measurement technology for the geometry of
underground caverns assigned to the storage of liquid or gas
hydrocarbons or compressed air*

Author: M.Sc. Eng. Tomasz Kubacka

Supervisor: Prof. D. Eng. Nguyen Dinh Chau

AGH University of Science and Technology,
Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection

Kraków, 2024

Podziękowania

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania Panu prof. dr hab. inż. Chau Nguyen Dinh za nieocenioną pomoc udzieloną w trakcie przygotowywania pracy doktorskiej, cierpliwość i wyrozumiałość oraz nieustającą motywację do krytycznego spojrzenia na problematykę badawczą.

Dziękuję także Pani prof. dr hab. inż. Jadwidze Jarzynie oraz Panu prof. dr hab. inż. Adamowi Piestrzyńskiemu za cenne wskazówki i uwagi dotyczące rozprawy.

Serdeczne podziękowania składam również Szkole Doktorskiej AGH oraz Ośrodkowi Badawczo Rozwojowemu Górnictwa Surowców Chemicznych CHEMKOP Sp. z o.o. za szansę na realizację pracy naukowej oraz możliwość wdrożenia uzyskanych wyników w przemyśle.

Słowa podziękowania należą się także moim kolegom z pracy, w szczególności Marcinowi Nowakowi, za fachowe i profesjonalne wsparcie mojej osoby podczas realizowania prac badawczych.

Dziękuję również mojej Rodzinie oraz Przyjaciółom, którzy wspierali mnie duchowo i niejednokrotnie służyli szczerą pomocą, w szczególności chciałbym podziękować Mojej Żonie Monice za niezwykłą cierpliwość, z którą podchodziła do mnie każdego dnia podczas realizacji pracy doktorskiej, za jej wsparcie oraz wiarę w moje możliwości.

Streszczenie

Jednym z najbardziej ekonomicznych sposobów na magazynowanie substancji energetycznych w stanie ciekłym czy gazowym jest wykorzystanie kawern po eksploatacji soli kamiennej. Jednak warunki tektoniczne i zróżnicowanie formacji geologicznych zwykle występujące w złożach solnych oraz własności mechaniczne soli i skał otaczających powodują, że kawerny mogą ulegać zmianom, nie tylko pod kątem ich parametrów geometrycznych, ale również i kształtu. W takiej sytuacji kawerny powstałe w wyniku ługowania złóż soli kamiennej wymagają okresowej kontroli ich geometrii zarówno na etapie budowy, jak również podczas ich późniejszego wykorzystania jako podziemne magazyny. Pomiar i monitoring zmian geometrii realizowany jest przy użyciu wgłębných urządzeń pomiarowych, do których należy przede wszystkim echosonda ultradźwiękowa. Pomiary geometryczne wykonywane są w komorach, których strefa pomiarowa zwykle nie jest niczym przesłonięta, jednak w niektórych przypadkach, wynikających z warunków technicznych lub procesów technologicznych, wyciągnięcie rur z otworu eksploatacyjnego nie jest możliwe. W takim przypadku przestrzeń pomiarowa kawerny jest zasłonięta przed echosondą, która podczas pomiaru umieszczona jest w wewnętrznej przestrzeni rur, co znacząco utrudnia bądź nawet uniemożliwia określenie kształtu kawerny. W takich przypadkach pomiary te zostają zlecone firmom zagranicznym, co powoduje, że koszty pomiarowe ponoszone przez przedsiębiorstwa są bardzo wysokie a pomiary, najczęściej kawern o znaczeniu strategicznym, nie są realizowane przez podmioty krajowe.

Na świecie pomiary echometryczne są wykonywane jedynie przez nieliczne wyspecjalizowane przedsiębiorstwa, które stosują swoje własne opracowane technologie i przyrządy pomiarowe, co oznacza, że rozwiązania kluczowych problemów technicznych nie są ogólnodostępne.

Powyższe problemy przyczyniły się do zbadania przez autora zagadnień związanych nie tylko z sytuacją, kiedy echosonda znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rury eksploatacyjnej, ale również związanych z polepszeniem aparatury i dokładności pomiarowej oraz skróceniem czasu pomiarowego w otworach wiertniczych, co ma znaczący wpływ na jakość i szybkość wykonywanych pomiarów.

Podjęcie nowego zagadnienia naukowego skłoniło autora do studiów niezbędnych wiadomości teoretycznych oraz do prowadzenia badań symulacyjnych i testowych na podstawie skonstruowanych modeli fizycznych, od najbardziej podstawowych do najbardziej zbliżonych do warunków rzeczywistych panujących w kawernach solnych. Główne prace podjęte i osiągnięcia rozprawy doktorskiej w skrócie opisane są poniżej.

W pierwszej kolejności wykonano pomiary symulacyjne oraz testy w warunkach laboratoryjnych mające na celu badanie wpływu grubości stalowej płyty równoległej do czoła głowicy ultradźwiękowej, czyli powierzchni prostopadłej do kierunku rozchodzenia fali ultradźwiękowej, na amplitudę sygnału odbitego od płyty jak i amplitudę sygnału przez nią transmitowanego. Z wyników badań wynika, że najlepszy współczynnik transmisji przez płytę stalową mają fale ultradźwiękowe, których długości fali są równe połowie grubości płyty albo jej wielokrotności. Fale o takich częstotliwościach nazwane są falami rezonansowymi. Przeprowadzono również badania transmisji przez płytę fal częstotliwościowo modulowanych, które

często wykorzystane są w pomiarach echometrycznych. Badania współczynników odbicia i transmisji fal wykonano również dla przypadku, kiedy głowica pomiarowa umieszczona została pomiędzy dwoma płytami równoległymi do czoła głowicy transmittera oraz kiedy głowica pomiarowa znajdowała się w wewnętrznej przestrzeni rury stalowej. Badania te wykazały, że odległości między zarejestrowanymi wielokrotnymi echemi odbitymi odpowiadają wielokrotności odległości pomiędzy płytami lub ścianą rury a czołem głowicy transmittera. Natomiast sygnał odbity od ściany kawerny charakteryzuje się lokalnym minimum w jego widmie częstotliwościowym, dodatkowo amplituda sygnału echa pochodzącego od ściany kawerny zwykle jest znacznie mniejsza niż amplitudy sygnałów wielokrotnie odbitych od płyty. Takie charakterystyki umożliwiają identyfikowanie różnych rodzajów fal występujących w przypadku, kiedy głowica fali ultradźwiękowej znajduje się w przestrzeni rury eksploatacyjnej.

W dalszej kolejności autor podjął badania możliwości pomiarów odległości przy użyciu metody ultradźwiękowej w sytuacji, kiedy echosonda została przesłonięta przez metalową przeszkodę. Przeprowadzono symulacje mające na celu określenie wpływu przeszkody i rodzaju generowanego sygnału nadawczego na czas rejestracji sygnału odbitego od ściany kawerny przez odbiornik. Uzyskane wyniki wykazały, że otrzymane odległości w pomiarach przy wykorzystaniu fal rezonansowych są pozornie większe o kilka procent niż zakładane odległości. Fakt ten może być spowodowany opóźnieniem w lokalizacji początku echa użytecznego wynikającym z poziomu szumu sygnału i interferencją fal przechodzących przez płytę i odbitych od ściany, jednak temat ten wymaga dalszego studiowania. Wykonano również badania mające na celu weryfikację zastosowania przetworników ultradźwiękowych do pomiarów echometrycznych kawern w celu pomiaru grubości ścian rur zapuszczonych do otworu. Wyniki takich badań wskazują, że dobór odpowiedniej częstotliwości sygnału nadawczego jest konieczny zarówno w pomiarach geometrii kawerny jak również podczas oceny stanu technicznego i wyznaczenia miejsc korozji i deformacji rur.

Wykonano badania symulacyjne wpływu położenia głowicy pomiarowej w wewnętrznej przestrzeni rur stalowych na amplitudę i parametry geometryczne wiązki fali rozchodzącej się w medium ciekłym. Przeprowadzono też pomiary obwodu zbiornika wodnego w warunkach laboratoryjnych, kiedy głowica pomiarowa znajdowała się w wewnętrznej przestrzeni rur stalowych lub rur wykonanych z włókna szklanego o różnej średnicy nominalnej i grubości ścianki.

Przeprowadzono również pomiary grubości płyt stalowych oraz grubości ścianki rur wykonanych ze stali oraz z włókna szklanego przy użyciu metody ultradźwiękowej. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że grubości ścianki rury stalowej i rury z włókna szklanego mierzone metodą ultradźwiękową były zgodne z grubościami zmierzonymi elektronicznym grubomierzem.

Badania wykonane przez autora potwierdziły możliwość wykonywania pomiarów echometrycznych przez przeszkody i umożliwiły opracowanie odpowiedniej metodyki opartej na wykorzystaniu częstotliwości rezonansowych, pozwalających na wykonanie pomiarów geometryzacji kawern solnych w sytuacji, kiedy sonda pomiarowa umieszczona jest wewnątrz rur. Ponadto badania wykonane przez autora rozszerzyły wiedzę na temat prawidłowego pozycjonowania głowicy pomiarowej umieszczonej wewnątrz rur w celu poprawnego wykonania pomiarów odległości. Otrzymane w ramach przeprowadzonych badań wyniki potwierdzają również

możliwość zastosowania częstotliwości rezonansowych oraz odpowiednich współczynników relacji do pomiaru grubości ściany rur umieszczonych w otworze udostępniającym kawernę. Pozwala to na dokonywanie oceny stanu technicznego rur podczas wykonywania pomiarów geometrycznych kawern solnych.

Rezultatem przeprowadzonych badań podczas przygotowywania niniejszej pracy było opracowanie konstrukcyjnych rozwiązań technicznych pozwalających na wytworzenie uniwersalnego urządzenia pomiarowego, które służyć będzie do wykonywania pomiarów geometrycznych kawern wypełnionych zarówno medium gazowym jak i ciekłym oraz ich parametrów fizycznych przy znaczącej poprawie jakości otrzymywanych danych w porównaniu do obecnie stosowanych urządzeń pomiarowych.

Zestaw oparty o echosondę ultradźwiękową stanowi znaczące unowocześnienie dotychczas posiadanego przez firmę Ośrodek Badawczo Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych Chemkop Sp. z o.o. („Chemkop”) sprzętu pomiarowego, co skutkuje znaczącym wzrostem konkurencyjności przedsiębiorstwa, przynajmniej w skali krajowej. Zestaw pomiarowy został przetestowany w warunkach laboratoryjnych oraz w rzeczywistej kawernie testowej wypełnionej solanką. Całkowicie cyfrowa komunikacja i modułowa konstrukcja czynią opracowane urządzenia uniwersalnymi i pozwala na dopasowywanie ich do specyficznych wymagań pomiarowych, jak również zastosowanie opracowanych w ramach pracy rozwiązań w celu zwiększenia zakresu pomiarowego przy wykorzystaniu jednego urządzenia wglębnego.

Abstract

One of the most economical ways to store energy substance in a liquid or gaseous state is to use cavern after rock salt mining. However, tectonics and the diversity of geological formations usually occurring in salt deposits, as well as the mechanical properties of the salt and surrounding rocks, cause caverns to change not only in terms of their geometric parameters, but also their shape. In such a situation, caverns created as a result of leaching of rock salt deposits require periodic inspection of their geometry both at the construction stage and during their subsequent use as underground storage facilities. Measurement and monitoring of changes in shape and geometry are carried out using deep measurement devices, which include primarily an ultrasonic echo probe. During the performing geometric measurements in caverns, the measurement zone of which is usually not obstructed, but in some cases, due to technical conditions or technological processes, it is not possible to remove tubes from the drilling hole. In such a case, the measurement space of the cavern is obscured from the echo transmitter, which is placed in the internal space of the service tubes during the measurement. The situation makes significantly difficult or even impossible to measure the geometry of the cavern. In such cases the measurements are entrusted the foreign companies, which means that measurement cost incurred by the company is very high and the measurements most often in strategic importance cavern are not carried out by domestic firms.

In the world echometric measurements are performed by a few specialized companies and they use own developed technologies and measuring instruments, which means that the key solutions to key technical problems are not publicly available.

The above problems contributed to the author's examination of issues related not only to the situation when the echo probe is located in the internal space of the leaching or exploitation tube, but also related to improving the measuring equipment and accuracy and reducing the measurement time in produced boreholes, which has a significant impact on the quality and speed of the measurement.

Taking up a new scientific issue prompted the author to study the necessary theoretical knowledge and to conduct simulation and test research based on constructed physical models, from the most basic to those closest to the real conditions prevailing in salt caverns. The main work undertaken, and achievements of the doctoral dissertation are briefly described below.

First, simulation measurements and tests in laboratory conditions were performed to examine the influence of the thickness of the steel plate parallel to the head face of the transmitter, i.e. the plate perpendicular to the direction of ultrasonic wave propagation, on the amplitude of the signal reflected from the plate and the amplitude of the signal transmitted through it.

The test results show that the highest transmission coefficient through a steel plate is provided by ultrasonic waves whose wavelengths are equal to half the thickness of the plate or its multiple. Waves with such frequencies are called resonance waves. Transmission tests through the plate were also carried out for frequency modulated waves, which are often used in echometric measurements.

Wave reflection and transmission coefficients were also tested for the case when the measuring probe was placed between two plates parallel to the face of the transmitter and when the transmitter was located in the internal space of the steel pipe. These studies have shown that the distances between the recorded multiple reflected echoes

correspond to a multiple of the distance between the plates or pipe wall and the front of the transmitter face. However, the signal reflected from the cavern wall is characterized by a local minimum in its frequency spectrum; additionally, the amplitude of the echo signal from the cavern wall is usually much smaller than the amplitude of signals repeatedly reflected from the plate. Such characteristics enable the identification of different types of waves occurring when the ultrasonic probe is located in the operating pipe space.

Next, the author undertook to investigate the possibility of measuring distances using the ultrasonic method in a situation when the echo probe was obscured by a metal obstacle. Simulations were carried out to determine the impact of the obstacle and the type of the generated transmitting signal on the time of the signal reflected from the cavern wall recorded by the receiver. The results showed that the distances obtained in measurements using resonant waves are apparently several percent larger than the assumed distances. This fact may be due to the delay in locating the onset of the useful echo resulting from the signal noise level and the interference of waves passing through the plate and reflected from the wall, but this topic requires further study.

Investigation was also carried out to verify the use of ultrasonic transducers for echometric measurements of caverns in order to measure the wall thickness of tubes placed into the hole. The results of such tests indicate that the selection of the appropriate frequency of the transmitting signal is necessary both in measuring the geometry of the cavern as well as when assessing the technical condition and locating places of corrosion and deformation of tubes.

Simulation tests were carried out on the influence of the position of the ultrasonic transmitter in the internal space of steel pipes on the amplitude and geometric parameters of the wave beam propagating in the liquid medium.

Measurements of the circumference of the water pool were also carried out in laboratory conditions, when the measuring probe was located in the internal space of steel pipes or fiberglass pipes with different nominal diameters and wall thicknesses. The results turned out the circumferences of water pool measured by the echo probe in the case with and without pipe are in good agreement.

Measurements of the thickness of steel plates and the wall thickness of pipes made of steel and fiberglass were also carried out using the ultrasonic method. It turned out that the wall thicknesses of the steel pipe and fiberglass pipe measured using the ultrasonic method were in very good agreement with the wall thicknesses of these pipes measured with an electronic thickness gauge.

The research carried out by the author confirmed the possibility of performing echometric measurements through obstacles and enabled the development of an appropriate methodology based on the use of resonance frequencies, allowing for measurements of the geometrization of salt caverns in a situation when the measurement probe is placed inside the pipes. In addition, the research carried out by the author allowed obtaining knowledge about the correct positioning of the measuring probe placed inside the pipes in order to perform correct distance measurements. The results obtained as part of the research also confirm the possibility of using resonance frequencies and appropriate relationship coefficients to measure the wall thickness of pipes placed in the hole providing access to the cavern. This allows for the assessment of the technical condition of pipes when performing geometric measurements of salt caverns.

The result of the research carried out in this work was the development of appropriate technical solutions allowing the creation of a universal measuring device that will be

used to perform geometric measurements of caverns filled with both gaseous and liquid media and their physical parameters with a significant improvement in the quality of the data obtained compared to currently used measuring devices.

The new equipment with an ultrasonic echo probe is a significant modernization of the measuring equipment previously owned by the Research and Development Centre for Mining of Chemical Raw Materials “Chemkop”, which results in a significant increase in the company's competitiveness, at least on a national scale. The new equipment was tested in laboratory conditions and in a real test cavern filled with brine. Fully digital communication and modular design make the developed devices very universal and allow them to be adapted to specific measurement requirements, as well as the use of solutions developed as part of the work to increase the measurement range using one downhole device.

1 Wprowadzenie

Zapewnienie bezpieczeństwa dostaw energii to element kluczowy dla funkcjonowania nowoczesnych gospodarek światowych. W związku z tym podejmowane są szeroko zakrojone działania mające na celu, nie tylko poszukiwanie nowych bądź bardziej przyjaznych źródeł energii, ale również możliwości ich gromadzenia i przechowywania. Zagadnienie to jest istotne z punktu widzenia zarówno odpowiedniego bilansowania energii pozyskiwanej z odnawialnych źródeł energii w sieci energetycznej, jak również zabezpieczenia kluczowych dla gospodarki surowców energetycznych (Wojciechowski, 2017; Rafał i Grabowski, 2023).

Obecnie, jednym z szeroko stosowanych sposobów na wielkoskalowe magazynowania energii lub produktów energetycznych jest wykorzystanie kawern powstałych po eksploatacji złóż soli kamiennej.

Magazyny w kawernach solnych cechują się dużą elastycznością, a właściwości soli kamiennej gwarantują, że zbiorniki zapewniają szczelność w odpowiednim reżimie ciśnieniowym oraz są obojętne dla większości rodzajów magazynowanych substancji (Lankof i Tarkowski, 2022). Powszechność występowania soli kamiennej w wielu krajach oraz wielkość złóż solnych są dodatkowym czynnikiem sprzyjającym budowie kawern magazynowych na świecie. Kawerny solne od przeszło siedemdziesięciu lat są wykorzystywane jako bardzo wydajne zbiorniki, które pozwalają na magazynowanie substancji energetycznych takich jak węglowodory ciekłe lub gazowe. Potentatami światowymi w magazynowaniu ropy, paliw oraz gazu ziemnego na świecie są Stany Zjednoczone oraz Niemcy. Obecnie funkcjonuje ponad tysiąc kawern magazynowych a ich ilość ciągle rośnie (Kunstman i in., 2009).

Kawerny solne są również używane jako zbiorniki do magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza w instalacjach Compressed Air Energy Storage (CAES) stabilizując sieć energetyczną w przypadku zwiększonego zapotrzebowania na energię (Milewski i in., 2016; He i in., 2017). Prowadzane są również prace koncepcyjne mające na celu wykorzystanie energii sprężonego gazu ziemnego do produkcji energii elektrycznej w układach Compressed Natural Gas Energy Storage (CNGES) (Wołowicz i in., 2017). Trwająca obecnie transformacja energetyczna powoduje gwałtowny wzrost znaczenia wodoru jako nośnika energii. Kawerny solne uznawane są za jedno z najbardziej korzystnych pod względem technicznym i ekonomicznym rozwiązań do magazynowania wodoru lub jego mieszanin (Crotogino i in., 2010; Chromik, 2016; Tarkowski, 2017; Such, 2020). Ponadto pojemności oferowane przez kawerny wykorzystywane są również do składowania odpadów przemysłowych (Kukiałka, 2015; Shi i in., 2021) oraz jako alternatywny sposób na magazynowanie dwutlenku węgla, co przyczynia się dodatkowo do zmniejszenia ilości gazów cieplarnianych w atmosferze (da Costa i in., 2011; Maia da Costa i in., 2019). Ponadto w dalszym ciągu kawerny solne odgrywają ważną rolę w eksploatacji złóż soli kamiennej metodą ługowania.

Kawerny przeznaczone na magazynowanie substancji energetycznych powinny cechować się odpowiednimi pojemnościami oraz szczelnością i długookresową statecznością geomechaniczną. Muszą one również spełniać założenia projektowe w szczególności dotyczące ich kształtów i wymiarów (Niu i in., 2015; Habibi, 2019; Bayram i Bektasoglu, 2020). Wykonanie takich kawern uzależnione jest od szeregu czynników, w tym w szczególności od budowy geologicznej złoża solnego oraz zastosowanej technologii ługowania.

W celu zapewnienia bezpiecznej i efektywnej pracy kawernowego magazynu niezbędna jest ciągła kontrola postępów procesu ługowania kawern w czasie ich powstawania jak również późniejszy monitoring kawern magazynowych podczas ich eksploatacji.

Jednym ze sposobów na kontrolę kształtu i rozmiarów kawern solnych jest wykonywanie okresowych pomiarów przy użyciu specjalistycznych urządzeń geofizycznych zapuszczanych do kawerny. Do tego celu stosuje się echosondę ultradźwiękową, która umożliwia pomiary geometrii kawern oraz pomiary innych parametrów medium wypełniającego kawernę takie jak: ciśnienie, temperatura, prędkość propagacji ultradźwięków itp. Dane uzyskane z pomiarów echometrycznych są niezbędne do śledzenia procesu ługowania, jak również do oceny stateczności kawerny magazynowej podczas jej eksploatacji.

Na rynku światowym istnieje zaledwie kilka przedsiębiorstw, które wykonują pomiary geometrii podziemnych kawern solnych. Przedsiębiorstwa te używają sprzętu pomiarowego własnej produkcji, opracowanego według własnych technologii i nie udostępniają rozwiązań technologicznych na rynku.

Niniejsza praca przedstawia opracowanie autorskiej technologii pomiarowej opartej na echosondzie ultradźwiękowej służącej do geometryzacji podziemnych kawern przeznaczonych na magazynowanie węglowodorów w stanie ciekłym lub gazowym lub sprężonego powietrza.

Celem rozprawy było opracowanie rozwiązań umożliwiających wykonywanie pomiarów geometrii kawern magazynujących zarówno substancje ciekłe jak i gazowe. Realizowane prace miały na celu umożliwienie wykonywania pomiarów kształtu i rozmiarów kawern w sytuacji, kiedy strefa pomiarowa przesłonięta jest przez rury eksploatacyjne. Ponadto zastosowane rozwiązania przyczyniły się do zwiększenia dokładności i jakości wykonywanych pomiarów przy jednoczesnym skróceniu czasu ich trwania w stosunku do obecnie stosowanych rozwiązań.

Tezy pracy:

- Rozchodzenie fal ultradźwiękowych w ośrodkach warstwowych stanowi podstawę teoretyczną umożliwiającą pomiary geometrii kawern solnych w sytuacji, kiedy sonda pomiarowa umieszczona jest wewnątrz rur eksploatacyjnych.
- Rezonansowe fale ultradźwiękowe mogą być wykorzystywane do oceny grubości rur zapuszczonych do kawerny.
- Opracowane rozwiązania techniczne pozwalają na wytworzenie uniwersalnego urządzenia pomiarowego, które umożliwia wykonywanie pomiarów geometrycznych kawern wypełnionych zarówno medium gazowym jak i ciekłym oraz ich parametrów fizycznych przy znaczącej poprawie jakości otrzymywanych danych.

2 Sole kamienne

Sole kamienne są to skały osadowe pochodzenia chemicznego, powstające w warunkach suchego i gorącego klimatu w wyniku ewaporacji, czyli parowania naturalnych roztworów solnych. Skały solne są agregatami składającymi się z takich minerałów jak chlorki i siarczany sodu, wapnia, potasu i magnezu i mają zazwyczaj strukturę krystaliczną. Minerały ewaporacyjne wytrącają się w ściśle określonej kolejności zależnej od ich stężenia w roztworze w cyklu ewaporacyjnym. W pierwszej kolejności wytrącają się węglany wapnia i magnezu tworząc skały węglanowe, następnie siarczany gipsu i anhydryt, kolejno sól kamienna, na końcu sole potasowe i potasowo-magnezowe. Zespół warstw powstały w wyniku tego procesu nosi nazwę cyklotemu. Cykliczne powtarzanie się cyklotemów tworzy kompleksy skalne o miąższości od kilkuset do kilku tysięcy metrów. Kompleksy te mogą być również poprzedzielane warstewkami piaskowcowymi i innymi skałami ilastymi bądź marglami (Czapowski i Bukowski, 2009; Kunstman i in., 2009; Kuc, 2016). Sól kamienna należy do skał monomineralnych, złożonych z kryształów tylko jednego minerału skałotwórczego, którym jest halit. Sól kamienna jest rozpuszczalna w wodzie, natomiast pozostałe skały monomineralne takie jak anhydryt czy gips są słabo rozpuszczalne bądź są zupełnie nierozpuszczalne w wodzie. Bardzo dobrze rozpuszczalne są natomiast skały polimineralne złożone z halitu i solnych minerałów potasowo-magnezowych. Niektóre podstawowe parametry fizyczne głównych minerałów występujących w złożu solnym są przedstawione w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Własności fizyczne głównych minerałów występujących w złożu solnym. (Kunstman i in., 2002).

Nazwa i wzór chemiczny minerału	Twardość wg skali Mohsa	Gęstość właściwa, [Mg.m ⁻³]	Rozpuszczalność	Rozpuszczalność procentowa w wodzie o temperaturze 20°C
Halit NaCl	2,0	2,168	Łatwo rozpuszczalny	26,4%
Sylwin KCl	2,2	1,197	Łatwo rozpuszczalny	25,6%
Karnalit KCl·MgCl ₂ ·6H ₂ O	2,7	1,602	bardzo łatwo rozpuszczalny	27,3% higroskopijny
Kizeryt MgSO ₄ ·H ₂ O	3,7	2,573	rozpuszczalny	higroskopijny
Anhydryt CaSO ₄	3,8	2,985	nierozpuszczalny	bd
Gips CaSO ₄ ·2H ₂ O	2,0	2,320	bardzo trudno rozpuszczalny	bd
Langbeinit K ₂ SO ₄ ·2MgSO ₄	4,2	2,825	trudno rozpuszczalny	bd
Polihalit K ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ ·2CaSO ₄ ·2H ₂ O	3,6	2,775	bardzo trudno rozpuszczalny	bd
Kainit KCl·MgSO ₄ ·3H ₂ O	3,0	2,132	rozpuszczalny	bd

bd – brak danych

Obok głównych składników, wyżej wymienionych skał, mogą występować również inne skały i minerały domieszkowe. Najczęściej są to skały ilaste, które w zależności

od ilości halitu można podzielić na ility solne (halit <15%), zubry (halit 15 % - 85%) i sole ilaste (halit >85%).

Skały serii solnych charakteryzują się różną strukturą i teksturą, które są wymienione w tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Struktura i tekstura głównych skał w złożach solnych (Gruszczyk, 1984)

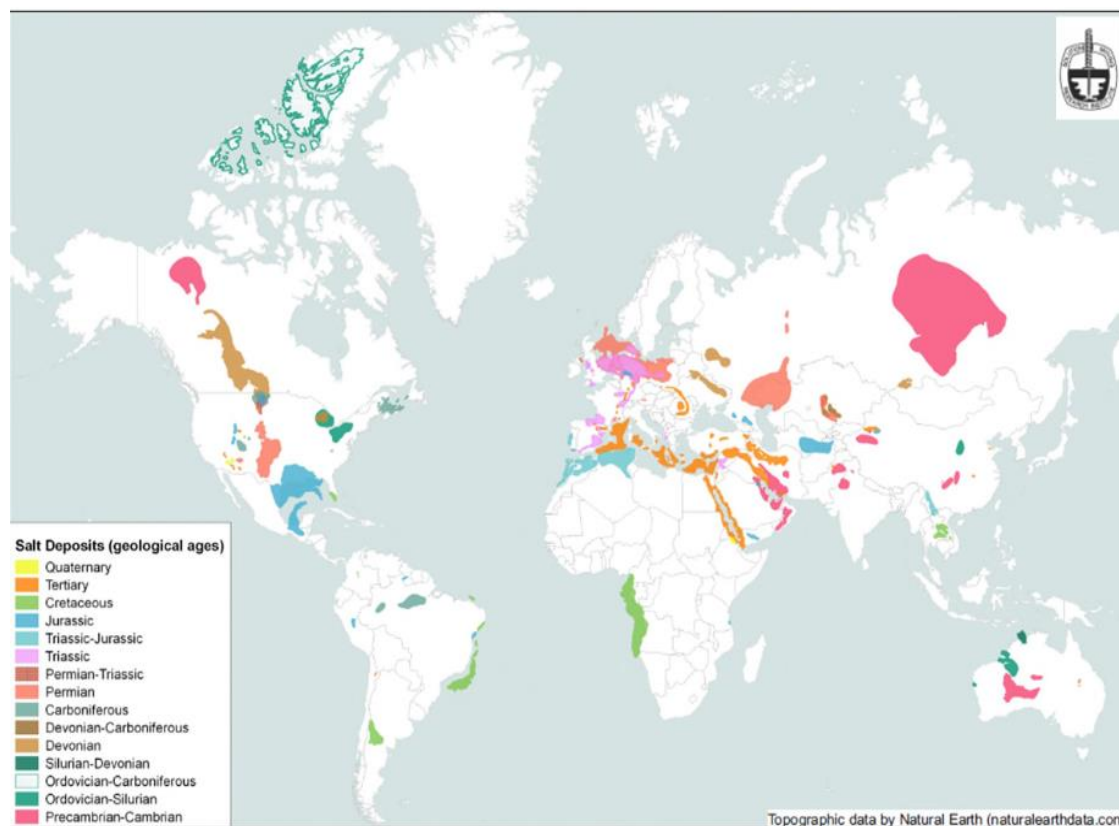
Nazwa skały	Struktura	Tekstura
Gips	Krystaliczna, zbita, drobnogruzelkowa/agregatowa, gruboziarnista, wielkoziarnista	Bezlądna, równoległa, włóknista, brekcjowa
Anhydryt	Krystaliczna drobnogruzelkowa	Masywna, bezładna, warstwowa, łupkowa
Sól kamienna	Krystaliczna, drobnziarnista <1 mm, średnioziarnista 1-5 mm, gruboziarnista > 5 mm	Masywna, bezładna, warstwowa, uławiconą, brekcjowa
Sole potasowo-magnezowe	Krystaliczna, różnoziarnista	Bezlądna, warstwowa, łupkowa, kierunkowa

Złoża soli kamiennej pod kątem budowy tektonicznej występują w dwóch głównych formach: złoża pokładowe i złoża wysadowe. Złoża pokładowe zalegają zwykle zgodnie z skałami otaczającymi lub są lekko sfałdowane lub występują w soczewkach poziomych. Złoża pokładowe mogą osiągać miąższość do kilkuset metrów tworząc rozległe kompleksy ciągnące się na dziesiątki kilometrów, a ich budowa geologiczna jest łatwo przewidywalna. Złoża wysadowe często występują niezgodnie ze skałami otaczającymi, które uległy silnym deformacjom tektonicznym. Wysady solne mogą występować w postaci intruzji szczelinowych czy też fałd solnych. Wysady solne zwane są również diapirami. Przyjmują bardzo zróżnicowane kształty i rozmiary. Zwierciadło solne, będące stropem soli, może mieć powierzchnię od kilku do kilkudziesięciu kilometrów kwadratowych, a wysokość wysadu solnego może sięgać do kilkuset metrów. Zwierciadło soli zwykle przykryte jest czapą gipsową o miąższości do kilkudziesięciu metrów. Wewnętrzna budowa wysadów jest bardzo skomplikowana ze względu na silne sfałdowania i deformacje tektoniczne warstw skalnych (Czapowski i Bukowski, 2009; Kunstman i in., 2009; Czapowski i Tarkowski, 2018).

2.1 Występowanie złóż soli kamiennej

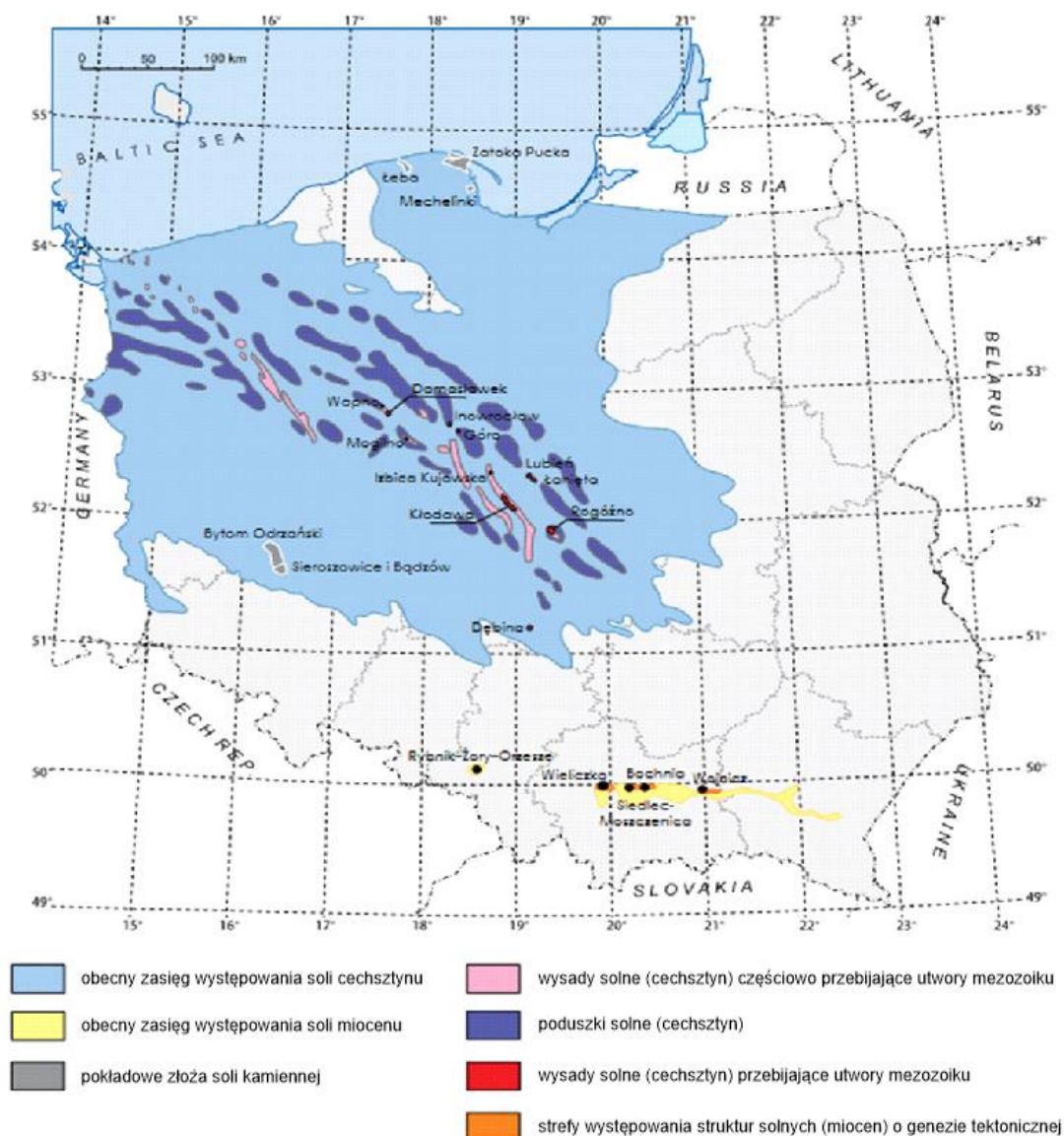
Niektóre złoża soli kamiennej zaczęły tworzyć się już w prekambrze. Rozmieszczenie złóż soli na świecie jest bardzo nierównomierne, największe skupienia znajdują się na półkuli północnej (Rysunek 2.1). Złoża, z których obecnie pozyskuje się najwięcej soli kamiennej na świecie powstały w okresie permu. Są to złoża np. z europejskiego basenu cechsztyńskiego obejmującego zasięgiem m.in. Polskę, Niemcy, Danię, Holandię i Wielką Brytanię, ale również złoża Depresji Przeduralskiej znajdującej się w Rosji. Złoża triasowe występują m.in. we Francji, w basenie akwitańskim. Rozległe złoża jurajskie występują natomiast w obszarze Zatoki Meksykańskiej. Złoża, które powstały w paleogenie i neogenie znajdują się np. we Francji (basen alzacki), Hiszpanii (basen Ebro) oraz w Polsce i Ukrainie wypełniając zapadlisko przedkarpackie. Największe złożo soli kamiennej na świecie znajdują się w Ameryce Północnej oraz w Azji (Kuc, 2016; Hodbod i Czapowski, 2020). W Europie

największe złoża soli kamiennej występuje w Niemczech. Polska jest drugim krajem europejskim w kolejności zasobności tego surowca.



Rysunek 2.1 Rozmieszczenie złóż soli kamiennej z różnych epok na świecie (Hévin, 2019)

Polskie złoża soli kamiennej występują głównie w obrębie dwóch geologicznych formacji salinarnych: neogeńskich (miocenu) i górnopermskich (cechsztynu), formacje te zajmują łącznie ponad 2/3 powierzchni kraju (Czapowski i Bukowski, 2009; Czapowski i in., 2017). Na rysunku 2.2 przedstawiono mapę występowania złóż soli w Polsce.



Rysunek 2.2. Mapa występowania soli kamiennej w Polsce (Czapowski i in., 2017)

Pokładowe złoża soli cechsztyńskich zalegają na głębokościach od kilkuset do 2000 m w obrębie północnej Polski, rozciągając się od południa Łeby po Zatokę Pucką. W strefie przedsudeckiej zalegają na głębokościach ok. 500 – 2000 m i rozciągają się od okolic Nowej Soli i Głogowa w kierunku południowo wschodnim. Wysadowe złoża cechsztyńskie znajdują się na głębokościach od kilkuset do 7000 m w środkowej części Niżu Polskiego, w rejonie Kłodawy, Góry, w postaci kopuły, poduszek, słupów i grzebieni solnych.

Sole miocenne występują na południu Polski w obrębie zapadliska przedkarpackiego, od okolic Rybnika na zachodzie w kierunku wschodniej granicy kraju, przybierając formę wąskiego systemu fałdów i łusek tektonicznych o zmiennej miąższości do ok. 300 m (Kuc, 2016).

Zasoby soli cechsztyńskich odgrywają znaczną rolę w bilansie zasobów krajowych, w tym pokładowe sole stanowią ok. 29%, natomiast złoża wysadowe szacuje się na ok. 66%. Zasoby soli miocennych są znacznie mniejsze od cechsztyńskich i szacowane są na 4,8% (Hodobod i Czapowski, 2020).

2.2 Metody eksploatacyjne złóż soli

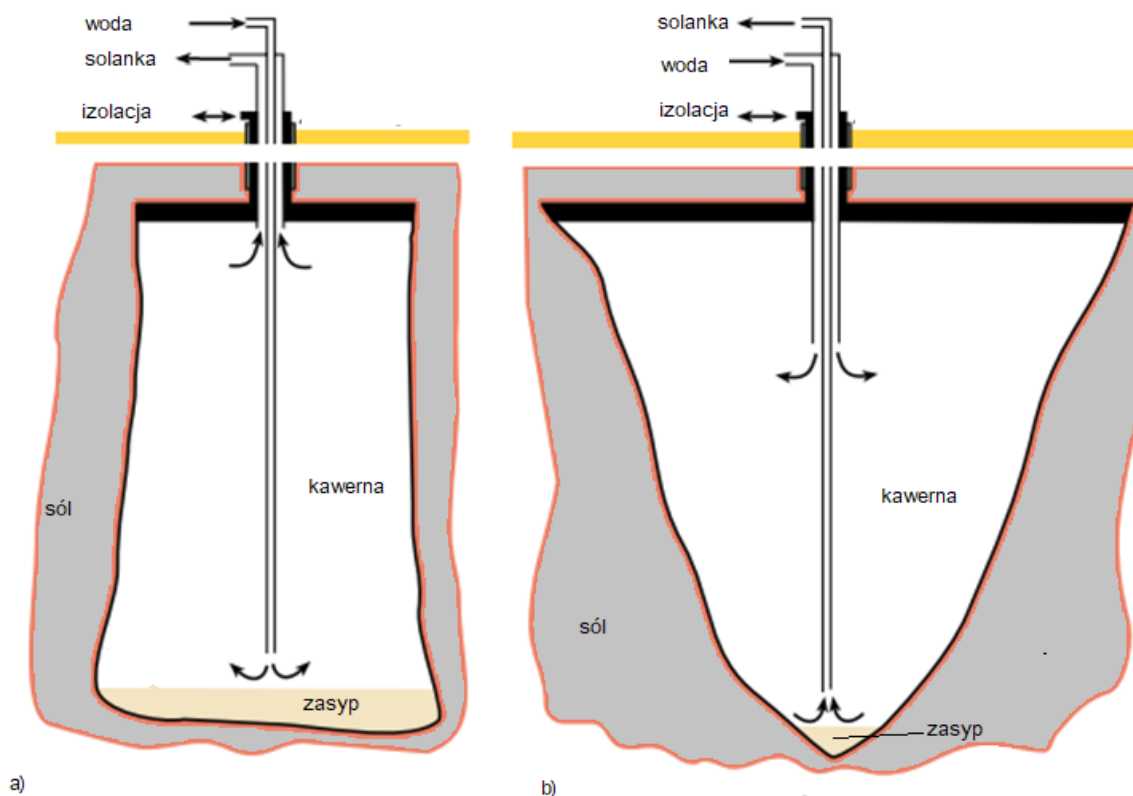
Jedną z metod pozyskania soli kamiennej w ilościach przemysłowych jest jej eksploatacja podziemna. Przykładem takiej eksploatacji w Polsce jest Kopalnia Soli w Kłodawie, gdzie wydobywanie soli realizowane jest w złożu wysadowym. Natomiast podziemna eksploatacja w złożu pokładowym prowadzona jest w Bądzowie przez Zakład Górniczy Polkowice – Sieroszowice. W zależności od specyfiki złoża eksploatację prowadzi się systemem komór właściwych, dostosowując technikę wydobywania do danego złoża oraz systemem komorowo-filarowym. Proces urabiania soli przy eksploatacji podziemnej można podzielić na dwie podstawowe metody, metodę strzelniczą oraz metodę z wykorzystaniem kombajnów (Poborska-Młynarska, 2015).

Alternatywną metodą eksploatacji soli kamiennej jest metoda ługowania, która polega na rozpuszczeniu soli kamiennej w złożu przy użyciu słodkiej wody lub nienasyconego roztworu solnego. Następnie, powstały stężony roztwór chlorku sodu wydobywa się na powierzchnię otworem wiertniczym. Ługowanie soli może odbywać się w kopalniach podziemnych, w komorach dostępnych z chodników bądź poprzez otwory wykonywane z poziomów kopalnianych lub otworów odwierconych z powierzchni.

Obecnie ługowanie złóż soli kamiennej otworami odwierconymi z powierzchni jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod wydobywania tego surowca. W zależności od tego, czy otwór wiertniczy przeznaczony jest do eksploatacji soli czy też do budowy kawerny magazynowej stosuje się odpowiednią zabudowę rurową. W przypadku eksploatacji złóż wysadowych w celu stabilizacji części przypowierzchniowej otworu podczas wiercenia stosuje się uzbrojenie wgłębne złożone z kolumny wstępnej zapuszczonej do kilkunastu metrów. W następnej części umieszczona jest kolumna przewodnikowa sięgająca do czapy gipsowej, która służy do odizolowania otworu od poziomów wodonośnych. Ostatnią kolumną rur jest kolumna techniczno-eksploatacyjna sięgająca poniżej stropu zwierciadła solnego, która jest zacementowana na całej długości, aż do powierzchni terenu. W przypadku budowy kawern magazynowych uzbrojenie otworu uzupełnione jest o kolumnę pośrednią, która sięga poniżej stropu zwierciadła soli, a kolumna techniczno-eksploatacyjna sięga głębokości posadowienia przyszłej kawerny magazynowej (Kunstman i in., 2002).

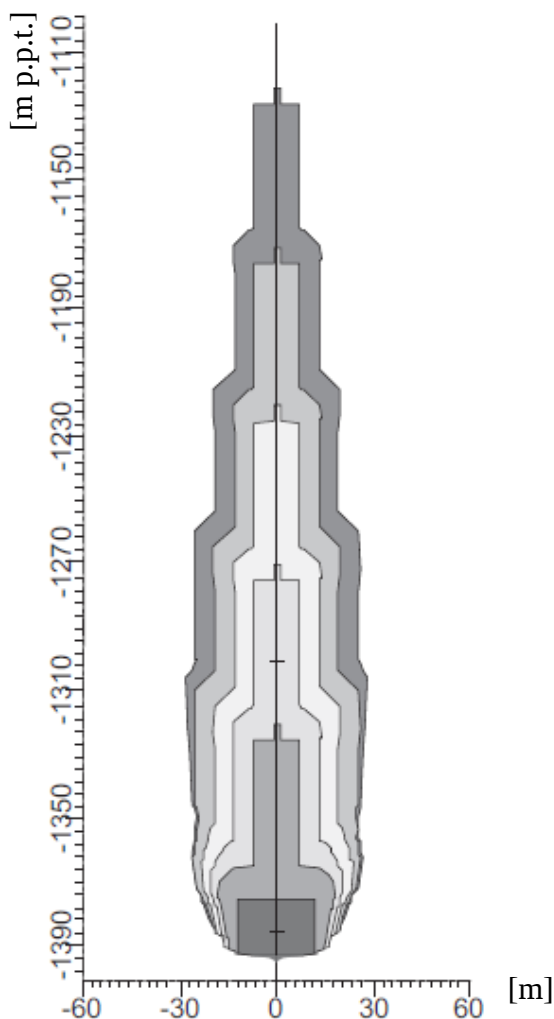
Wydobywanie soli metodą ługowania otworowego wykonuje się przez wpompowanie słodkiej wody bądź solanki nienasyconej do otworu odwierconego w złożu przez środkową przestrzeń albo przez przestrzeń między eksploatacyjnymi rurami wolno-wiszącymi podwójnej rury ługowniczej. Druga wewnętrzna przestrzeń służy natomiast do odprowadzenia solanki z kawerny na powierzchnię. W zależności od wybranego sposobu ługowania, tj. obiegu prawego lub obiegu lewego albo przestrzeń wewnętrzna albo przestrzeń międzyrurowa może służyć do zatłaczania wody lub odbioru solanki. Obieg prawy występuje w sytuacji, kiedy medium ługujące pompowane jest przez wewnętrzną przestrzeń, natomiast solanka przez przestrzeń międzyrurową (Rysunek 2.3a). Odwrotny przepływ nazywany jest obiegiem lewym (Rysunek 2.3b). Obieg prawy stosuje się w celu uzyskania w miarę równomiernego przyrostu objętości kawerny na całej jej wysokości ponad poziomem położenia buta rur wodnych przy jednoczesnym niskim stężeniu solanki wydobywanej z kawerny. Obieg lewy stosuje się, kiedy niezbędne jest uzyskanie wyższego stężenia solanki,

która nadaje się do celów produkcyjnych, jednak w takim przypadku kształt kawerny w części stropowej może ulec znacznemu poszerzeniu, szczególnie kiedy woda podawana jest bezpośrednio pod strop. W celu uzyskania regularnego kształtu kawerny oraz wysokiego stężenia solanki stosowany jest obieg lewy, a buty rur ługowniczych zapuszczone zostają w dolnej części strefy eksploatacyjnej w odległości ok. 15-30 m od siebie (Kunstman i in., 2002; Warren, 2016).



Rysunek 2.3 Schemat ługowania kawerny a) w obiegu prawym oraz b) w obiegu lewym (Warren, 2016)

W czasie ługowania kawerny rozwijają się w kierunku stropowo-bocznym. Dlatego, aby kontrolować proces rozwijania się kawerny, stosowana jest izolacja stropu. Do tego celu pod strop komory podaje się medium izolacyjne, którym najczęściej jest olej solarowy, ropa naftowa lub paliwa, czy sprężony azot. Aby uzyskać wymagany kształt kawerny i/lub uzyskać właściwe parametry solanki należy odpowiednio zmieniać położenie rur ługowniczych w otworze oraz położenie izolacji, jak również odpowiednio manewrować wydajnością zatłaczania medium ługującego przy zastosowaniu właściwego obiegu ługowania. Prawidłowy rozwój komory podczas ługowania metodą stropowo boczną powinien być taki jak na rysunku 2.4.

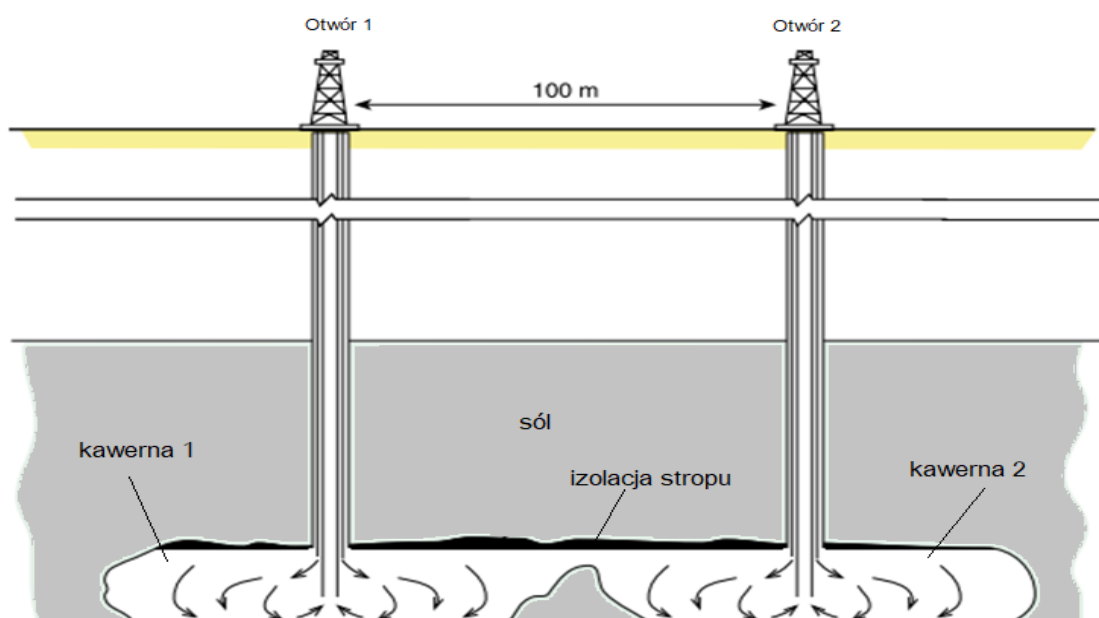


Rysunek 2.4 Prawidłowy rozwój kawerny podczas ługowania techniką stropowo-boczną (Kunstman i in., 2002)

Wszystkie powyżej wymienione czynności techniczne wpływają na ostateczny kształt i rozmiary wyługowanej kawerny. Podczas procesu eksploatacji powstający rozkład stężeń solanki w kawernie istotnie wpływa na jej rozwój. Między izolacją stropu a końcem rury wodnej następuje turbulentne mieszanie się solanki z wodą, co powoduje równomierny przyrost objętości kawerny na całej jej wysokości powyżej rur wodnych. Pomiedzy rurami wodnymi i solankowymi, w przypadku obiegu lewego, następuje separacja grawitacyjna solanki, która charakteryzuje się gradientowym rozkładem stężenia solanki w komorze. Powoduje to zmianę kąta nachylenia ścian kawerny w tej strefie i zmniejszenie prędkości ługowania w kierunku głębokości posadowienia rur solankowych. Poniżej rury solankowej występuje tak zwana strefa stagnacji, inaczej zwana strefą martwą, w której ługowanie ścian kawerny już praktycznie nie postępuje z powodu maksymalnego nasycenia solanki. Spągowa część kawerny nazywana rząpiem lub zasypem i jest miejscem agregacji części nierozpuszczonych, które grawitacyjnie opadają na spąg kawerny (Kunstman i in., 2002).

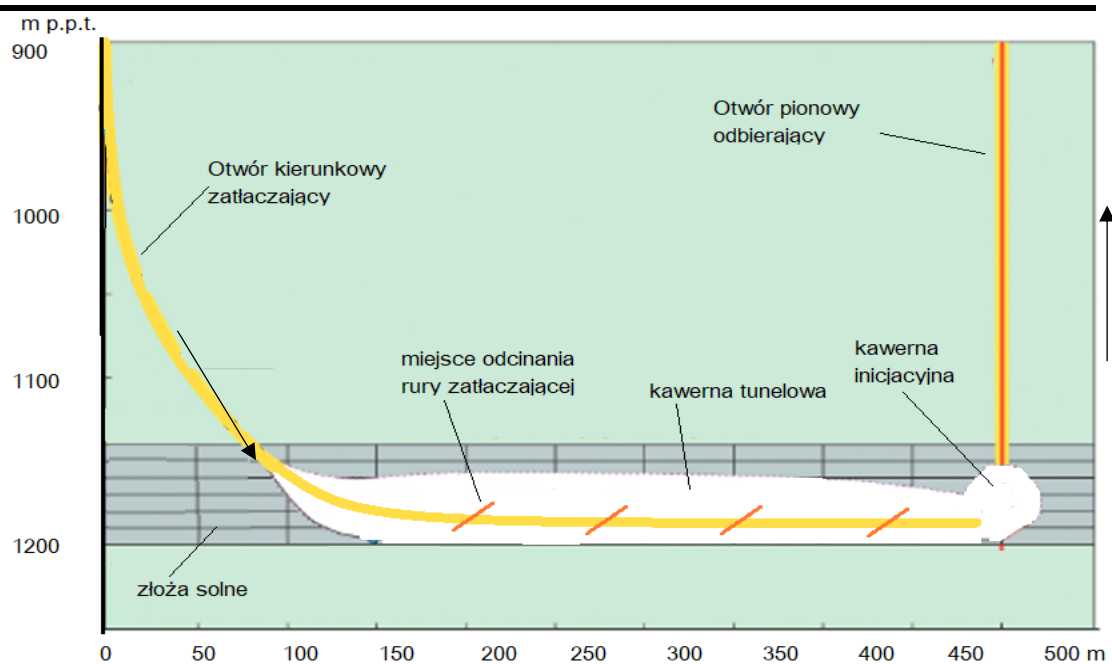
W przypadku warstw o małej miąższości wydobywanie złóż soli metodą ługowania z pojedynczego pionowego otworu może być ekonomicznie nieopłacalne. Dlatego w takich sytuacjach kilka otworów pionowych łączy się ze sobą tworząc kawerny

połączone lub tworzy się tzw. kawerny tunelowe za pomocą poziomych otworów wiertniczych, które łączą się z kawerną pojedynczą. Aby wykonać kawerny połączone, należy w pierwszej kolejności odwiercić przynajmniej dwa otwory położone od siebie w odpowiedniej odległości i wyługować w złożu niskie wręby aż do ich wzajemnego połączenia (Rysunek 2.5). Połączenie takie może być zrealizowane poprzez szczelinowanie hydrauliczne lub torpedowanie hydrauliczne (Urbańczyk, 2021). Eksploatację prowadzi się z izolacją stropu, która jest wprowadzana do każdego otworu. Po uzyskaniu połączenia hydraulicznego między komorami następuje eksploatacja właściwa polegająca na zatłaczaniu jednym otworem medium ługującego i wydobywanie solanki z drugiego otworu (Warren, 2016). Stosowanie takiej technologii pozwala na lepszą eksploatację płytkich złóż soli. Jednak ze względu na kształt ługowanych wrębów w pierwszej fazie, część spągowa złoża nie jest efektywnie wykorzystana, a rozległe stropy mogą powodować niestabilność geomechaniczną powstałych kawern, co w konsekwencji może powodować obrywy stropu, a nawet powstawanie zapadlisk na powierzchni.



Rysunek 2.5 Ługowanie w systemie komór połączonych (Warren, 2016)

W metodzie ługowania tunelowego za pomocą metod kierunkowych wierci się otwór, który biegnie poziomo w spągowej części złoża w kierunku kawerny inicjacyjnej wykonanej z drugiego otworu pionowego. Kawerna pozioma tworzona jest z otworu poziomego, za pomocą którego podawane jest medium ługujące, a powstała w ten sposób solanka odbierana jest przez kawernę inicjacyjną, w której ulega dosycaniu. Istnieje wiele wariantów ługowania kawern poziomych. Na przykład do otworu poziomego zapuszcza się wiele równoległych rur, którymi podawane jest medium ługujące lub też następuje sukcesywne skracanie rur zatłaczających wodę do złoża w miarę postępu ługowania, czy też następuje zmiana kierunku zatłaczania medium ługującego (Rysunek 2.6) (Li i in., 2020; Ban i in., 2021). Dzięki zastosowaniu odpowiedniej technologii ługowania możliwa jest bardzo efektywna eksploatacja złoża oraz dobra kontrola kształtu powstających w złożu komór.

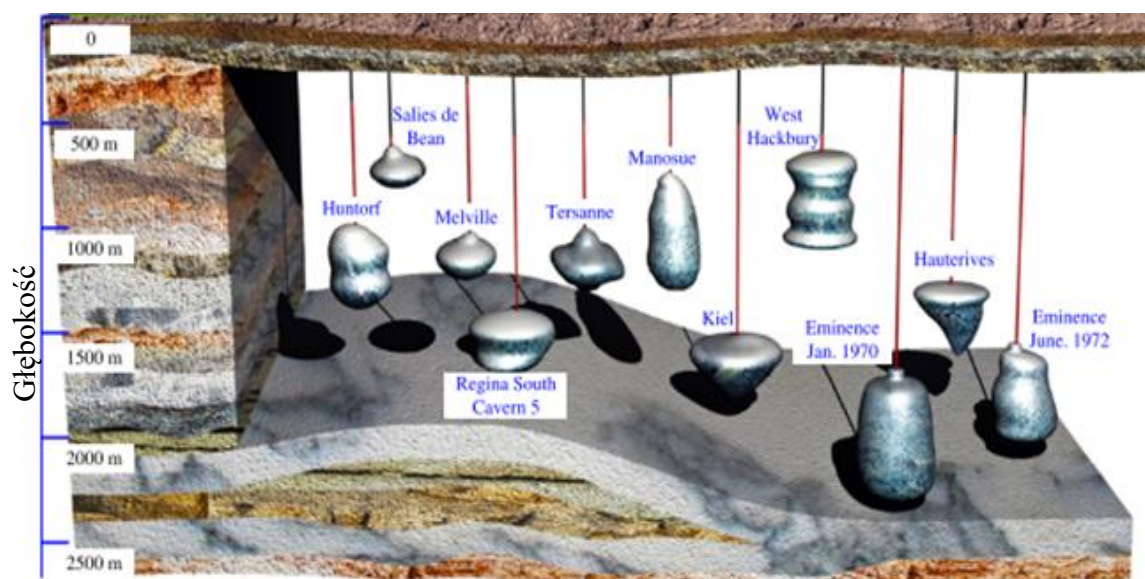


Rysunek 2.6. Sposób eksploatacji warstw soli o małej miąższości metodą tunelową (Ban i in., 2021)

3 Kawerny magazynowe

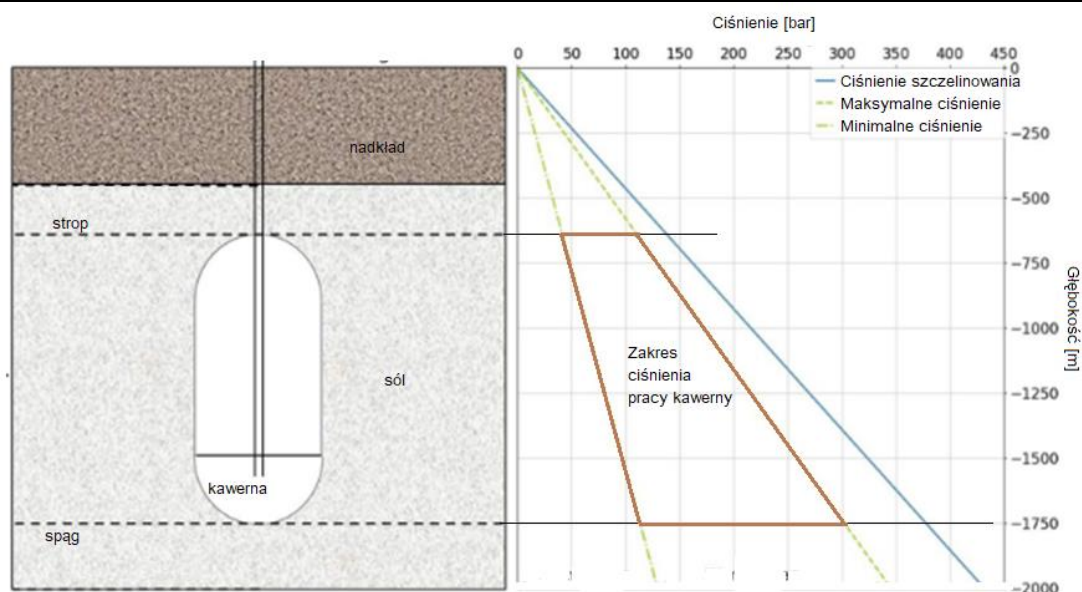
Wymagania stawiane podczas tworzenia kawern magazynowych są znacznie większe niż dla komór ługowniczych, które służą jedynie do produkcji solanki. Kawerny magazynowe powinny cechować się odpowiednią pojemnością oraz szczelnością jak również statecznością geomechaniczną w długim okresie magazynowania substancji. Bardzo ważne jest zatem wykonywanie kawern przeznaczonych na magazyny zgodnie z wymaganiami projektowymi, które określają m.in. głębokość posadowienia, kształty i rozmiary docelowe komór.

Kawerny magazynowe lokalizowane są w złożach zarówno pokładowych jak i wysadowych. Najczęściej głębokości posadowienia komór wynoszą od kilkuset metrów do prawie 2000 metrów. Z powodu wzrostu kosztów związanych z pompowaniem produktu wraz z głębokością kawerny magazynujące produkty płynne lokalizowane są zazwyczaj na mniejszych głębokościach. Kawerny magazynujące produkty gazowe natomiast lokuje się głębiej, dzięki temu umożliwiają one magazynowanie medium pod większym ciśnieniem, a tym samym posiadają one większe zdolności magazynowe. Przykładowe głębokości posadowienia i kształty niektórych kawern gazowych na świecie są przedstawione na rysunku 3.1.



Rysunek 3.1 Głębokości posadowienia oraz kształty kawern magazynujących gaz na świecie (Wang i in., 2014)

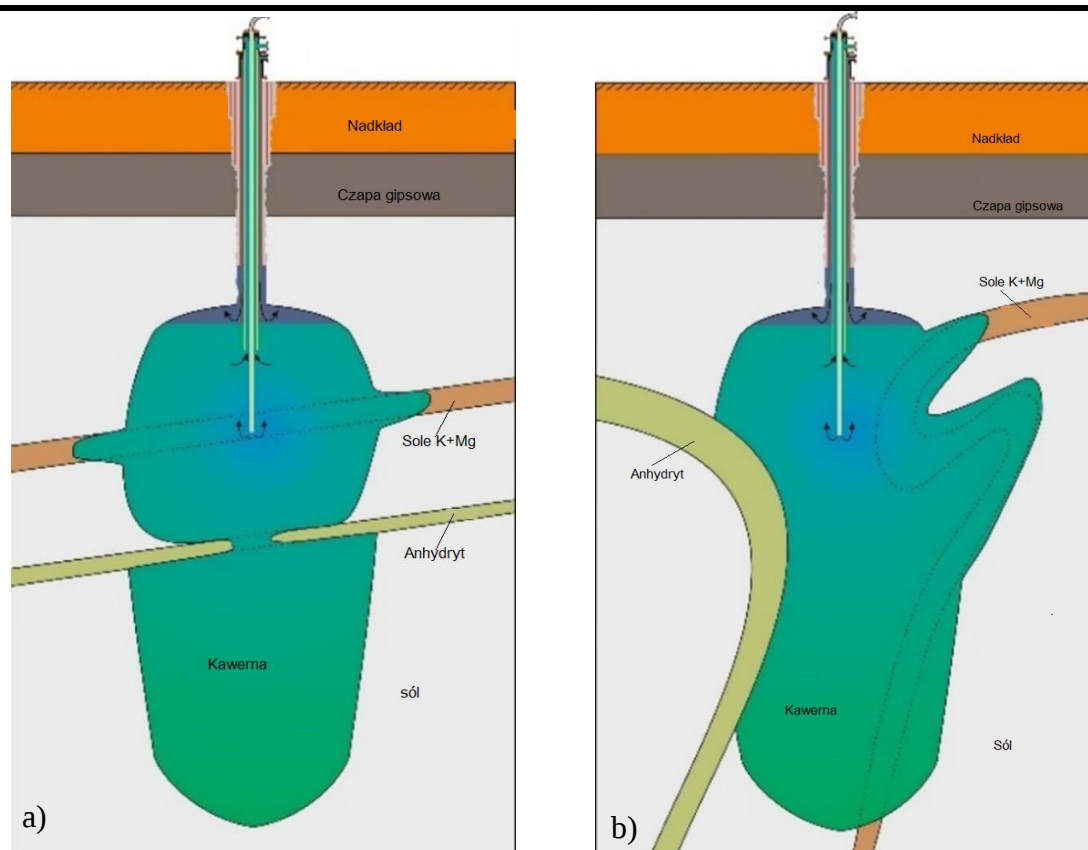
Głębokość ulokowania kawerny determinuje również zakres ciśnień w jakich komora może magazynować daną substancję (Rysunek 3.2). Zbyt niskie ciśnienie powoduje szybsze zaciskanie się górotworu solnego pod wpływem konwergencji, natomiast przekroczenie ciśnienia szczelinowania górotworu będzie powodowało niszczenie struktury skały solnej. Nieprawidłowy zakres ciśnień w kawernie magazynowej może zatem skutkować utratą jej szczelności na skutek powstałych deformacji i odkształceń (Kunstman i in., 2009; Caglayan i in., 2020).



Rysunek 3.2 Zakres ciśnień roboczych kawerny magazynowej w zależności od głębokości posadowienia kawerny (Caglayan i in., 2020)

Wytwarzanie kawern o odpowiedniej geometrii uwarunkowane jest przede wszystkim budową geologiczną złoża solnego. Znaczne zróżnicowanie właściwości geomechanicznych skał solnych, spowodowane ich składem mineralnym czy też litologią skał i tektoniką geologiczną warstw w złożu, powoduje trudności w uzyskaniu zaprojektowanego kształtu kawerny.

Zanieczyszczenia soli kamiennej anhydrytem lub minerałami ilastymi hamują proces ługowania skały solnej i prowadzą do znacznego przyrostu spągu, co negatywnie wpływa na docelową objętość kawerny. Występowanie warstw skał nierozpuszczalnych, głównie anhydrytu zniekształca kształt komory tworząc zwężenia bądź półki, co może powodować również problemy techniczne związane z uszkodzeniem rur ługowniczych podczas procesu eksploatacji soli. Z kolei obecność soli potasowo-magnezowych powoduje niekontrolowany przyrost komory, który może prowadzić do powstawania kieszeni i pułapek, a także połączeń międzykomorowych. Końcowe kawerny w złożu pokładowym i wysadzie solnym kształtowane pod wpływem obecności warstw anhydrytu i warstw soli potasowo-magnezowych przykładowo przedstawiono na Rysunkach 3.3a i 3.3b.



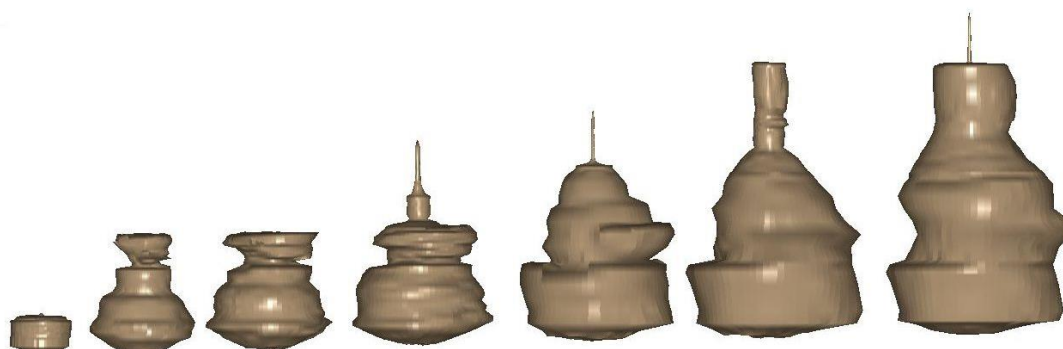
Rysunek 3.3. Przykładowy przebieg ługowania i końcowy kształt komory wynikający z wpływu budowy geologicznej złoża a) pokładowego, b) wysadowego

W jednolitych złożach pokładowych proces tworzenia kawern magazynowych jest bardziej przewidywalny niż w złożach wysadowych. Złoża pokładowe zasadniczo są lepiej rozpoznane ze względu na zachowywanie ciągłości warstw w obrębie planowanej kawerny. W złożach wysadowych nawet bardzo dokładne profile otworowe nie zapewniają pełnego rozpoznania w obszarze tworzonej kawerny.

Klasyczny proces ługowania kawern magazynowych składa się z czterech charakterystycznych etapów (Chromik i Korzeniowski, 2021):

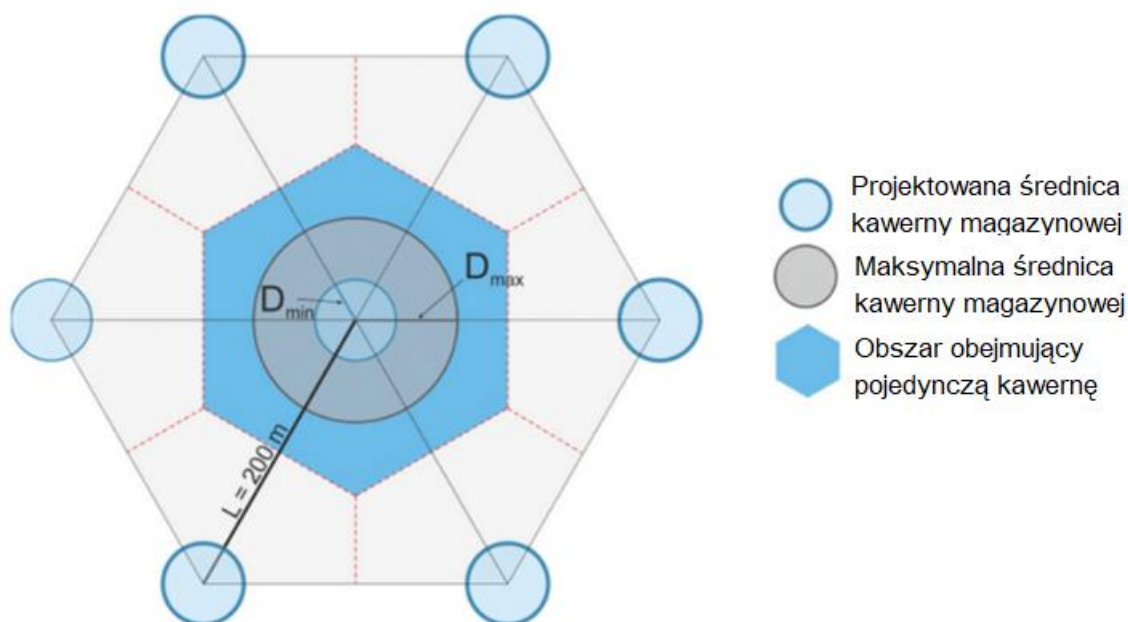
- Etap 1 – ługowanie wrębu;
- Etap 2 – ługowanie główne kawerny;
- Etap 3 – ługowanie kopuły stropowej;
- Etap 4 - ługowanie szyi komory.

W pierwszym etapie ługowana jest kawerna, która służy przede wszystkim do gromadzenia części nierozpuszczalnych występujących w złożu. Odpowiednie wykonanie wrębu pozwala na uzyskanie pożądanego kształtu i pojemności docelowej kawerny. Kolejny etap jest wielofazowy, polegający na ługowaniu wyznaczonych stref w celu osiągnięcia projektowanego rozmiaru i kształtu kawerny. Trzeci etap polega na ługowaniu stropu kawerny, który powinien mieć kształt kopuły, co zapewnia jej stabilność geomechaniczną. Ostatni etap prac polega na wykonaniu tzw. szyi komory, czyli poszerzenia otworu bosego do średnicy od 1 m do 2 m między butem ostatniej kolumny rur zacementowanych a stropem kawerny. Odpowiednio wykonana szyja niweluje naprężenia górotworu solnego na uzbrojenie otworu. Proces rozwoju kawerny magazynowej wyługowanej w złożu soli pokładowej od wykonania wrębu aż do końcowego kształtu kawerny przedstawia Rysunek 3.4.



Rysunek 3.4 Proces budowy kawerny magazynowej w złożu pokładowym

Z punktu widzenia optymalnego zagospodarowania złoża soli oraz bezpieczeństwa magazynowanych substancji, kawerny magazynowe powinny być odpowiednio rozmieszczone w złożu. Najczęściej kawerny lokalizowane są w siatce trójkątów (Rysunek 3.5). Dla kawern magazynujących medium gazowe Instytut Badań Rozwiązań Górnictwa - SMRI (*Solution Mining Research Institute*) zaleca, aby odległości między osiami kawern wynosiły między 3,5 a 4,5 krotności ich średnicy (Kunstman i in., 2009). Dla kawern magazynujących substancje ciekłe, gdzie medium manewrowym jest solanka, odległości te mogą być mniejsze. W przypadku koncepcji magazynowania paliw płynnych w złożach pokładowych zaleca się, żeby odległość między sąsiednimi kawernami magazynowymi wynosiła 200 m (Lankof i in., 2022).



Rysunek 3.5 Optymalne rozmieszczenie kawern magazynowych paliw płynnych w złożu pokładowym (Lankof i in., 2022)

Zachowanie prawidłowych odległości minimalizuje ryzyko naruszenia filarów ochronnych między kawernami podczas procesu ługowania oraz zabezpiecza kawerny przed wzajemnym oddziaływaniem geomechanicznym przy jednocześnie maksymalnym wykorzystaniem zasobów.

3.1 Podział magazynów w złożach soli

Ze względu na rodzaj magazynowanej substancji zasadniczo kawerny dzieli się na:

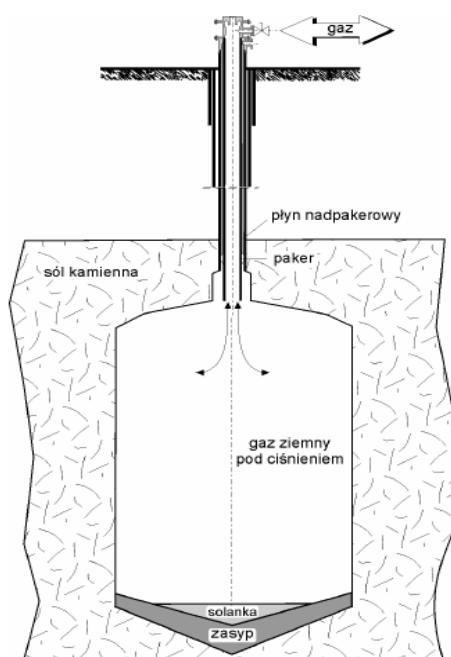
- kawerny magazynowe gazu,
- kawerny magazynowe substancji ciekłych.

3.1.1 Kawerny magazynowe gazu

Kawerny magazynowe gazu mogą być wykorzystywane do gromadzenia i przechowywania:

- gazu ziemnego,
- sprężonego powietrza,
- wodoru,
- dwutlenku węgla,
- chloru czy azotu.

Po wyługowaniu kawerny o odpowiednim kształcie i rozmiarach następuje usunięcie rur ługowniczych, zostają one zastąpione dwoma współśrodkowymi kolumnami rur gazoszczelnych, kolumną zatłaczania gazu oraz kolumną solankową. Kolumna zatłaczania gazu zapuszczona zostaje w okolicy szyi kawerny, natomiast kolumna solankowa w okolicy jej spągu. Gaz zatłaczany przez kolumnę pod odpowiednim ciśnieniem wypiera solankę przez rury solankowe. Po zakończeniu procesu napełniania komory, rury solankowe zostają wyciągnięte z kawerny. W kawernie pozostaje reszta solanki w części spągowej, a jej poziom uzależniony jest od położenia rur solankowych w czasie napełniania komory (Rysunek 3.6). Kawerna magazynowa gazu może pracować w ściśle określonym zakresie ciśnień, w związku z tym część zatłoczonego gazu do komory traktowana jest jako gaz buforowy. Kawerna może być używana do magazynowania gazu przez długi okres bądź do cyklicznego zatłaczania lub wytłaczania medium gazowego.

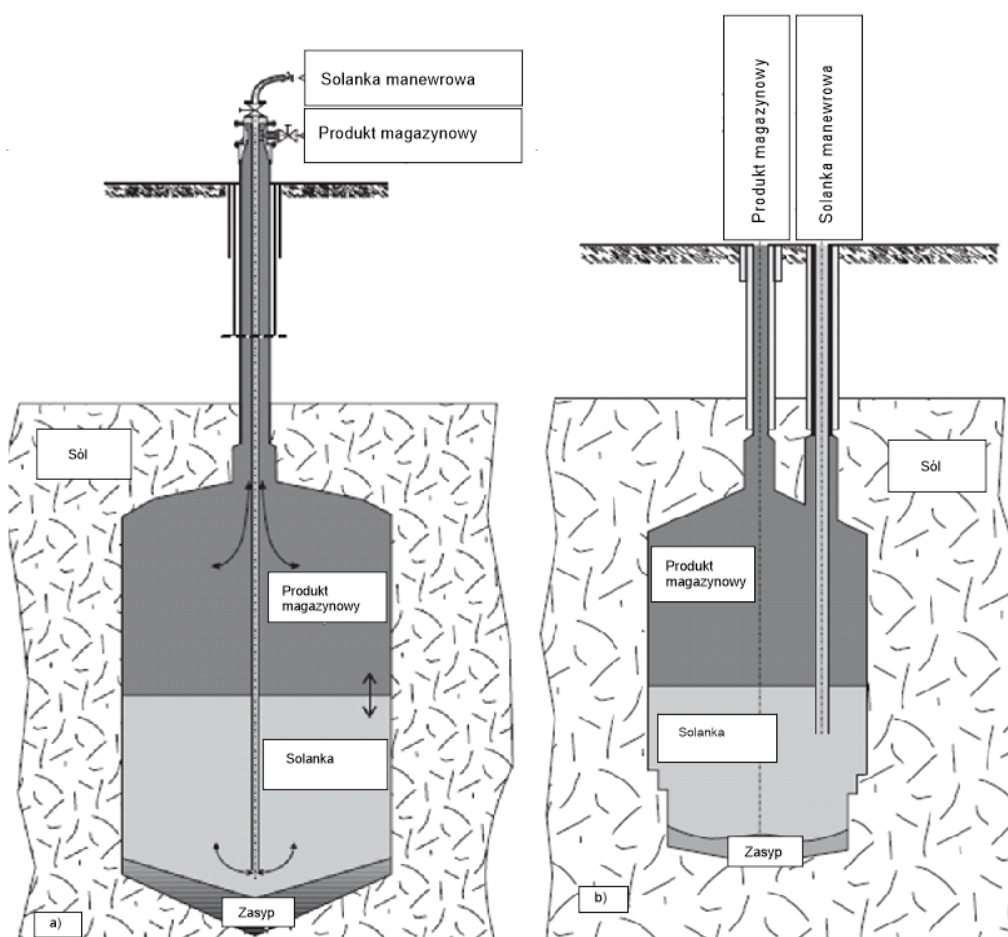


Rysunek 3.6 Kawerna używana jako magazyn gazu (Kunstman i in., 2002)

3.1.2 Kawerny magazynowe substancji ciekłych

Kawerny najczęściej służą jako magazyny następujących substancji ciekłych:

- Ropa naftowa,
- Paliwa: benzyny, olej napędowy, olej opałowy,
- Skroplone węglowodory gazowe, np. propan.



Rysunek 3.7 Kawerny magazynujące substancje ciekłych udostępnione a) jednym otworem, b) dwoma otworami (Kunstman i in., 2009)

Kawerny przeznaczone na magazynowanie substancji ciekłych muszą również spełniać odpowiednie parametry pod względem kształtu. W części magazynowej kawerny nie mogą występować żadne rozługowania stropowo boczne, ponieważ może to prowadzić do wypełnienia takich przestrzeni magazynowaną substancją bez możliwości jej odzyskania z kawerny. Do magazynowania substancji ciekłych jako medium manewrowego wykorzystuje się solankę. Magazynowana ciecz jest lżejsza od solanki i znajduje się w górnej części kawerny. Napełnianie komory prowadzone jest przez zatłaczanie pod strop magazynowanej cieczy, która wypycha solankę na powierzchnię. Proces opróżniania komory jest odwrotny. Zatłaczając solankę rurą manewrową do komory następuje wytłaczanie magazynowanego medium. Technologicznie kawerny przeznaczone na magazynowanie cieczy mogą mieć różną konstrukcję. Jednym z typów kawern magazynowych są kawerny udostępnione tylko jednym otworem wiertniczym, do którego na stałe zapuszczona jest kolumna rur manewrowych (Rysunek 3.7a). Drugim rozwiązaniem są kawerny, które są

udostępnione dwoma otworami wiertniczymi. Główny otwór służy do zatłaczania i wytłaczania magazynowanej cieczy natomiast w drugim otworze zapuszczona jest kolumna rur manewrowych, którą podaje się lub odbiera solankę. (Rysunek 3.7b). W obydwu przypadkach rury manewrowe zapuszczone są do poziomu poniżej planowanej maksymalnej głębokości magazynowania.

4 Ultradźwięki

Fale dźwiękowe to zaburzenia mechaniczne rozchodzące się przestrzennie w ośrodku sprężystym, które powodują drgania cząstek w postaci zaburzeń ciśnienia i gęstości pod wpływem impulsu akustycznego. W zależności od częstotliwości fale akustyczne są podzielone na fale infradźwiękowe, dźwiękowe, ultradźwiękowe oraz hiperdźwiękowe. Fale dźwiękowe słyszalne przez człowieka obejmują częstotliwości w zakresie 20 - 20 000 Hz, poniżej dolnej granicy mamy do czynienia z infradźwiękami, natomiast górna granica słyszalności wyznacza początek ultradźwięków. Tym terminem określa się fale sprężyste o częstotliwościach w zakresie 20 kHz - 1 GHz (10^6 kHz). Fale o częstotliwości powyżej tej wartości definiowane są jako hiperdźwięki (Ghassemi, 2019).

Fale ultradźwiękowe znajdują szerokie zastosowanie w zależności od ich natężenia i zakresu częstotliwości. Fale o dużym natężeniu służą między innymi do produkcji emulsji, zgrzewania czy też wiercenia i czyszczenia. Ultradźwięki o małym natężeniu są powszechnie stosowane w badaniach medycznych i pomiarach przemysłowych. Zastosowanie techniki ultradźwiękowej umożliwia wykrywanie nieciągłości wewnętrznych w przedmiotach, pomiary rozmiarów obiektów, odległości i prędkości przepływu, pozwala również na wyznaczenie stałych sprężystości badanych materiałów oraz na diagnostykę medyczną.

4.1 Rozchodzenie się fal ultradźwiękowych

Falę rozchodzącą się wzdłuż osi x można opisać równaniem różniczkowym drugiego stopnia (Obraz, 1983):

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (4.1)$$

Rozwiązanie równania (4.1) ma postać:

$$U = A \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (4.2)$$

gdzie U jest funkcją opisującą ruch cząstki w kierunku x w chwili t ;

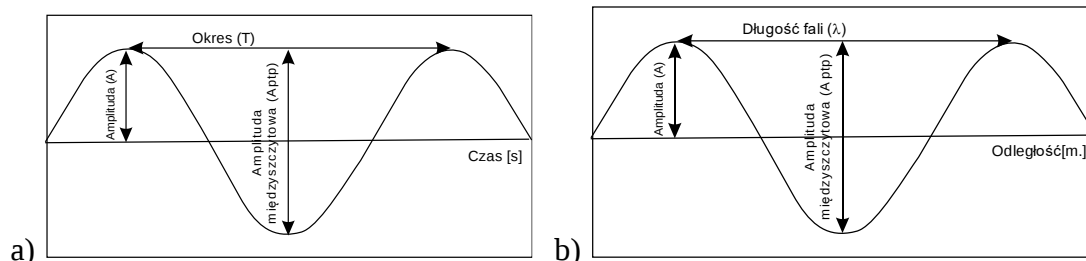
Parametry charakteryzujące fale akustyczne są to:

- Częstotliwość f wyrażona w Hercach określa liczbę cykli zmian ciśnienia bądź drgań cząstek na sekundę; ω - prędkość kątowna, $f = \omega / 2\pi$
- Okres T - parametr określający długość czasu trwania jednego cyklu drgań, $T = 2\pi / \omega$
- Amplituda A charakteryzuje największą wartość wychylenia cząstek ze stanu równowagi określona jako największe ciśnienie akustyczne czy największe zagęszczenie cząstek.
- Prędkość fali c określa tempo rozchodzenia się zaburzeń mechanicznych w ośrodku sprężystym.
- Długość fali λ to najmniejsza odległość między dwoma punktami znajdującymi się w tej samej fazie drgań, czyli punktami, dla których wychylenie jest takie same.

Podstawowe parametry fali przedstawiono na rysunku 4.1.

Podstawową relację wiążącą częstotliwość drgań cząstki ośrodka z długością rozchodzącej się w nim fali można opisać następującym równaniem:

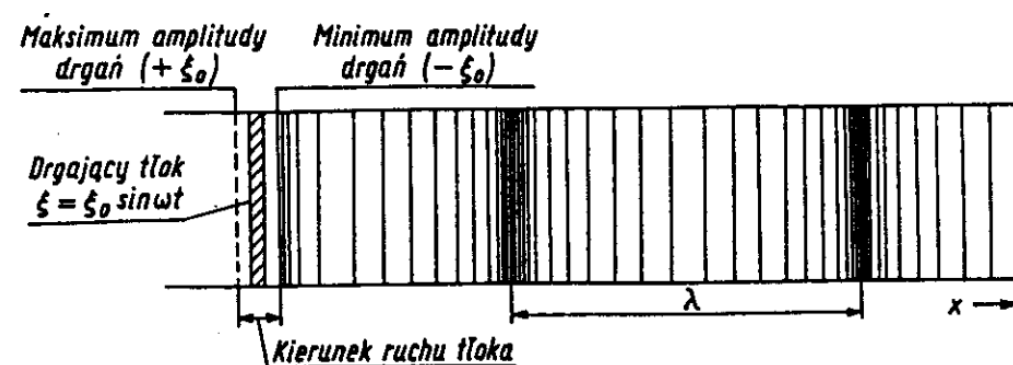
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4.3)$$



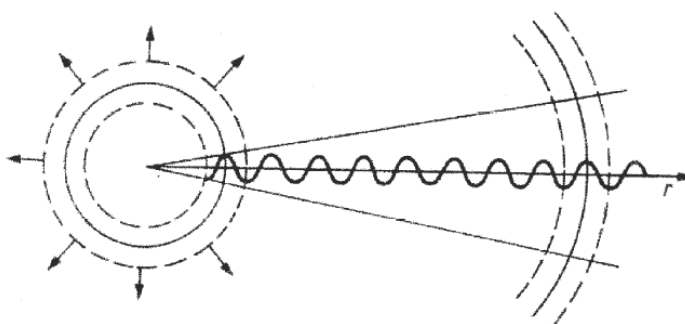
Rysunek 4.1 Parametry charakteryzujące fale a) w funkcji czasu, b) w funkcji odległości (Obraz, 1983)

Czoło fali to jest zbiór punktów, do których w danej chwili dociera zaburzenie o takiej samej fazie drgań. W zależności od kształtu czoła fali dzielimy je głównie na fale płaskie i fale kuliste (Rysunek 4.2).

Fala płaska jest to taka fala, w której zaburzenie rozchodzi się tylko w jednym kierunku, powierzchnie falowe są płaszczyznami, a promienie fali są równoległymi liniami.



a)



b)

Rysunek 4.2 Przykład przedstawiający a) fale płaskie oraz b) fale kuliste (Śliwiński, 2001)

Zaburzenie punktowe bądź kuliste tworzą natomiast falę kulistą, która rozprzestrzenia się promieniście w ośrodku zachowując kształt kulistej powierzchni drgającej. Fala kulista dla dużych odległości od źródła zaburzenia przechodzi w falę płaską. Ze

względem kierunku drgań cząstek w stosunku do kierunku rozchodzenia się fali możemy wyróżnić następujące rodzaje fal:

Fala podłużna - jest to fala, w której kierunek drgania cząstek pokrywa się z kierunkiem rozchodzenia się fal, w wyniku tego w obrazie falowym są strefy naciskania i strefy rozszerzania. Fale podłużne występują we wszystkich rodzajach ośrodków, w których mogą nastąpić odkształcenia objętościowe, czyli w ciałach stałych, cieczach i gazach.

Fale poprzeczne - są to fale, w których cząstki drgają w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia fali. Fale poprzeczne występują tylko w ciałach stałych bądź bardzo lepkich płynach, czyli ośrodkach, w których występuje odkształcenie postaci. Fale poprzeczne mają mniejszą prędkość niż fale podłużne.

Fale powierzchniowe - są to fale, które rozchodzą się w warstwie bliskiej powierzchni granicy dwóch ośrodków, np. przy powierzchni Ziemi. Fala powierzchniowa przenosi dużą energię, której spadek następuje wykładniczo wraz z głębokością. Dlatego grubość strefy rozchodzenia fali powierzchniowej jest cienka i wynosi kilka krotności długości fali. W zależności od trajektorii ruchu cząstek fale powierzchniowe są podzielone na fale Rayleigha i fale Love'a. W przypadku fal Rayleigha ruch cząstek odbywa się po smukłej elipsie, której płaszczyzna jest prostopadła do kierunku propagacji fali. W przypadku fali Love'a ruch cząstek odbywa się prostopadle do kierunku propagacji fali (Filipiak i in., 2015).

Fale Lamba są to fale płytowe, które rozprzestrzeniają się w przedmiotach takich jak płyty, pręty, których grubość zazwyczaj jest porównywalna z długością fali. Drgania cząstek związane są z nakładaniem się na siebie dwóch fal Rayleigha rozchodzących się w tym samym kierunku (Śliwiński, 2001).

4.2 Prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych

Prędkość rozprzestrzeniania się fal ultradźwiękowych związana jest ściśle z własnościami sprężystymi materiału budującego medium, w jakim te fale się rozchodzą.

W ciałach stałych oprócz odkształceń objętościowych występują również odkształcenia postaci, w związku z tym występują tu wszystkie rodzaje fal ultradźwiękowych. W środowisku izotropowym prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej jest taka sama we wszystkich kierunkach, natomiast w środowisku anizotropowym prędkość rozchodzenia ultradźwięków jest zależna od kierunku, czyli od struktury środowiska, w którym fala się rozchodzi.

Prędkość ultradźwiękowej fali podłużnej C_L wyraża się wzorem (Obraz, 1983):

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4.4)$$

Prędkość ultradźwiękowej fali poprzecznej C_T wyraża się wzorem

$$C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (4.5)$$

Dla ośrodka ograniczonego w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali, na przykład w płycie prędkość fali podłużnej wynosi:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1+\nu^2)}} \quad (4.6)$$

gdzie: E – moduł Younga [Pa]; G – moduł Kirchhoffa albo moduł sztywności [Pa]; ν – współczynnik Poissona [$0,2 < \nu < 0,5$]; ρ – gęstość ośrodka [kg/m^3].

Istotnym parametrem określającym ośrodek akustyczny jest impedancja akustyczna Z , która definiowana jest jako iloczyn prędkości fali dźwiękowej i gęstości ośrodka.

Tabela 4.1 Wartości parametrów sprężystości i prędkości rozchodzenia ultradźwięków w niektórych wybranych materiałach (Obraz, 1983)

Ośrodek	Gęstość $\rho[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Liczba Poissona N -	Moduł Younga E [GPa]	Moduł Kirchhoffa G [GPa]	Prędkość fali podłużnej C_L [m·s ⁻¹]	Prędkość fali poprzecznej C_T [m·s ⁻¹]	Impedancja akustyczna Z [Pa·s·m ⁻¹]
Stal	7800	0,28	208	80,0	5900-6000	3260	$46,3\cdot 10^6$
Nikiel	8800	0,31	200	76	5630	2960	$49,5\cdot 10^6$
Aluminium	2700	0,34	73	27	6320	3080	$17,0\cdot 10^6$
Miedź	8900	0,35	123	45,0	4700	2260	$42,0\cdot 10^6$
Ołów	11340	0,44	16	5,6	2100	700	$24,6\cdot 10^6$

W ciekłych i gazowych ośrodkach moduł sztywności $G=0$, więc nie rozchodzą się fale poprzeczne, a propagacja fali podłużnej zależy od modułu sprężystości objętościowej K i gęstości ρ . Dla cieczy prędkość ultradźwięków można obliczyć wzorem:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (4.7)$$

Przykładowe wartości prędkości fal ultradźwiękowych w wybranych cieczach i gazach są przedstawione w tabeli 4.2.

Tabela 4.2 Prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w wybranych cieczach o temperaturze 20 °C i 0 °C pod ciśnieniem normalnym (Śliwiński, 2001)

Ośrodek	Temperatura $t [^{\circ}\text{C}]$	Ciśnienie $P [\text{atm}]$	Gęstość $\rho[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Prędkość $C [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Impedancja akustyczna $Z [\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}]$
Woda	20	-	$0,997\cdot 10^3$	1483	$148\cdot 10^4$
Benzyna	20	-	$0,740\cdot 10^3$	1162	$86\cdot 10^4$
Olej napędowy	20	-	$0,830\cdot 10^3$	1359	$112,7\cdot 10^4$
Azot	0	1	$1,17\cdot 10^{-3}$	334	$39\cdot 10^{-2}$
Powietrze	0	1	$1,29\cdot 10^{-3}$	331	$42\cdot 10^{-2}$
Dwutlenek węgla	0	1	$1,18\cdot 10^{-3}$	259	$3\cdot 10^{-2}$
Wodór	0	1	$0,09\cdot 10^{-3}$	1284	$11\cdot 10^{-2}$

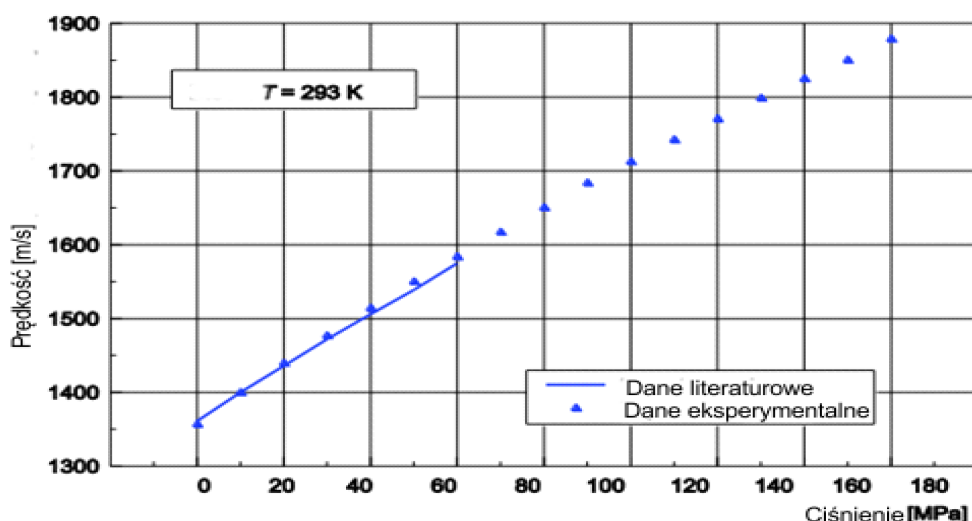
W cieczach prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej jest liniowo zależna od temperatury, zależność ta jest określona wzorem:

$$c(T) = c_0 + b(T - T_0) \quad (4.8)$$

gdzie: c_0 – prędkość w temperaturze początkowej [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]; b – współczynnik temperaturowy [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]; T – temperatura bezwzględna, T_0 – temperatura początkowa.

Przykładowo współczynnik temperaturowy dla wody to $2,5 [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, a dla benzyny - $4,14 [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ (Obraz, 1983).

Na prędkość propagacji fal ultradźwiękowych w cieczach oprócz temperatury wpływ ma także ciśnienie (Rysunek 4.3), a w przypadku mieszanin lub roztworów również stężenie rozpuszczonych w cieczy substancji (Al-Nassar i in., 2006).



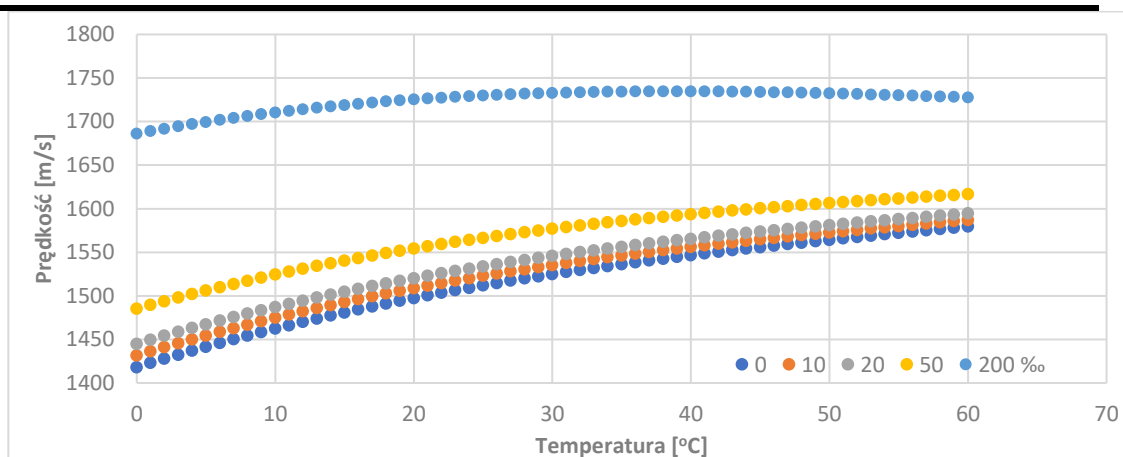
Rysunek 4.3 Prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w oleju napędowym jako funkcja zależna od ciśnienia (Nikolić i in., 2013).

Dla wody zasolonej istnieje kilka wzorów określających prędkość ultradźwięków w zależności od zasolenia, temperatury oraz ciśnienia. Jednym z głównych wzorów opisujących zależność prędkości ultradźwięków od tych parametrów jest wzór zaproponowany przez Medwina (1975).

$$c = 1449.2 + 4,6 t - 0.055 t^2 + 0.00029 t^3 + (1.34 - 0.010 t) (S - 35) + 1.58 \cdot 10^{-6} P \quad (4.9)$$

gdzie: c – prędkość ultradźwięków w wodzie zasolonej [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]; t – temperatura [$^{\circ}\text{C}$]; S – zasolenie [%]; P – ciśnienie [atm];

Na podstawie wzoru (4.9) obliczono prędkość ultradźwięków w zależności od temperatury dla roztworu soli o stężeniu od 0 do 200‰ przy ciśnieniu 100 atm i przedstawiono na rysunku 4.4.



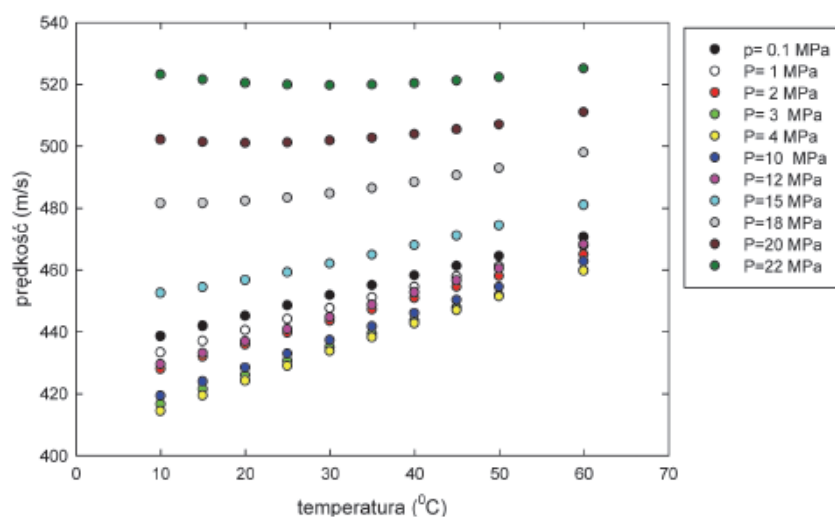
Rysunek 4.4 Zależność prędkości ultradźwięków od temperatury roztworu soli o stężeniu od 0‰ do 200‰ dla ciśnienia 100 atm.

Dla gazów moduł sprężystości objętościowej K jest równy iloczynowi ciśnienia p oraz stosunku ciepł właściwych $\chi = c_p/c_v$ (gdzie: c_p - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, c_v - ciepło właściwe przy stałej objętości).

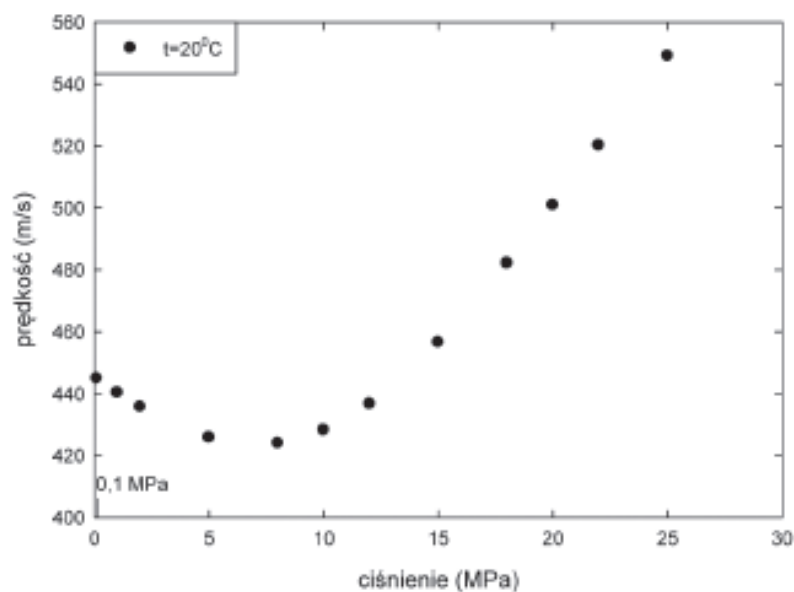
W związku z tym równanie (4.7) przyjmuje postać:

$$c = \sqrt{\frac{\chi \cdot p}{\rho}} \quad (4.10)$$

Zasadniczo prędkość ultradźwięków w gazach jest mniejsza niż w cieczach. Dla metanu prędkość fal ultradźwiękowych rośnie ze wzrostem temperatury (Rysunek 4.5). Przy stałej temperaturze prędkość ultradźwięków w metanie maleje przy wzroście ciśnienia do ok. 7 MPa, po tym ciśnieniu prędkość zaczyna wzrastać (Rysunek 4.6).



Rysunek 4.5 Prędkość rozchodzenia fali ultradźwiękowej w metanie jako funkcja zależna od temperatury i ciśnienia (Nguyen i in., 2019)

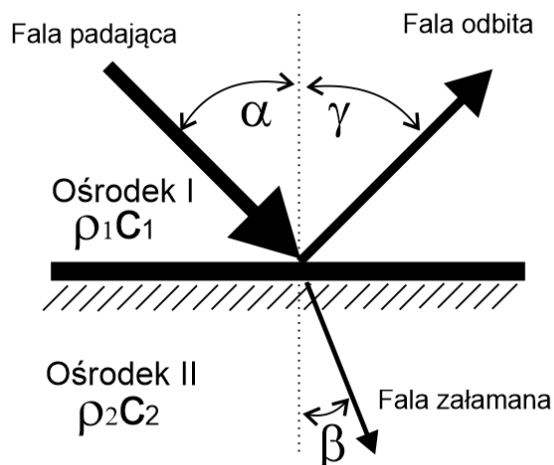


Rysunek 4.6 Prędkość rozchodzenia fali ultradźwiękowej w metanie jako funkcja zależna od ciśnienia dla stałej temperatury (Nguyen i in., 2019)

Prędkość ultradźwięków w gazie ziemnym jest zależna jego składu. Gaz ziemny o niższej gęstości względnej, czyli stosunku mas jednakowych objętości gazu ziemnego do powietrza o tej samej objętości będących w takich samych warunkach ciśnienia i temperatury, charakteryzuje się wyższą prędkością fali ultradźwiękowej. Przy ciśnieniu 6,89 MPa i temperaturze 15,56°C, prędkość ultradźwięków w gazie ziemnym o gęstości względnej 0,58 (zawartość metanu 96,5 %) wynosi 413,37 m/s, natomiast przy gęstości względnej 0,65 (zawartość metanu 85,9 %) prędkość ultradźwięków wynosi 378,47 m/s (Schulz, 2008). Bezpośredni pomiar prędkości ultradźwięków w gazie ziemnym może być zatem również pomocny do oceny jego parametrów jakościowych.

4.3 Współczynniki odbicia i przenikania

Fala, która pada na granicę ośrodków ulega zjawisku odbicia i załamania (Rysunek 4.7), a w przypadku, gdy mamy do czynienia z ciałem stałym, fale odbite i fale załamane mogą być również podłużne i poprzeczne.



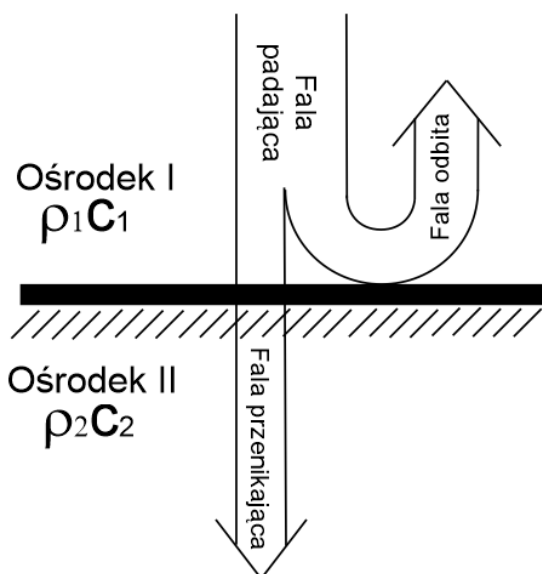
Rysunek 4.7 Fale odbite i załamane powstałe przy granicy dwóch ośrodków o różnych twardościach akustycznych

Zgodnie z prawem Snelliusa między falą padającą i falą załamaną zachodzi związek:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (4.10)$$

gdzie α i β - kąty padania i załamania, c_1 i c_2 są to odpowiednio prędkości rozchodzenia fali akustycznej w ośrodku I z gęstością ρ_1 oraz w ośrodku II z gęstością ρ_2 .

Fala ultradźwiękowa padając prostopadłe na granicę dwóch ośrodków nieograniczonych o różnej impedancji akustycznej ulega częściowemu przenikaniu do drugiego ośrodka oraz odbiciu z powrotem do ośrodka pierwszego (Obraz 1983). Energia fali padającej rozdziela się na energię fali przenikania, energię fali odbitej oraz na ciepło wytwarzane na granicy dwóch ośrodków (Rysunek 4.8).



Rysunek 4.8 Rozkład energii fali padającej na falę pochłoniętą i odbitą od granicy ośrodków o różnej impedancji akustycznej

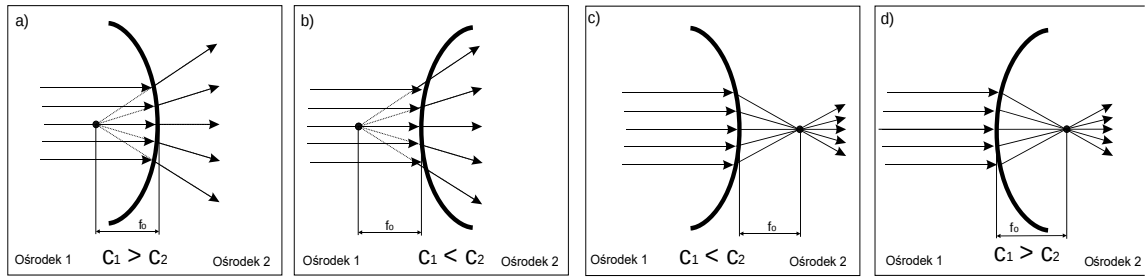
Wraz ze wzrostem różnicy impedancji akustycznej między ośrodkami zwiększa się ilość energii odbitej od granicy ośrodków. Do scharakteryzowania części energii na falę odbitą wprowadzono współczynnik β a na falę przenikającą – współczynnik α (Obraz, 1983).

$$\beta = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (4.11)$$

$$\alpha = 1 - \beta \quad (4.12)$$

gdzie Z_1 i Z_2 są to odpowiednio impedancje akustyczne ośrodków 1 i 2.

W przypadku, kiedy granica ośrodków jest wklęsła lub wypukła, a promień krzywizny granicy jest o wiele większy od długości fali, to ta granica działa na fale akustyczne jak soczewka. W zależności od kierunku padania, w stronę wklęsłą czy wypukłą oraz od stosunku prędkości fal w ośrodkach na obu stronach granicy, promienie fali po przejściu przez granicę mogą być rozpraszane bądź skupione w ognisku soczewki f_0 . Rysunek 4.9 przedstawia obrazy fali przed i po przejściu przez powierzchnię wklęsłą lub wypukłą (Obraz, 1983).



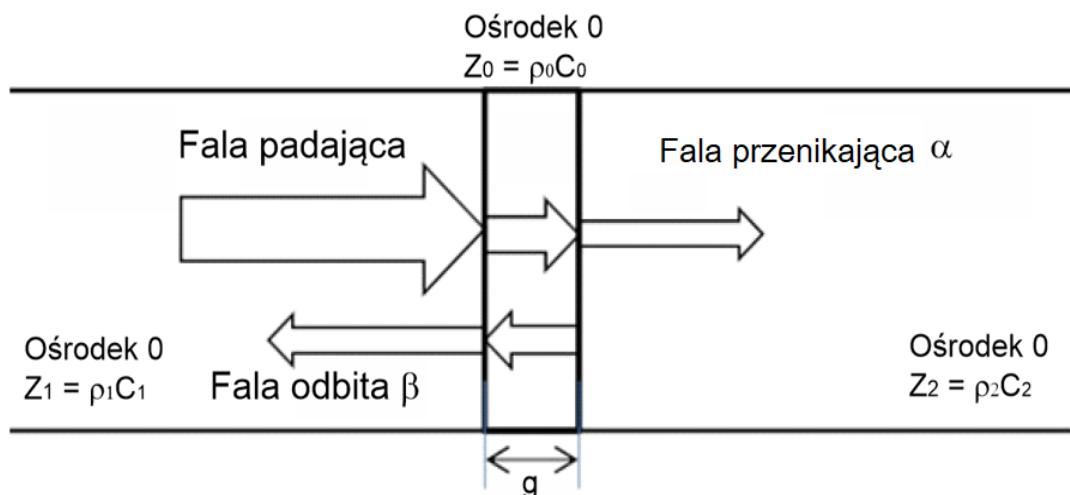
Rysunek 4.9 Wpływ powierzchni zakrzywionej na falę przechodzącą a) b) rozpraszanie, c) d) skupianie

4.4 Przenikanie fal przez przegrodę warstwową

Cienka warstwa między dwoma ośrodkami, na którą prostopadle pada fala ultradźwiękowa stanowi przeszkodę w rozchodzeniu się fali. Wpływ na transmisję i odbicie fali zależy od grubości i parametrów akustycznych warstwy i ośrodków ją otaczających (Rysunek 4.10). Współczynniki odbicia β oraz przenikania α fali padającej do warstwy o grubości g są opisane wzorami (Obraz, 1983):

$$\beta = \left[\frac{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 \cos^2 \frac{2\pi g}{\lambda} + \left(\frac{Z_0 + Z_1}{Z_2 + Z_0}\right)^2 \sin^2 \frac{2\pi g}{\lambda} - 4 \frac{Z_1}{Z_2}}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 \cos^2 \frac{2\pi g}{\lambda} + \left(\frac{Z_0 + Z_1}{Z_2 + Z_0}\right)^2 \sin^2 \frac{2\pi g}{\lambda}} \right]^{1/2} \quad (4.13)$$

$$\alpha = \frac{2}{\left[\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 \cos^2 \frac{2\pi g}{\lambda} + \left(\frac{Z_0 + Z_1}{Z_2 + Z_0}\right)^2 \sin^2 \frac{2\pi g}{\lambda} \right]^{1/2}} \quad (4.14)$$

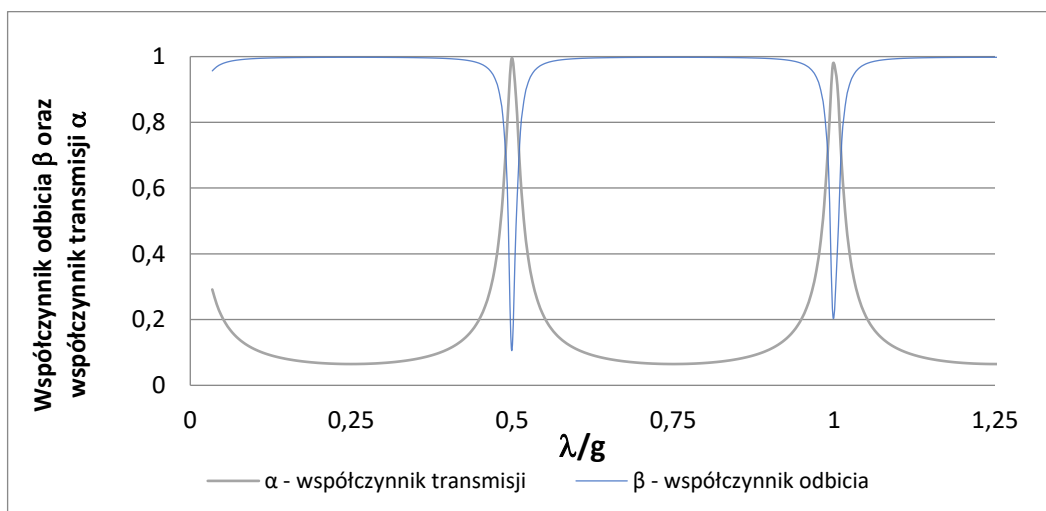


Rysunek 4.10 Fala ultradźwiękowa padająca na ciekłą warstwę o grubości g prostopadłą do padającej fali (Kubacka i Nguyen, 2021)

Analogiczna sytuacja zachodzi również, gdy grubość warstwy wynosi połowę długości fali lub jej wielokrotność (Rysunek 4.11). Dla grubości płyty równej nieparzystej ćwierci długości fali następuje maksymalne odbicie, z wyłączeniem przypadku, kiedy impedancja akustyczna płyty równa jest średniej geometrycznej impedancji ośrodków otaczających, co oznacza, że:

$$Z_0 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2} \quad (4.15)$$

Zależność tą stosuje się w celu dopasowania impedancyjnego przetwornika ultradźwiękowego z ośrodkiem, do którego wypromieniowuje energię.



Rysunek 4.11 Zależności współczynników przenikania i odbicia fali ultradźwiękowej od względnej długości fali w stosunku do grubości płyty (Kubacka i Nguyen, 2021)

4.5 Geometria fali ultradźwiękowej

Fala ultradźwiękowa rozchodząca się w ośrodku powoduje drgania cząstek. Zgodnie z zasadą Huygensa, każdy punkt, do którego dociera czoło fali staje się nowym źródłem fali kulistej. Powierzchnia drgająca źródła o średnicy D i początkowym ciśnieniu akustycznym P_0 wywołuje w ośrodku zaburzenie sprężyste rozchodzące się

w postaci fali ultradźwiękowej z ciśnieniem akustycznym P na odległości l określonym wzorem (Obraz, 1983):

$$P = 2P_0 \sin \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left[\sqrt{\left(\frac{D^2}{4} + l^2 \right)} - l \right] \right\} \quad (4.16)$$

Ze wzoru (4.16) wynika, że ciśnienie akustyczne fali zmienia się sinusoidalnie wzdłuż osiowej linii l . Maksima funkcji występują w odległościach, kiedy:

$$\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{D^2}{4} + l^2} - l = \frac{\pi}{2} (2n + 1) \quad (4.17)$$

Rozwiązanie równania (4.17) daje odległości $l_{n \max}$ wyrażone wzorem:

$$l_{n \max} = \frac{D^2 - 4\lambda^2(2n+1)^2}{4\lambda(2n+1)}; n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.18)$$

Analogiczne rozumowanie jak wyżej - minima ciśnienia występują w odległościach:

$$l_{n \min} = \frac{D^2 - 4\lambda^2 n^2}{8n\lambda}; n = 1, 2, \dots \quad (4.19)$$

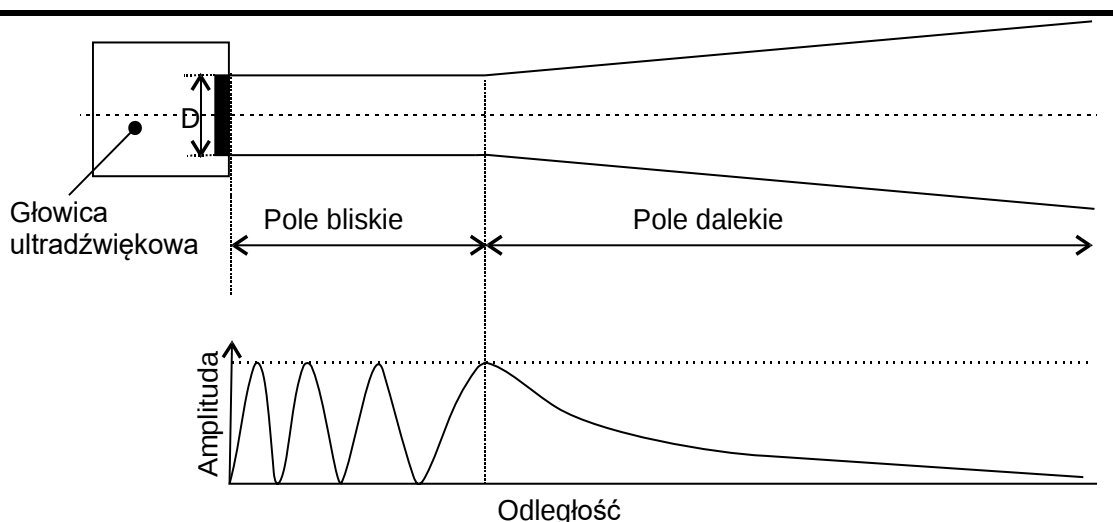
Analiza wzorów (4.18) i (4.19) wykazuje, że im większe n tym te minima i maksima są bliższe źródła i ostatnie maksimum jest dla $n=0$. Liczba ta determinuje zasięg strefy bliskiej (l_0).

$$l_0 = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (4.20)$$

W echo technice częstotliwości stosowanych fal ultradźwiękowych często są bardzo wysokie, rzędu kilkuset kHz, co oznacza, że długość fali λ jest znacznie mniejsza od rozmiaru źródła fali ($D^2 \gg \lambda^2$) i wzór (4.20) można zapisać jako:

$$l_0 = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (4.21)$$

Z punktu widzenia fizyki można powiedzieć, że w strefie bliskiej zachodzą różne interferencje fal o różnych fazach docierających z różnych punktów do danego punktu, co powoduje występowanie lokalnych minimów i maksimów ciśnienia akustycznego. Obszar ten określany jest jako tzw. pole bliskie (strefa Fresnela) (Rysunek 4.12).



Rysunek 4.12 Graficzne przedstawienie zmiany amplitudy ciśnienia akustycznego dla pola bliskiego i pola dalekiego fali ultradźwiękowej (Dris, 2014)

Obszar za granicą pola bliskiego nazywany jest polem dalekim (strefa Fraunhofer). W obszarze tym nie występuje zjawisko interferencji fal. Przekrój poprzeczny wiązki ultradźwiękowej w polu dalekim zwiększa się wraz z odległością, a wiązka staje się rozbieżna. W strefie dalekiej ciśnienie akustyczne maleje proporcjonalnie z odległością w osi źródła. Ciśnienie P fali akustycznej emitowanej ze źródła kołowego w punkcie znajdującym w polu dalekim w układzie cylindrycznym (r i φ) wyraża się wzorem (Obraz, 1983)

$$P = P_0 \pi \frac{l_0}{r} \frac{2J_1\left(\frac{\omega D}{c} \sin \varphi\right)}{\frac{\omega D}{c} \sin \varphi} \quad (4.22)$$

gdzie P_0 – amplituda początkowa fali ultradźwiękowej, l_0 zasięg strefy bliskiej, ω – prędkość kątowna, c – prędkość fali ultradźwiękowej w medium, D rozmiar transmitera, J_1 jest funkcją Bessela pierwszego rzędu.

Wyrażenie $2j_1\left(\omega \cdot D \cdot \frac{\sin \varphi}{2c}\right) / \left(\omega \cdot D \cdot \frac{\sin \varphi}{2c}\right)$ we wzorze (4.22) można zapisać jako:

$$\frac{2J_1\left(\frac{\omega D}{c} \sin \varphi\right)}{\frac{\omega D}{c} \sin \varphi} = \frac{2J_1\left(\frac{\pi D \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\frac{\pi D \sin \varphi}{\lambda}} = \frac{2J_1(x)}{x} \quad (4.23)$$

Wartość funkcji $2J_1(x)/x$ jest zależna od kąta φ . W tabeli 4.3 zestawione przykładowo wybrane wartości kąta φ , $x = \pi/\lambda(D \sin \varphi)$ oraz funkcji $2J_1(x)/x$ dla $D = 50$ mm, częstotliwości fali 200 kHz i prędkości fali w wodzie 1500 m/s.

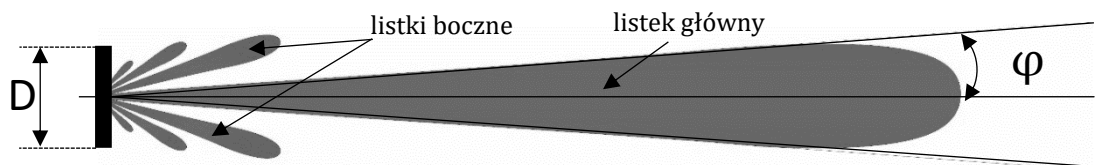
Tabela 4.3 Wybrane wartości kąta φ

φ	0	3,4°	6,85°	10,3°	13,2°	13,4°	17,4°	21,6°	24,7°	28,5°
$\sin \varphi$	0	0,0597	0,1194	0,1791	0,2286	0,2388	0,2985	0,3682	0,4179	0,4776
x^a	0	1	2	3	3,83	4	5	6	7,015	8
$2J_1(x)/x^a$	1	0,86	0,576	0,266	0	-0,033	-0,13	-0,092	0	0,086

^{a)} Wartości przytoczone z pracy Obraza (1983).

Analiza tabeli 4.3 wykazuje, że wiązka fali ultradźwiękowej składa się z głównego listka i listków bocznych. Kąt $\varphi = 13,2^\circ$ jako granica pomiędzy listkiem głównym

a pierwszym listkiem bocznym. Natomiast kąt $24,7^\circ$ rozdziela pierwszy boczny listek od drugiego bocznego listka, podobnie kąt $24,7^\circ$ jest granicą między listkiem pierwszym i drugim. Obraz wiązki fali ultradźwiękowej z poszczególnych listków jest poglądowo przedstawiony na rysunku 4.13.



Rysunek 4.13 Wiązki fali ultradźwiękowej jako listki boczne i listek główny (wiązka główna)

Analiza wzoru (4.23) również wskazuje, że charakterystyka kierunkowa wiązki ultradźwiękowej jest zależna od kształtu i rozmiarów źródła jak również od częstotliwości generowanej fali ultradźwiękowej. Kształt wiązki generowanej fali ultradźwiękowej w ośrodku przyjmuje formę stożka o kącie φ , który tworzy tzw. listek główny. Oprócz listka głównego mogą tworzyć się również listki boczne, których położenia oraz kształty uzależnione są od kształtu samego źródła fal oraz od jego wytłumienia i sprzężenia akustycznego z ośrodkiem.

4.6 Tłumienie fal ultradźwiękowych

Energia fali ultradźwiękowej rozchodzącej w ośrodku maleje z odległością na skutek pochłaniania i rozpraszania. Strata energii fali jest zależna również od niejednorodności ośrodka oraz geometrii generowanej fali. Osłabienie fali ultradźwiękowej w ośrodku rzeczywistym spowodowane jest przez wewnętrzne tarcie drgających cząstek, lepkość ośrodka, przewodnictwo cieplne bądź też przez dyspersję prędkości, czyli zależność prędkości od częstotliwości.

Ciśnienie fali ultradźwiękowej maleje wykładniczo z odległością l od źródła zgodnie ze wzorem (Obraz, 1983):

$$P(l) = P_0 e^{-\alpha l} \quad (4.24)$$

Współczynnik tłumienia fali w ośrodku α najczęściej wyrażany jest w decybelach na jednostkę odległości np. $[\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}]$. P_0 – ciśnienie początkowe generowanej fali

$$\alpha = \frac{0,43}{l} \log \left(\frac{P_0}{P(l)} \right) \quad (4.25)$$

Podobnie jak ciśnienie natężenie fali ultradźwiękowej I $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ ulega osłabieniu zgodnie z funkcją wykładniczą:

$$I(l) = I_0 e^{-2\alpha l} \quad (4.26)$$

Na współczynnik osłabienia fali wpływ mają pochłanianie i rozpraszanie energii. W ośrodkach stałych generalnie przyjmuje się, że pochłanianie energii jest silnie zależne od częstotliwości fali ultradźwiękowej, a strata energii na rozpraszanie fali związana jest głównie z stosunkiem długości fali do średniego rozmiaru ziaren ośrodka (Obraz, 1983; Kilian, 2002). W cieczech i gazach współczynnik tłumienia

zależy od stałych cieplnych, lepkości płynu i częstotliwości fali ultradźwiękowej i wyraża się wzorem (Śliwiński, 2001):

$$\alpha = \frac{2\pi}{\rho \cdot c^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \chi \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right] \cdot f^2 \quad (4.27)$$

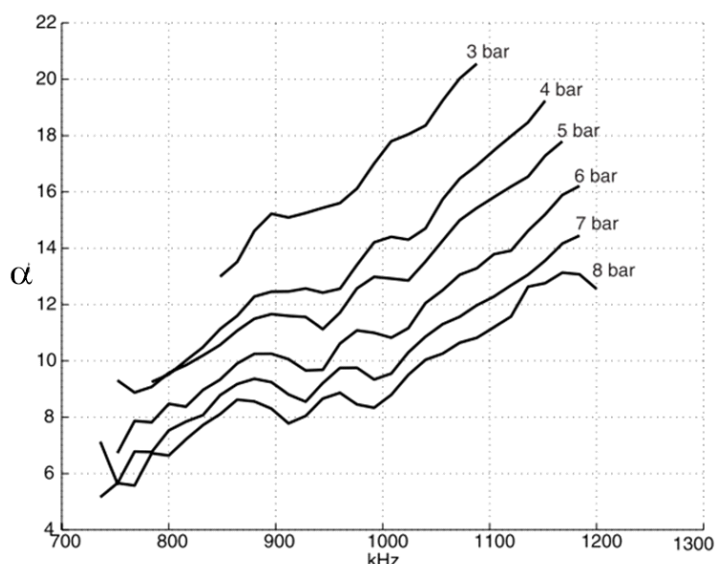
gdzie: ρ – gęstość; f – częstotliwość; η – współczynnik lepkości; $\chi = c_p/c_v$.

W tabeli 4.4 zestawione są wartości współczynników tłumienia fal ultradźwiękowych dla powietrza, wody destylowanej i niektórych wybranych materiałów stałych

Tabela 4.4 Współczynniki tłumienia fal ultradźwiękowych powietrza, wody destylowanej i wybranych materiałów stałych (Obraz, 1983; Han i in., 2021)

Ośrodek	Współczynnik tłumienia α ; [dB·mm ⁻¹ ·MHz ⁻¹]
Powietrze	$1,6 \cdot 10^{-1}$
Woda destylowana	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Stal	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$
Aluminium	$5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$
Włókno szklane	$5 \cdot 10^{-1}$

Współczynnik osłabienia fali ultradźwiękowej w gazie jest również zależy od ciśnienia i częstotliwości fali ultradźwiękowej (Bernasconi i in., 2013). Z badań przeprowadzonych przez Martinssona i Delsinga (2002) na przykładzie etanu można stwierdzić, że tłumienie fal ultradźwiękowych maleje wraz ze wzrostem ciśnienia gazu, ale rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości fal ultradźwiękowych (Rysunek 4.14).



Rysunek 4.14 Zależność współczynnika osłabienia fal ultradźwiękowych dla etanu w funkcji częstotliwości przy ciśnieniu od 3 do 8 bar na dystansie 72 mm (Martinsson i Delsing, 2002)

4.7 Przetworniki ultradźwiękowe

W celu wytworzenia fal ultradźwiękowych stosuje się przetworniki magneto-elektroakustyczne, które pod wpływem pola magnetycznego bądź elektrycznego zmieniają swoje rozmiary, generując w ten sposób drgania mechaniczne. Przetworniki

odbiorcze wykorzystują zjawisko odwrotne. W technice pomiarowej do wykonania odpowiednich przetworników ultradźwiękowych stosuje się materiały, które wykazują właściwości magnetostrykcyjne lub piezoelektryczne.

4.7.1 Przetworniki magnetostrykcyjne

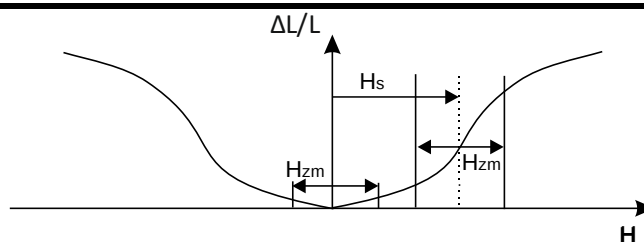
Materiałami wykazującymi właściwości magnetostrykcyjne są ferromagnetyki, czyli materiały posiadające własne spontaniczne namagnesowanie. Do takich materiałów należą m.in. nikiel, żelazo oraz kobalt jak również stopy niklu i żelaza tzw. permaloje czy też ferryty. Wyjątkowo duże właściwości magnetostrykcyjne wykazuje terfenol D, czyli stop pierwiastków ziem rzadkich takich jak terb i dysproz wraz z żelazem. Materiały, które wykazują bardzo duże zmiany mechaniczne pod wpływem pola magnetycznego w stosunku do innych materiałów są zaliczane do materiałów Giant Magnetostrictive Materials (GMM). W tabeli 4.5. zestawione są liniowe odkształcenie ($\Delta l/l$) wybranych materiałów magnetostrykcyjnych.

Tabela 4.5 Odkształcenia liniowe wybranych materiałów magnetostrykcyjnych (Bras i Greneche, 2017)

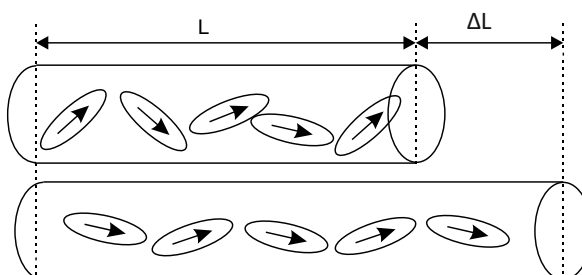
Lp.	Materiał	$\Delta l/l$
1	Fe	-9 ^a
2	Ni	-35 ^a
3	Co	-62 ^a
4	Permaloj 45 (Ni45-Fe55)	27 ^b
5	Ferryt Fe ₃ O ₄	40 ^b
6	Ferryt CoFe ₂ O ₄	-110 ^a
7	Terfenol-D (Tb _{0.3} Dy _{0.7} Fe ₂)	1100 ^b

a) – kurczenie, b) – rozszerzanie

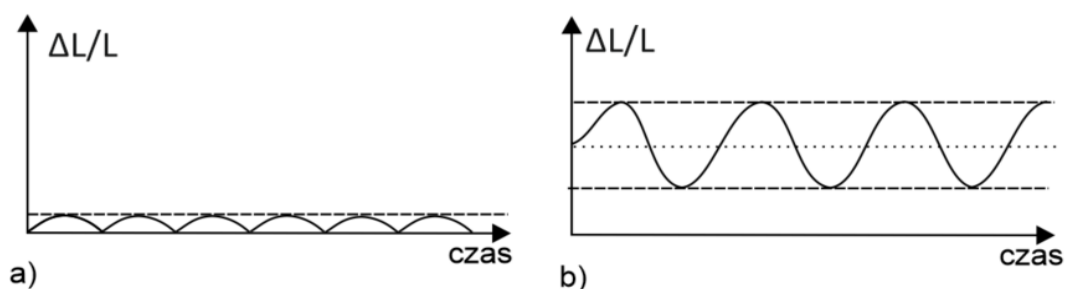
Pod wpływem zmiany zewnętrznego pola magnetycznego magnetostryki ulegają odkształceniom mechanicznym proporcjonalnym do kwadratu natężenia pola magnetycznego H_{zm} dwukrotnie większym od częstotliwości. W związku z tym przetworniki magnetostrykcyjne mogą pracować jako generatory fal ultradźwiękowych. W celu uzyskania liniowości odkształcenia stosuje się wstępne namagnesowanie H_s materiału pod wpływem stałego pola magnetycznego od zewnętrznych magnesów trwałych (Rysunek 4.15). Powoduje to ukierunkowanie wewnętrznych domen magnetycznych (Rysunek 4.16). Dzięki temu materiał wykazuje cechy piezomagnetyczne i przetwornik ulega odkształceniom mechanicznym proporcjonalnym do częstotliwości przyłożonego zewnętrznego zmiennego pola magnetycznego H_{zm} , jednocześnie poprawiając parametry akustyczne przez zwiększenie amplitudy drgań (Rysunek 4.17). Zjawisko piezomagnetyczne umożliwia również pracę przetwornika jako odbiornika. Fale ultradźwiękowe, które padają na przetwornik wywołują zmianę pola magnetycznego powodującą powstanie SEM i przepływ prądu w przewodzie.



Rysunek 4.15 Zmiana długości materiału magnetostrykcyjnego $\Delta L/L$ pod wpływem pola magnetycznego H (Kim i Kwon, 2015)



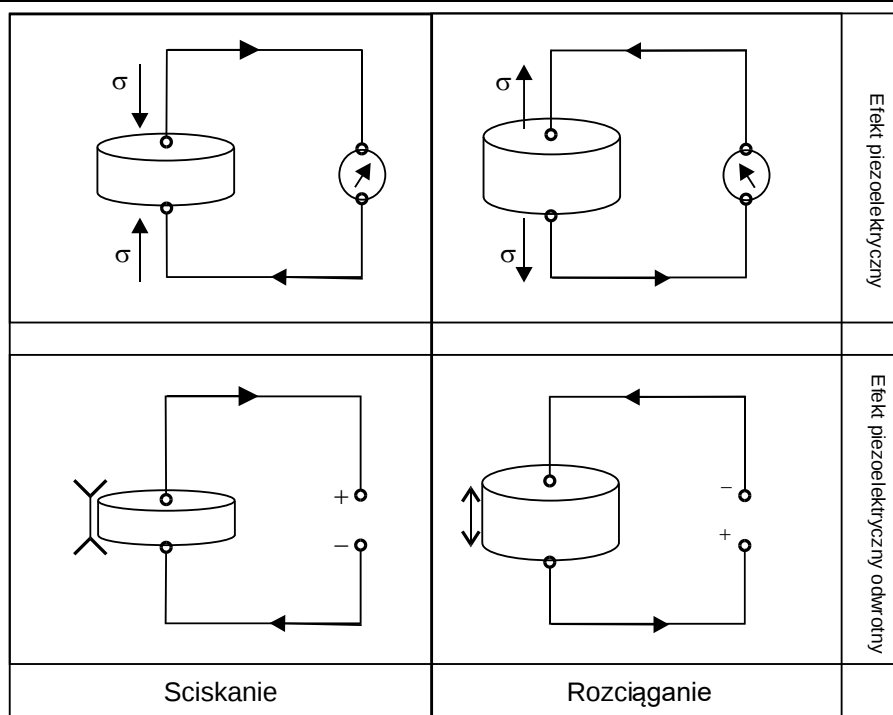
Rysunek 4.16 Zmiana długości pręta magnetostrykcyjnego w wyniku przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego (Kim i Kwon, 2015)



Rysunek 4.17. Przebiegi zmian długości materiału magnetostrykcyjnego a) bez wstępnego namagnesowania, b) z namagnesowaniem wstępnym (Kim i Kwon, 2015)

4.7.2 Przetworniki piezoelektryczne

Przetworniki piezoelektryczne wykonywane są z materiałów, które poddawane odkształceniom mechanicznym wytwarzają na swojej powierzchni ładunki elektryczne, których ilość jest proporcjonalna do przyłożonego odkształcenia. Materiały piezoelektryczne wykazują również odwrotny efekt piezoelektryczny polegający na odkształceniu mechanicznym pod wpływem przyłożonego do niego pola elektrycznego (Rysunek 4.18) (Mishra *i in.*, 2019). Maksymalna sprawność przetwornika piezoelektrycznego, czyli maksymalna energia następuje w jego rezonansie.



Rysunek 4.18 Efekt piezoelektryczny występujący pod wpływem ściskania lub rozciągania materiału piezoelektrycznego oraz odwrotny efekt piezoelektryczny

Do materiałów piezoelektrycznych możemy zaliczyć przede wszystkim kryształy takie jak kwarc czy turmalin, jak również specjalne materiały ceramiczne wykonane na bazie zmieszanych kryształów np. tytanianu ołowiu i cyrkonianu ołowiu (PZT), które są wytwarzane w specjalnym procesie technologicznym (Kilian, 2002). Piezoceramiki są obecnie najczęściej używanymi materiałami do budowy przetworników akustycznych. Proces produkcji pozwala na wykonywanie przetworników akustycznych o różnych kształtach, np. płytki, dyski czy bloki o różnych właściwościach akustycznych.

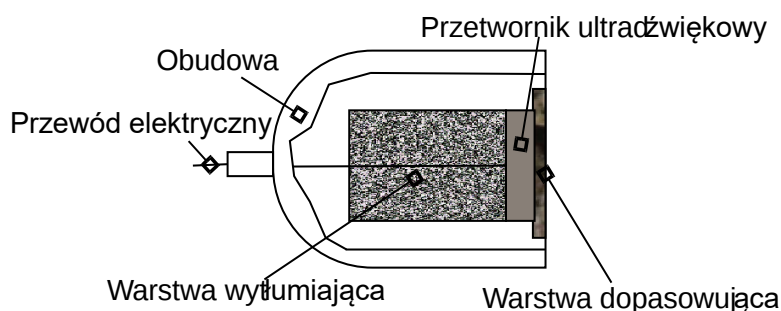
4.8 Głowice ultradźwiękowe

W technice pomiarowej, w szczególności do pomiarów odległości, budowane są odpowiednie głowice ultradźwiękowe, które zwykle składają się z nadajnika i odbiornika fal ultradźwiękowych, dzięki temu mogą generować i odbierać fale ultradźwiękowe rozchodzące się w ośrodkach pomiarowych. Odpowiednie zaprojektowanie głowicy ultradźwiękowej pozwala na generowanie pożądanych częstotliwości i uzyskanie wymaganych parametrów geometrycznych i jakościowych generowanej fali ultradźwiękowej rozchodzącej się w badanym ośrodku.

Głowice ultradźwiękowe zbudowane w oparciu o materiały magnetostrykcyjne najczęściej wykonywane są z pakietu blach np. niklowych lub wykonanych z permaloju. Wstępne namagnesowanie głowicy uzyskuje się dzięki umieszczeniu odpowiednich magnesów stałych, a zmienne pole magnetyczne wytwarzane jest przez nawinięty przewód, podobnie jak w rdzeniach transformatorowych. Głowice takie pozwalają na wytwarzanie fal ultradźwiękowych o częstotliwościach rzędu kHz. Ich niewątpliwą zaletą jest bardzo duża odporność na czynniki środowiskowe oraz uszkodzenia mechaniczne. Pozwala to na ich użycie bez potrzeby dodatkowej ochrony przed czynnikami zewnętrznymi. Głowice te są także odporne na prace

w wysokich ciśnieniach. Ze względu na straty energii powstające w wyniku występowania prądów wirowych, potencjalna sprawność tych przetworników nie jest wysoka i zazwyczaj nie przekracza 50%, a rzeczywista sprawność przetwornika zanurzonego w wodzie jest jeszcze mniejsza. Tego rodzaju głowice pomiarowe stosowane są zazwyczaj w systemach sonarowych, w których wymagane jest generowanie dużych mocy (Jagodziński, 1997). W celu uzyskania lepszej sprawności magnetostrykcyjnych głowic ultradźwiękowych jako przetworniki akustyczne stosuje się ferryty ceramiczne, które umożliwiają generowanie wyższych częstotliwości, do ok. 150 kHz. Głowice z ferrytów ceramicznych są częściej stosowane niż głowice oparte o pakiety blach ferromagnetycznych, ponieważ cechują się dużą odpornością chemiczną, a ich produkcja jest prostsza. Jednak kruchość tych materiałów nie pozwala na generowanie wysokich mocy.

Głowice ultradźwiękowe wykonywane w oparciu o przetworniki piezoelektryczne najczęściej zbudowane są z przetwornika piezoceramicznego z naniesionymi metalicznymi elektrodami po obydwu jego stronach. Od strony ośrodka, do którego będzie wypromieniowywana energia, przetwornik jest dopasowany akustycznie, np. ćwierćfalową warstwą dopasowującą, natomiast z drugiej strony jest warstwa materiału tłumiącego. Całość umieszczona jest w obudowie, której zadaniem jest ochrona elementów przed czynnikami zewnętrznymi (Rysunek 4.19).



Rysunek 4.19 Przekrój poprzeczny głowicy ultradźwiękowej opartej o przetwornik piezoelektryczny

Powszechność zastosowania materiałów piezoceramicznych do budowy głowic ultradźwiękowych wynika m.in. z ich dużej sprawności, łatwości w uzyskaniu odpowiedniego kształtu i parametrów akustycznych. Najczęściej głowice ultradźwiękowe tego typu są przeznaczone do wytwarzania fali o częstotliwości od kilkuset kHz do kilkudziesięciu MHz.

5 Metody pomiarowe parametrów geometrycznych kawern solnych

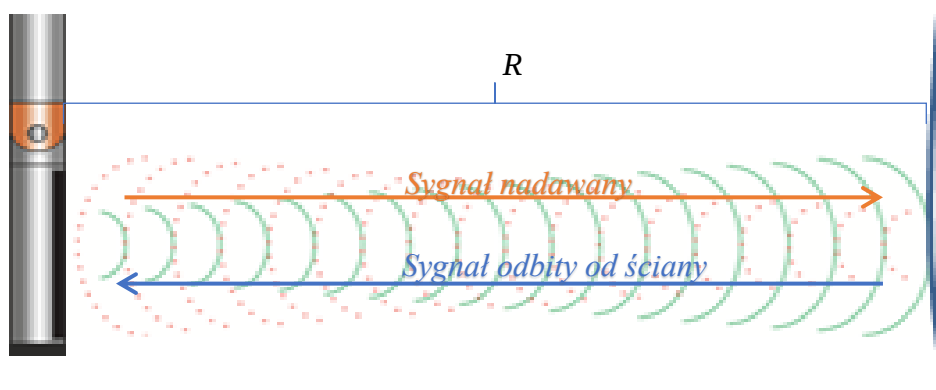
W przypadku wydobywania soli kamiennej w kopalniach podziemnych określenie kształtu i rozmiarów powstałych wyrobisk chodnikowych czy komorowych wykonywane jest przede wszystkim przy użyciu geodezyjnych przyrządów pomiarowych. Kawerny powstające w wyniku procesu ługowania soli kamiennej, udostępnione są jedynie otworem wiertniczym i wypełnione solanką bądź magazynowanym medium pod ciśnieniem, co uniemożliwia zastosowania klasycznych technik pomiarowych.

W celu monitoringu procesu rozwoju kawern, podczas eksploatacji soli kamiennej, jak również w celu kontroli stanu kawern magazynowych, niezbędne jest okresowe wykonywanie badań geometrycznych, czyli pomiarów ich rozmiarów i kształtów. Pomiary geometrii kawern magazynowych gazu przy użyciu sond pomiarowych z głowicami laserowymi, ze względów technicznych, m.in. brak odpowiedniego zasięgu, nie są stosowane (Crotogino i in., 2001).

Obecnie pomiary geometryzacji kawern są głównie realizowane przy użyciu echosondy ultradźwiękowej. Wykonywanie pomiarów echometrycznych, w celu określenia ostatecznych rozmiarów wyługowanych wyrobisk, za pomocą echosondy wymagane są również Rozporządzeniem Ministra Gospodarki (Dz.U. 2014 poz. 812). Echosonda to geofizyczna sonda pomiarowa, gdzie główny element pomiarowy stanowi głowica ultradźwiękowa. Ponadto sonda ta najczęściej wyposażona jest w dodatkowe czujniki pomiarowe, m.in. czujniki temperatury, ciśnienia oraz układy do pomiaru prędkości fal ultradźwiękowych i układy do pomiaru azymutu położenia głowicy ultradźwiękowej. Pomiary echometryczne realizowane są poprzez zapuszczenie sondy pomiarowej do otworu za pomocą kabla geofizycznego, który służy również do przesyłania danych między sondą a aparaturą naziemną.

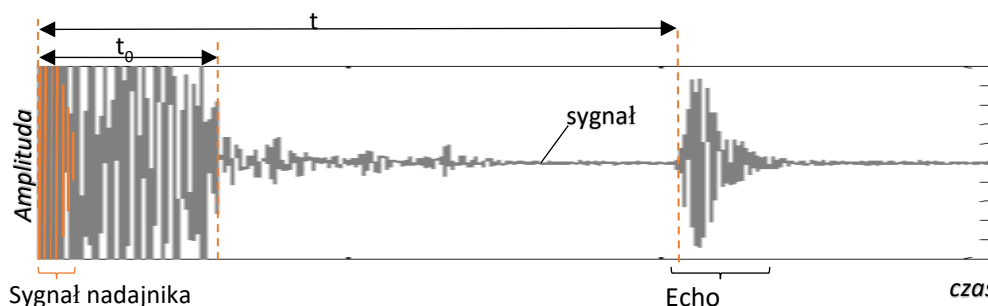
5.1 Pomiary echometryczne

Pomiary echometryczne polegają na każdorazowym określeniu odległości R echosondy od ściany kawerny na określonej głębokości, azymucie i kącie elewacji za pomocą głowicy akustycznej (Rysunek 5.1).



Rysunek 5.1 Zasada pomiaru odległości R echosondy od ściany kawerny

Określenie odległości echosondy od ściany kawerny polega na pomiarze czasu, który upływa od chwili emisji sygnału nadawczego przez nadajnik do chwili rejestracji sygnału odbitego (echa) od ściany kawerny przez odbiornik (Rysunek 5.2).



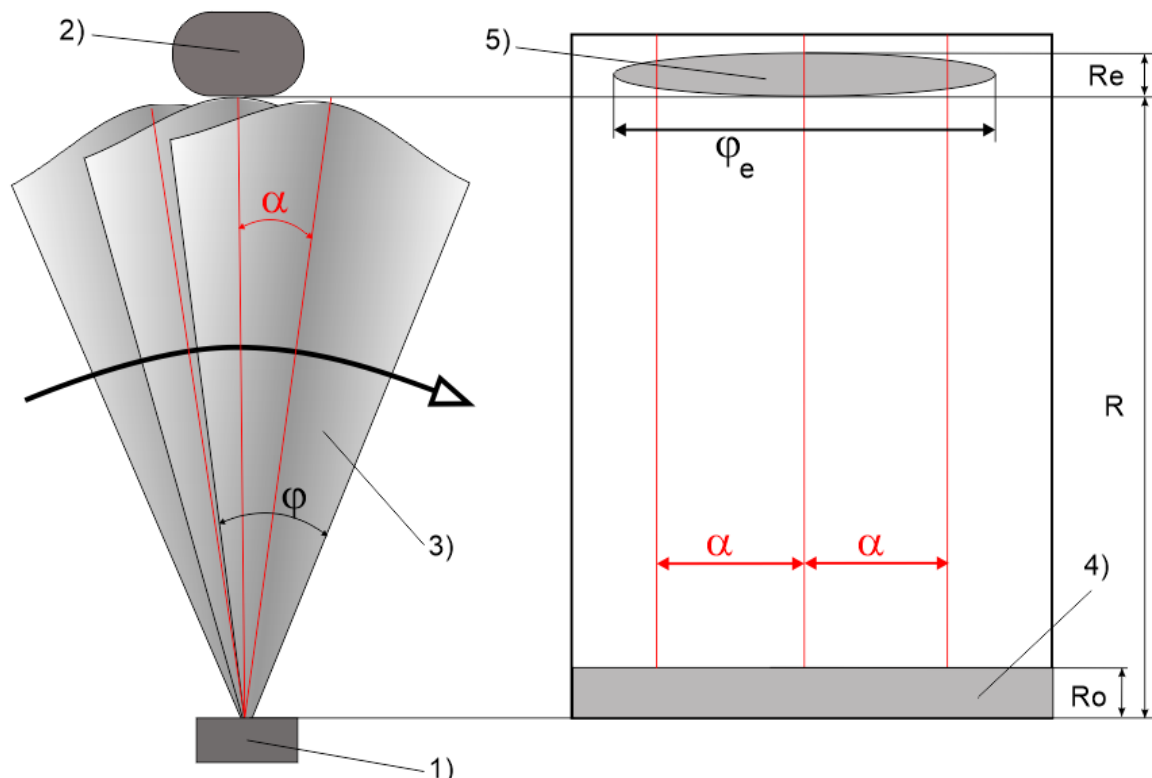
Rysunek 5.2 Przebieg sygnału zarejestrowany przez odbiornik ultradźwiękowy, gdzie: t - czas między emisją sygnału nadawczego a rejestracją echa odbitego od ściany kawerny, t_0 - czas emisji sygnału nadawczego rejestrowany przez odbiornik

Przy znanej prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w badanym medium odległość między przyrządem pomiarowym a ścianą komory jest obliczona wzorem:

$$R = \frac{c \cdot t}{2} \quad (5.1)$$

gdzie: R - mierzona odległość między echosondą a ścianą kawerny, c - prędkość ultradźwięków w danym medium, t - czas upływający od momentu emisji sygnału nadawczego do momentu rejestracji sygnału echa odbitego od ściany kawerny.

Ściana kawerny powstałej w złożu soli kamiennej jest powierzchnią, która odbija i rozprasza padającą na nią falę ultradźwiękową. Sygnał ultradźwiękowy odbity od powierzchni prostopadłej do kierunku rozchodzenia fali podczas obrotu głowicy pomiarowej o kąt α tworzy echo elementarne, którego początek rejestrowany jest w momencie, kiedy powierzchnia odbijająca zostaje objęta przez wiązkę ultradźwiękową listka głównego (Rysunek 5.3). W momencie wychodzenia wiązki fali ultradźwiękowej poza obszar powierzchni odbijającej następuje zanik echa elementarnego. Środek echa elementarnego wyznacza punkt interpretacyjny odległości R echosondy od powierzchni odbijającej (Kościeszko i Rałowicz, 2010).

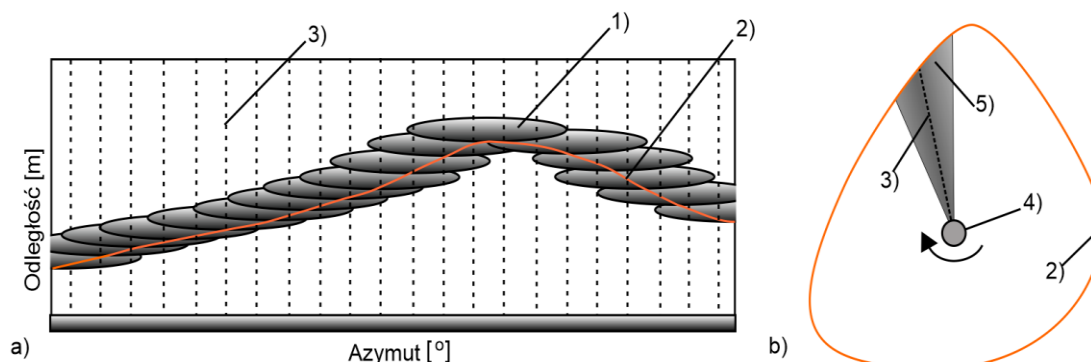


Rysunek 5.3 Elementy dotyczące pomiaru echometrycznego odległości przetwornika od powierzchni odbijającej 1) przetwornik ultradźwiękowy, 2) powierzchnia odbijająca, 3) wiązka ultradźwiękowa, 4) zarejestrowany sygnał nadawczy, 5) echo elementarne, α – kąt obrotu przetwornika ultradźwiękowego, φ – kąt generowanej głównej wiązki ultradźwiękowej, φ_e – szerokość echa elementarnego, R – rejestrowana odległość między przetwornikiem a powierzchnią odbijającą, R_e – długość echa elementarnego, R_o – długość sygnału nadawczego

Szerokość echa elementarnego φ_e jest ściśle związana z kątem φ wiązki emitowanej z nadajnika ultradźwiękowego. Gabaryty przetwornika ultradźwiękowego, częstotliwość sygnału nadawczego, amplituda i czas trwania emisji bezpośrednio wpływają na rozdzielczość pomiarową przy geometryzacji kawern solnych. Najmniejszy kąt między dwoma sąsiednimi powierzchniami odbijającymi, które są możliwe do rozdzielenia określa rozdzielczość kątową urządzenia pomiarowego. Najmniejsza odległość (ΔR) między dwoma powierzchniami odbijającymi oddalonymi od siebie, jaką można wyróżnić z zarejestrowanego sygnału związana jest natomiast z czasem trwania sygnału nadawczego i z prędkością fali ultradźwiękowej w ośrodku. Rozdzielczość tą, zwaną rozdzielczością wzdłużną, można określić wzorem $\Delta R = \frac{c\tau}{2}$, gdzie: τ – czas trwania sygnału nadawczego.

W wyniku procesu wielokrotnego nadawania sygnału i rejestracji ech odbitych od powierzchni elementarnych ściany kawerny, podczas obrotu głowicy ultradźwiękowej lub jej przemieszczenia w osi otworu, otrzymuje się zestawienie przebiegów sygnałów w funkcji azymutu lub głębokości zwane echogramem (Rysunek 5.4a). Echogram przedstawia złożenie ech elementarnych w postaci graficznej i podlega interpretacji, która polega na identyfikacji echa użytecznego i wyznaczaniu odległości między urządzeniem pomiarowym a powierzchnią odbijającą na danym azymucie lub na danej głębokości. Na rysunku 5.4a przedstawiono przykładowy echogram złożony z ech elementarnych odbitych

powierzchni powstały podczas obrotu echosondy wokół własnej osi wraz z jego interpretacją (Rysunek 5.4b).



Rysunek 5.4 a) Echogram powstały podczas obrotu głowicy ultradźwiękowej wokół osi pionowej, b) kształt obrysu powstałego w wyniku interpretacji echogramu. 1) echa elementarne, 2) linia interpretacyjna, 3) azymut położenia głowicy pomiarowej, 4) głowica pomiarowa, 5) wiązka fali ultradźwiękowej

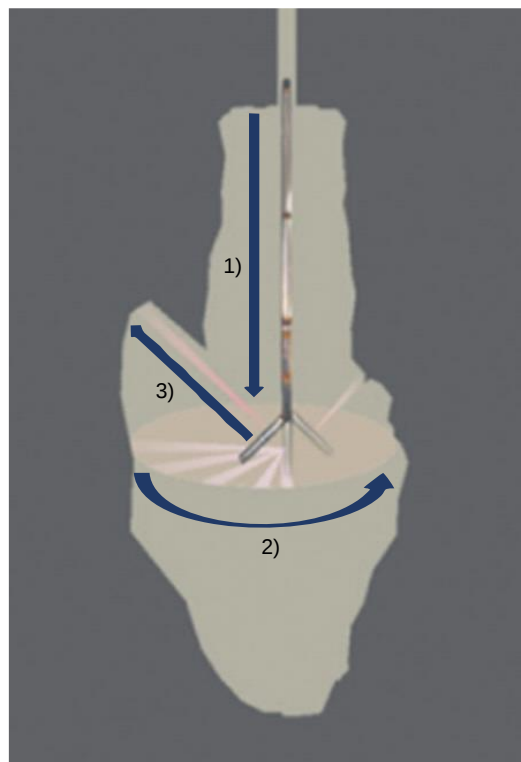
Najczęściej stosowane głowice pomiarowe wyposażone są w przetworniki akustyczne o częstotliwościach od kilkudziesięciu do kilkuset kHz, które spełniają rolę zarówno nadajnika jak i odbiornika fal ultradźwiękowych. W czasie wzbudzenia przetwornika sygnałem nadawczym, przetwornik ultradźwiękowy nie może rejestrować echa użytecznych (Rysunek 5.2), co powoduje, że pomiar zbyt krótkich odległości jest niemożliwy. W zależności od parametrów nadawczych oraz zastosowanego przetwornika ultradźwiękowego minimalna mierzalna odległość może wynosić do kilkudziesięciu centymetrów. Maksymalny zasięg metody ultradźwiękowej zależy od medium wypełniającego kavernę oraz zastosowanych głowic pomiarowych i może wynosić kilkaset metrów.

Pomiary echometryczne kavern wykonuje się wieloetapowo (Rysunek 5.5). W pierwszej kolejności następuje zapuszczenie echosondy do otworu przy użyciu kabla geofizycznego na zadaną głębokość. Głębokość zapuszczenia sondy mierzona jest na powierzchni przez specjalne rolki pomiarowe zainstalowane na samochodzie geofizycznym.

Następnie wykonuje się wstępne profilowanie pionowe komory w płaszczyźnie poziomej, które polega kilkukrotnym zapuszczeniu i podciąganiu sondy przy jednoczesnej rejestracji echa odbitego od ścian komory. Wykonanie tego typu pomiaru pozwala na wstępne określenie kształtu mierzonej komory i wyznaczenie odpowiedniego kroku głębokościowego dla pomiaru zasadniczego. Głębokościowy krok pomiarowy uzależniony jest od przewidywanej zmienności kształtu kaverny. Zasadniczo przyjmuje się, że dla kavern wyługowanych w złożach wydobywczych krok pomiarowy wynosi 5 m, natomiast dla kavern w złożach pokładowych wynosi 2,5 m (Figarski i Kubacka, 2017). W przypadku dużej zmienności kształtu kaverny następuje zagęszczenie kroku pomiarowego. Podczas profilowania pionowego wykonywane są również inne pomiary takie jak: pomiar temperatury, ciśnienia i prędkości ultradźwięków medium wypełniającego kavernę. Na tym etapie następuje również korelacja głębokościowa, najczęściej z głębokością posadowienia ostatniej kolumny rur cementowanych.

Pomiar zasadniczy polega na wykonywaniu szeregu profilowań poziomych na zadanej głębokości, czyli pomiarów odległości echosondy od ścian komory podczas jej pełnego obrotu wokół jej osi. Pomiar ten może odbywać się skokowo na zasadzie

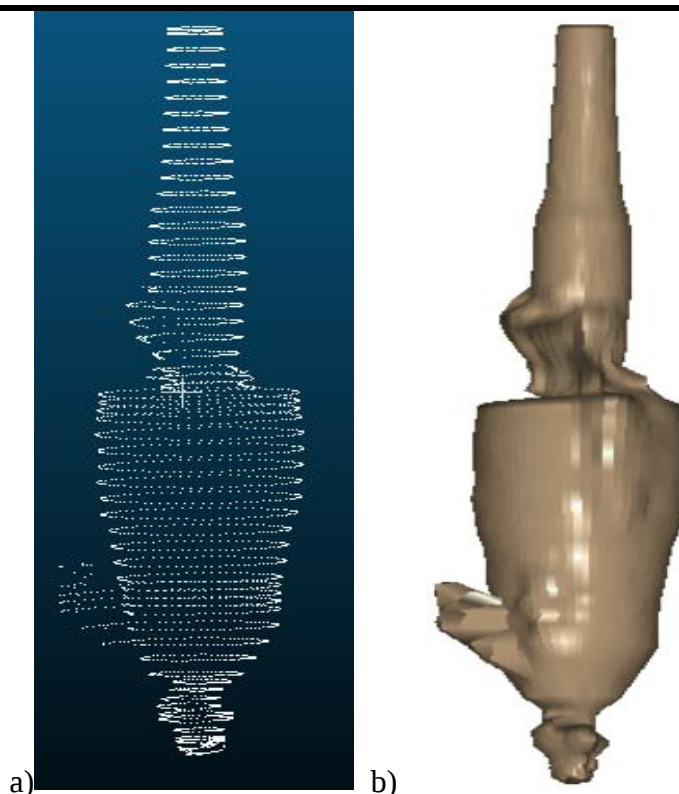
obrotu głowicy pomiarowej o zadany kąt lub w ciągły sposób, który polega na tym, że podczas obrotu głowicy akustycznej następuje ciągłe wysyłanie impulsu nadawczego i odbieranie sygnału odbitego od ściany kawerny wraz z rejestracją azymutu promienia wodzącego rejestrowanego sygnału. Profilowanie poziome kawerny odbywa się od poziomu poniżej rur i prowadzone jest w kierunku spągu w całym wymaganym interwale pomiarowym.



Rysunek 5.5 Składowe profilowania echometrycznego w pomiarze geometrii kawerny.
 1) Profilowanie pionowe w płaszczyźnie poziomej, 2) profilowanie poziome wokół osi echosondy,
 3) profilowanie komory pod kątem przy wychyle głowicy pomiarowej (Figarski i Kubacka, 2017)

Dzięki zastosowaniu w echosondzie głowicy pomiarowej, która ma możliwość wychyłu w zakresie -90° do $+90^\circ$ możliwe jest opomiarowanie kawerny nie tylko w poziomie, ale również profilowania uchyłne. Funkcja ta wykorzystywana jest w szczególności do określenia kształtu i rozmiarów części stropowej i spągowej kawerny. Pozwala ona również na pomiar rozługowań bocznych, tzw. kieszeni, które znajdują się poza zasięgiem profilowań poziomych.

W wyniku interpretacji echogramów otrzymanych z profilowań echometrycznych poziomych i pionowych oraz z profilowań uchylnych otrzymujemy szereg punktów w przestrzeni pomiarowej. Po złożeniu tych punktów powstaje trójwymiarowa bryła, która odzwierciedla kształt i rozmiary geometryczne mierzonej kawerny. Przykład takiego pomiaru przedstawiony jest na rysunku 5.6.

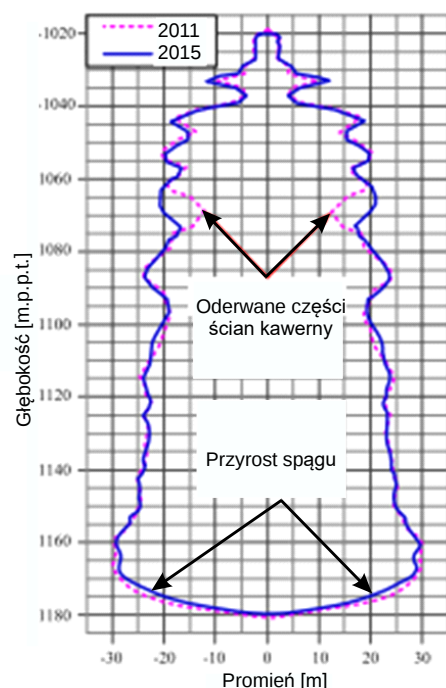


Rysunek 5.6 a) Przestrzenne rozmieszczenie punktów uzyskanych z interpretacji profilowań echometrycznych wykonanych w kawernie, b) obraz trójwymiarowy mierzonej kawerny

Przestrzenny obraz kawerny umożliwia wyznaczenie jej przekrojów pionowych lub poziomych na określonych azymutach czy też głębokościach. Pozwala to na zobrazowanie kawerny w rzutach dwuwymiarowych. Dzięki temu można monitorować zmiany kształtu, rozmiarów kawerny i objętości badanej kawerny występujące po określonym czasie na tych samych przekrojach. Wyniki uzyskane z pomiarów echometrycznych mogą służyć również jako dane wejściowe dla zewnętrznych programów umożliwiających m.in. przeprowadzenie symulacji procesu ługowania lub analizę geomechaniczną kawerny.

5.1.1 Pomiary echometryczne w kawernach magazynowych

Pomiary echometryczne w kawernach magazynowych pozwalają na monitorowanie zmian kształtu i rozmiarów podczas ich eksploatacji. Okresowe pomiary geometrii kawern umożliwiają ocenę ich stabilności oraz określenie pojemności czynnej i predykcję zmian pojemności w czasie. Szczególnie ważna jest kontrola i pomiary geometrii kawern magazynujących węglowodory gazowe oraz energię w postaci sprężonego powietrza. Cykliczne napełnianie i opróżnianie substancji gazowych mogą powodować gwałtowne zmiany parametrów geometrycznych tych komór (Rysunek 5.7). Pod wpływem naprężeń w górotworze mogą też zachodzić inne zjawiska, takie jak obrywy ścian kawerny, które powodują zasypywanie części spągowej kawerny (H. Wang *i in.*, 2017; Kubacka i Nguyen, 2022)



Rysunek 5.7 Zmiana kształtu i rozmiarów kaverny magazynowej gazu w latach 2011 i 2015 (Wang i in., 2017)

W kavernach magazynowych gazu ziemnego oprócz magazynowanej substancji, w części spągowej może znajdować się również solanka o wysokości kilku metrów, która pozostała po procesie napełniania kaverny gazem. Duża różnica impedancji akustycznej między gazem a solanką powoduje odbicie sygnału ultradźwiękowego od granicy substancji, w związku z tym pomiar echometryczny wykonywany jest oddzielnie dla strefy gazowej oraz solankowej (Figarski i Kubacka, 2017). Dodatkowo podczas pomiaru w każdej strefie lokalizowana jest głębokość granicy faz gaz – solanka. Zmiana położenia lustra solanki może świadczyć o zasypywaniu się części spągowej kaverny przez obrywy pochodzące ze ścian, bądź też przez postępującą konwergencję kaverny (Ślizowski i in., 2010)

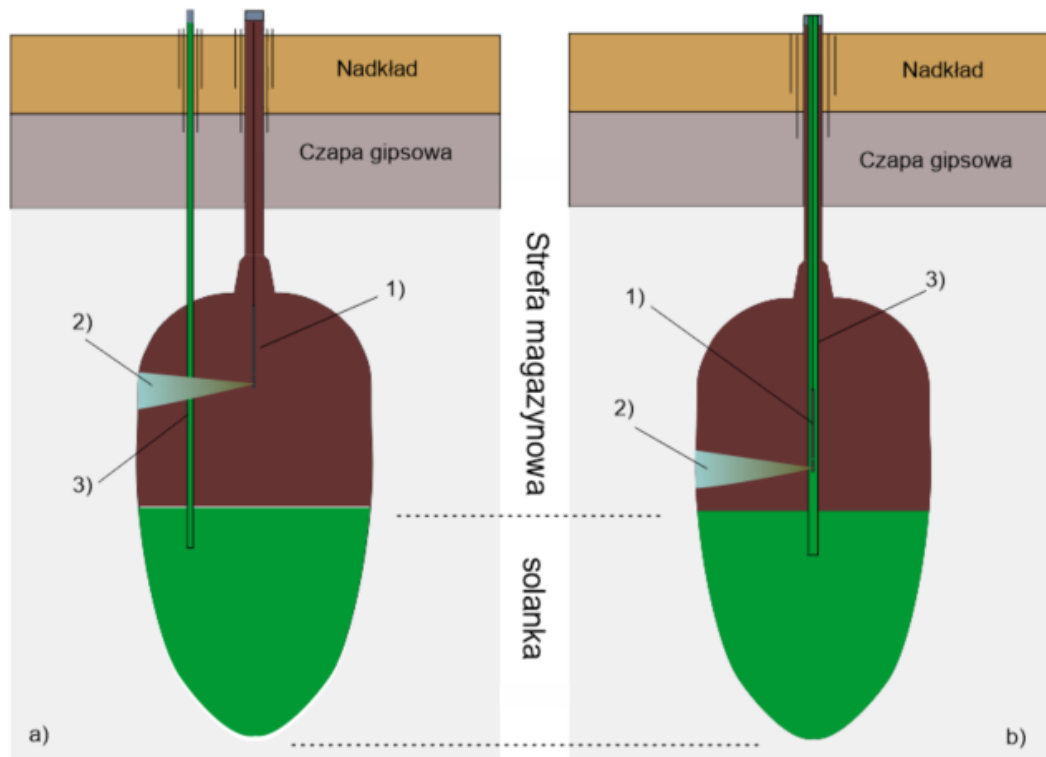
Wykonanie pomiarów w kavernach gazowych możliwe jest jedynie z zastosowaniem specjalistycznej służby geofizycznej WPCE (Wireline Pressure Control Equipment), która pozwala na zapuszczenie przyrządów pomiarowych do komory przy występowaniu dużego ciśnienia na głowicy eksploatacyjnej. Ciśnienie to może wynosić od kilku do kilkudziesięciu MPa (Reitze i in., 2009). Zastosowanie służby jest również konieczne w przypadku pomiarów echometrycznych kavern magazynujących węglowodory ciekłe, takie jak ropa naftowa czy paliwa, gdzie ciśnienie na głowicy eksploatacyjnej może wynosić do kilku MPa.

W przypadku kavern magazynujących ciekłe węglowodory, udostępnionych dwoma otworami, pomiary echometryczne są analogiczne jak pomiary w kavernach gazowych. Przyrządy pomiarowe zapuszczone zostają głównym otworem bezpośrednio do magazynowanego medium, a pomiary wykonuje się oddzielnie dla strefy magazynowej oraz strefy solankowej. W celu określenia objętości magazynowanego produktu należy określić dokładnie granicę przejścia faz produkt magazynowy - solanka. Pomiary głębokości lokalizacji granicy rozdziału faz mogą być wykonywane przy zastosowaniu różnych metod. Jedną z nich polega na

wykonywaniu profilowania prędkości fali ultradźwiękowej w funkcji głębokości, gdzie rejestruje się głębokość, na której następuje skokowa zmiana prędkości fali ultradźwiękowej. Pomiar granicy rozdziału medium w kawernie możliwy jest również przy zastosowaniu głowicy ultradźwiękowej. Podczas profilowania pionowego przetwornikiem poziomym położenie lustra solanki charakteryzuje się pozorną zmianą odległości sondy od ściany kawerny spowodowaną różnicą prędkości propagacji fali ultradźwiękowej. Pozwala to na wyznaczenie wstępnego położenia granicy. W celu doprecyzowania pomiaru, echosonda zostaje zapuszczona do strefy solankowej i wykonywany jest pomiar odległości między głowicą a lustrem przy wychylonej głowicy o kąt $+90^\circ$.

Podczas wykonywania pomiarów echometrycznych w kawernie magazynowej udostępnionej dwoma otworami obecność w komorze kolumny rur służących do przepływu solanki manewrowej może przesłonić niektóre części komory podczas pomiaru echometrycznego (Rysunek 5.8a). Powierzchnia przesłonięta ścianą komory zależy od rozmiaru rury oraz od jej odległości od osi pomiarowej.

Pomiary echometryczne w kawernach magazynowych ropy i paliw udostępnionych jednym otworem, w którym znajduje się dodatkowo rura przeznaczona do przepływu solanki manewrowej są bardziej problematyczne. Zapuszczenie echosondy do komory przez stalowe rury eksploatacyjne powoduje zasłonięcie strefy pomiarowej. W związku z tym strefa magazynowa jest w całości przesłonięta przez stalową rurę (Rysunek 5.8b). Umieszczona sonda w wewnętrznej przestrzeni rur nie ma możliwości wychylenia głowicy pomiarowej, co powoduje, że pomiary strefy stropowej lub ewentualnych lokalnych kieszeni nie są możliwe. Obecność stalowych rur przyczynia się również do zafałszowania wskazań standardowych układów do pomiaru azymutu, dlatego istnieje konieczność stosowania dodatkowych układów pomiarowych, np. żyrokompasów światłowodowych bądź odpornych mechanicznie żyrokompasów elektronicznych charakteryzujących się małym dryftem pomiaru azymutu w czasie (Ren i in., 2014). Ponadto obecność rur stalowych powoduje znaczne straty transmitowanego sygnału i powstawanie wielokrotnych odbić wewnątrz rury, co skutkuje problemami z identyfikacją ech użytecznych.



Rysunek 5.8 Pomiar echometryczny kawern magazynowych ropy i paliw a) w przypadku komory magazynowej posiadającej dwa uzbrojone otwory; b) w przypadku kawerny udostępnionej jednym otworem 1) rura, 2) wiązka fali, 3) rura manewrowa (Kubacka i Nguyen, 2022).

Dotychczas, tylko niektóre firmy zagraniczne wykonują pomiary echometryczne w takich sytuacjach. Na rynku krajowym na chwilę obecną nie ma rozwiązań pozwalających na wykonywanie pomiarów kształtu kawern przez rury, w związku z tym kawerny magazynujące węglowodory ciekłe udostępnione jednym otworem mierzone są jedynie przez podmioty zagraniczne.

5.2 Zalety i ograniczenia pomiarów echometrycznych

Pomiary przy użyciu echosondy ultradźwiękowej są obecnie uważane za jedną z najlepszych metod pomiarowych do prowadzenia badań geometrii kawern solnych. Zastosowanie odpowiednio dobranych przetworników ultradźwiękowych i częstotliwości nadawczych umożliwia pomiary kawern wypełnionych zarówno medium gazowym jak i ciekłym, kontrolę ich geometrii w trakcie jej ługowania oraz w czasie magazynowania substancji. Właściwie dobrana metodyka pomiarowa i sprzęt pomiarowy pozwalają na szybkie i wiarygodne odwzorowanie geometrii mierzonej kawerny.

Ilość wydobytej soli w procesie ługowania może być dobrze oszacowana w oparciu o dokładnie zmierzone objętości kawern eksploatacyjnych wzorem (Kunstman *in in.*, 2002):

$$\frac{M}{V_e} = \frac{(\rho - C)(100 - P_n)}{1000 (100 - \alpha P_n)} \quad (5.1)$$

gdzie:

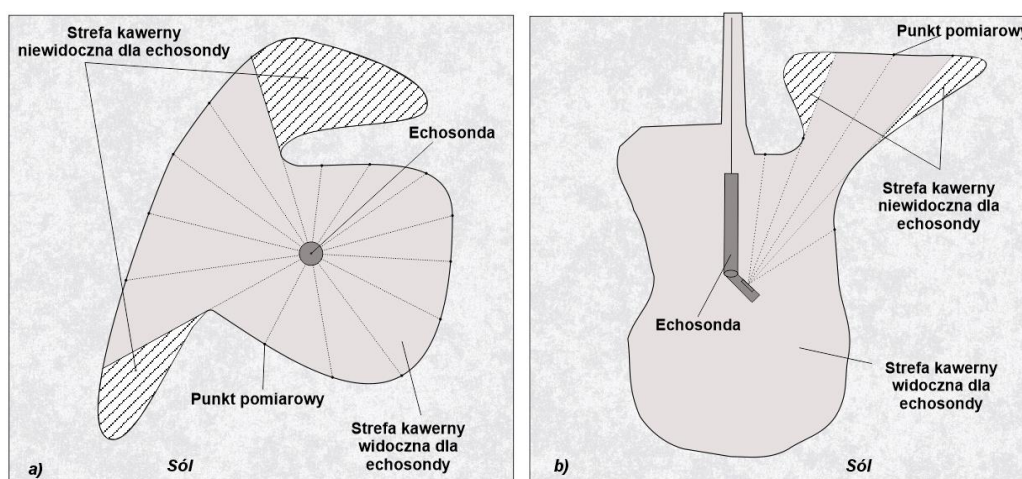
M – całkowite wydobycie soli z komory (masa soli wydobytej), w Mg (tony);

V_e – objętość komory bez zasypanej części, w m^3 ;
 P_n – procent części nierozpuszczalnych w skale solnej;
 C – średnie stężenie solanki pozostałej w komorze, w kg/m^3 ;
 ρ – gęstość objętościowa skały solnej, w kg/m^3 ;
 α – współczynnik rozluźnienia części nierozpuszczalnych w rzapiku.

Podczas wykonywania pomiaru echometrycznego mierzone są również inne parametry medium wypełniającego kawernę takie jak: temperatura, ciśnienie czy też prędkość fali ultradźwiękowej, co pozwala na analizę zmian zachodzących w badanym medium.

Oprócz niewątpliwych zalet metody echometrycznej ma ona również swoje ograniczenia, mianowicie ze względu na specyficzne środowisko pracy urządzeń pomiarowych, takie jak duże głębokości wykonywania badań echometrycznych, czy też zróżnicowane substancje wypełniające kawerny, sonda pomiarowa musi być odporna zarówno na warunki ciśnieniowe jak i na czynniki chemiczne. Udostępnienie kawern do pomiarów odbywa się wyłącznie przez otwór wiertniczy, co ogranicza maksymalną średnicę zewnętrzną stosowanego urządzenia pomiarowego. Wpływa to bezpośrednio na rozmiary zastosowanych głowic ultradźwiękowych, a co za tym idzie na geometrię generowanej wiązki ultradźwiękowej.

Przyrządy pomiarowe zapuszczone zostają do komory na kablu geofizycznym, co powoduje, że pomiary wykonuje się wzdłuż jednej osi pomiarowej. Skutkiem tego jest fakt, że niektóre części kawerny np. kieszenie mogą nie być echometrycznie widoczne (Rysunek 5.9). Z powodu tego, że pomiar temperatury i prędkości ultradźwięków w medium wypełniającym komorę odbywa się jedynie w jej osi, rozkład przestrzenny zmian tych parametrów w całej komorze nie jest znany.



Rysunek 5.9 Strefy kawerny echometrycznie niewidoczne a) podczas wykonywania profilowania poziomego, b) podczas wykonywania profilowania przy wychylonej głowicy pomiarowej

Sytuacja ta może wpływać na dokładność pomiaru parametrów geometrycznych kawerny. Przykładowo, w kawernach magazynowych gazu stan ustabilizowania warunków termodynamicznych w komorze zostaje zakłócony w wyniku zatłaczania lub wytłaczania gazu, co może powodować zróżnicowanie prędkości fal ultradźwiękowych w kawernie, a to z kolei powoduje ugięcie sygnału pomiarowego i wpływa na dokładność pomiarową (Hasselkus *i in.*, 2015).

6 Badanie metody pomiarowej geometrii kawern przy obecności stalowych rur eksploatacyjnych

W celu zobrazowania geometrii kawern solnych, pomiary echometryczne wykonuje się po usunięciu rur z mierzonej komory. Jednak w niektórych kawernach rury te, z różnych powodów technicznych, są zlokalizowane w strefie pomiarowej. Sytuacja taka występuje na przykład w kawernach magazynujących węglowodory ciekłe udostępnione jednym otworem, jak również w kawernach, w których z przyczyn technologicznych wymagana jest obecność rur oraz w kawernach, gdzie w wyniku problemów technicznych, nie jest możliwe wyciągnięcie rur z otworu. W przemyśle solnym najczęściej stosowane są rury stalowe o średnicach zewnętrznych 8 5/8" (219 mm), 7 5/8" (194 mm) o grubościach ścianki 10 mm oraz rury o średnicy 5" (127 mm) lub 4 1/2" (114 mm) o grubości ścianki 5 - 6 mm. Stosowane są również rury o średnicach 10 3/4" (273 mm), 9 5/8" (244 mm), 6 5/8" (168 mm) oraz 5 1/2" (140 mm) (Kunstman, i in., 2002).

Obecność rur w kawernie sprawia, że pomiar echometryczny musi być wykonywany w sytuacji, kiedy sonda pomiarowa znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rury, co wiąże się z dodatkowymi komplikacjami podczas pomiaru.

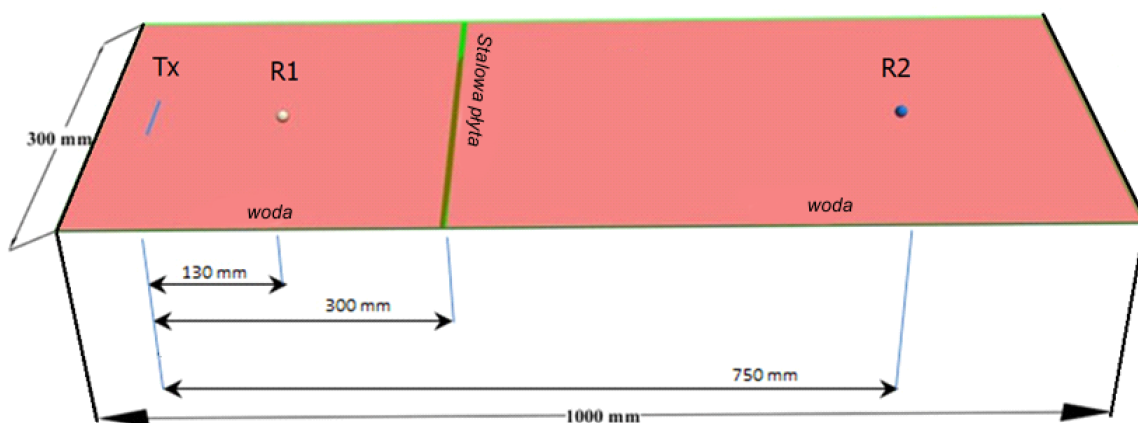
Przeprowadzone przez autora badania w tym zakresie mają za zadanie pozyskanie informacji na temat możliwości wykonywania poprawnych pomiarów echometrycznych kawern, w sytuacji, kiedy urządzenie pomiarowe znajduje się wewnątrz rur, a strefa pomiarowa jest przez nie przesłonięta.

6.1 Badania symulacyjne transmisji fal ultradźwiękowych przez warstwową przeszkodę stalową

Podstawą przeprowadzenia badań nad transmisją fali ultradźwiękowej przez warstwową przeszkodę stalową jest fakt, że współczynniki przechodzenia i odbicia fali dźwiękowej przy płycie równoległej do transmitera (nadajnika) czyli prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali mają ekstremalne wartości dla fali o długości równej wielokrotności połowy grubości płyty (Obraz, 1983; Jagodziński, 1997).

Badania nad transmisją fal ultradźwiękowych przez równoległą przeszkodę stalową rozpoczęto od przeprowadzenia symulacji komputerowych za pomocą specjalistycznego oprogramowania OnScale™, które bazuje na metodzie elementów skończonych. W celu zwiększenia dokładności przeprowadzonych badań, każdą symulację prowadzono na modelu, którego rozmiar oczka siatki elementarnej wynosił 0,1 długości generowanej fali ultradźwiękowej. Stworzony został hipotetyczny model 2D zbiornika o szerokości 300 mm i długości 1000 mm wypełnionego wodą, w którym źródło fal ultradźwiękowych Tx o wysokości 70 mm umieszczono w odległości 50 mm od tylnej (lewej) krawędzi modelu (Rysunek 6.1). Płytę stalową o grubości g umieszczono natomiast równoległe do źródła w odległości 300 mm od niego, a odbiorniki R1 oraz R2 znajdowały się po przeciwnej stronie stalowej płyty w linii poziomej przechodzącej przez środek zbiornika w odległości 130 mm oraz 750 mm od źródła. W celu uniknięcia nakładania się sygnałów podczas symulacji żadna ze ścian modelu nie odbijała fal ultradźwiękowych i była dla nich „przezroczysta”. Symulację przeprowadzono dla dwóch częstotliwości 200 kHz oraz 450 kHz. Nadawczy sygnał ultradźwiękowy generowany był każdorazowo przez nadajnik Tx falą sinusoidalną o czasie trwania 15 μ s dla 200 kHz oraz 6,6 μ s dla

450 kHz z ciśnieniem akustycznym o amplitudzie również 10 Pa. Długość sygnału nadawczego odpowiadała 3 krotności okresu fali dla danej częstotliwości. Dla stali prędkość fali podłużnej wynosiła 5900 m/s, gęstość 7690 kg/m³. Natomiast dla wody prędkość fali podłużnej wynosiła 1496 m/s a gęstość 1000 kg/m³. Dla zastosowanych częstotliwości, długość fali w stali wynosi 29,5 mm przy 200 kHz oraz 13,1 mm przy 450 kHz.



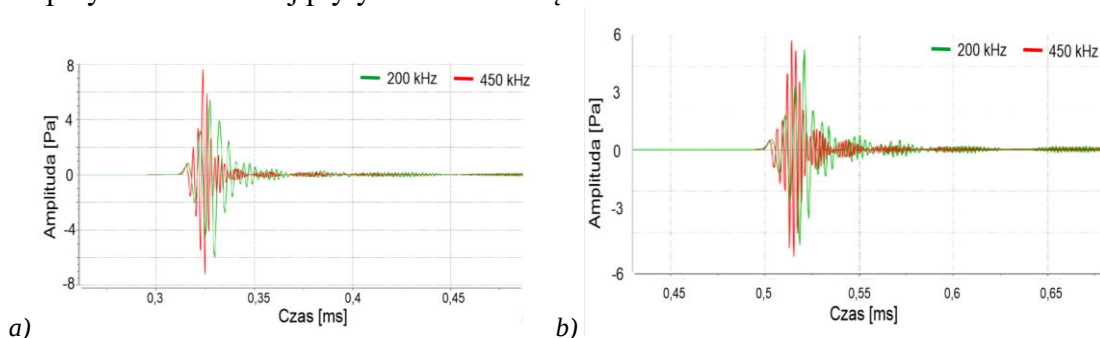
Rysunek 6.1 Model symulacyjny 2D służący do badania sygnałów odbitych i przechodzących przez stalową warstwę równoległą do płaszczyzny przetwornika

W pierwszej kolejności przeprowadzono symulację przy braku stalowej płyty. Badania te miały na celu pomiar amplitudy ciśnienia akustycznego rejestrowanego bezpośrednio przez odbiorniki R1 i R2. Sygnały te stanowią wielkości odniesienia dla dalszych pomiarów. W tabeli 6.1 zestawiono amplitudy sygnałów rejestrowanych przez odbiorniki R1 i R2 przy braku płyty stalowej.

Tabela 6.1 Amplitudy sygnałów zarejestrowanych bezpośrednio przez odbiorniki R1 i R2 przy braku płyty stalowej w modelu

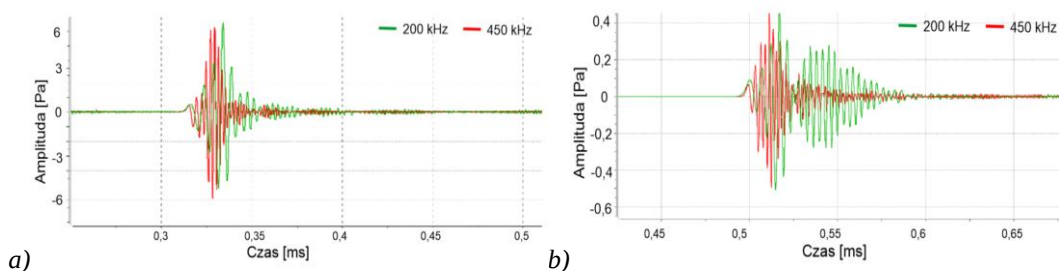
Amplituda sygnałów			
200 kHz		450 kHz	
R1 [Pa]	R2 [Pa]	R1 [Pa]	R2 [Pa]
6,05	4,73	6,75	5,20

Na rysunku 6.2 przedstawiono sygnały zarejestrowane przez odbiorniki R1 oraz R2 przy braku stalowej płyty dla dwóch częstotliwości 200 kHz oraz 450 kHz.



Rysunek 6.2 Sygnał zarejestrowany przez odbiornik R1 (a) oraz R2 (b) przy braku płyty stalowej w modelu (zielona linia dla fali o częstotliwości 200 kHz, czerwona linia dla fali o częstotliwości 450 kHz)

Następnie w modelu umieszczono stalową płytę równoległą do źródła fali. Grubość płyty zmieniała się w zakresie od 1 mm do 20 mm z krokiem 1 mm dla każdej częstotliwości fali. Dla zastosowanych częstotliwości 200 kHz i 450 kHz wykonano w sumie 40 symulacji, gdzie rejestrowano przebieg sygnału fali odbitej od stalowej płyty odbiornikiem R1 i fali przechodzącej przez nią za pomocą odbiornika R2 (Rysunek 6.3).



Rysunek 6.3 Sygnał odbity od płyty stalowej o grubości 10 mm zarejestrowany przez odbiornik R1 (a) oraz sygnał przechodzący przez płytę i zarejestrowany przez odbiornik R2 (b)

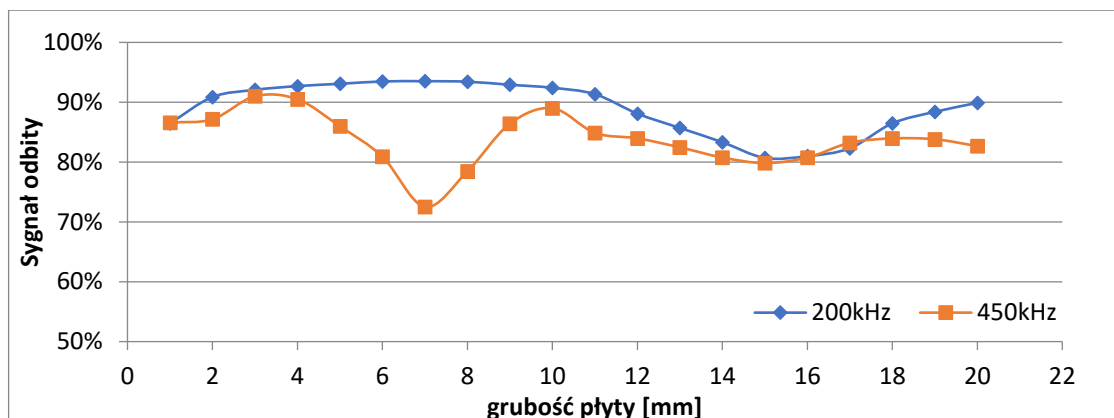
Po zarejestrowaniu przebiegów sygnałów określono amplitudy sygnału odbitego oraz sygnału przechodzącego przez stalową przeszkodę dla płyty o różnej grubości równoległej do płaszczyzny nadajnika (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 Amplitudy sygnałów rejestrowanych przez odbiorniki R1 i R2 w zbiorniku wodnym z płytą stalową o różnej grubości

Grubość płyty [mm]	Amplituda sygnału [Pa]			
	200 kHz		450 kHz	
	R1	R2	R1	R2
1	5,24	2,22	5,85	0,86
2	5,50	0,83	5,89	0,48
3	5,58	0,65	5,88	0,38
4	5,61	0,54	5,86	0,40
5	5,64	0,47	5,81	0,61
6	5,66	0,40	5,46	1,48
7	5,66	0,37	4,90	1,60
8	5,66	0,37	5,30	1,10
9	5,63	0,43	5,84	0,61
10	5,60	0,49	5,75	0,49
11	5,53	0,57	5,73	0,62
12	5,33	0,91	5,67	0,93
13	5,19	1,10	5,57	1,04
14	5,05	1,23	5,45	1,06
15	4,89	1,17	5,39	0,93
16	4,90	1,07	5,45	0,76
17	4,98	0,93	5,62	0,65
18	5,24	0,69	5,67	0,70
19	5,35	0,57	5,66	0,73
20	5,44	0,50	5,58	0,74

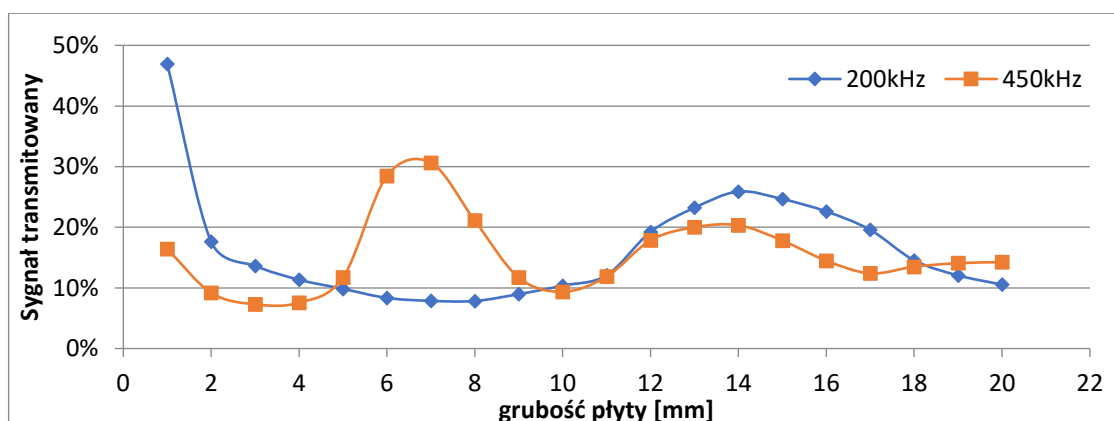
Stosunek sygnału odbitego od płyty stalowej zarejestrowanego przez odbiornik R1 do sygnału rejestrowanego przez ten sam odbiornik dla przypadku, w którym nie występuje płyta w modelu, w zależności od grubości płyty stalowej przedstawiony jest na rysunku 6.4. Przy częstotliwości 200 kHz i grubości płyty stalowej w zakresie

2 - 11 mm ponad 90% energii zostaje odbite, minimum odbicia występuje dla płyty o grubości 15 - 16 mm i wynosi ok. 80%. Przy częstotliwości 450 kHz maksymalne odbicie zarejestrowano dla płyt o grubości 3 - 4 mm oraz 10 mm. Dla grubości płyty wynoszącej 7 mm współczynnik odbicia wynosi 72%, a dla grubości 14 - 16 mm wynosi ok. 80%. Zarówno dla częstotliwości 200 kHz jak i 450 kHz następuje spadek amplitudy sygnału odbitego dla stosunkowo cienkiej płyty stalowej o grubości ok. 1 mm.



Rysunek 6.4 Procentowy iloraz sygnału odbitego od stalowej płyty o różnych grubościach do sygnału przy braku płyty dla fali ultradźwiękowej o częstotliwości 200 i 450 kHz

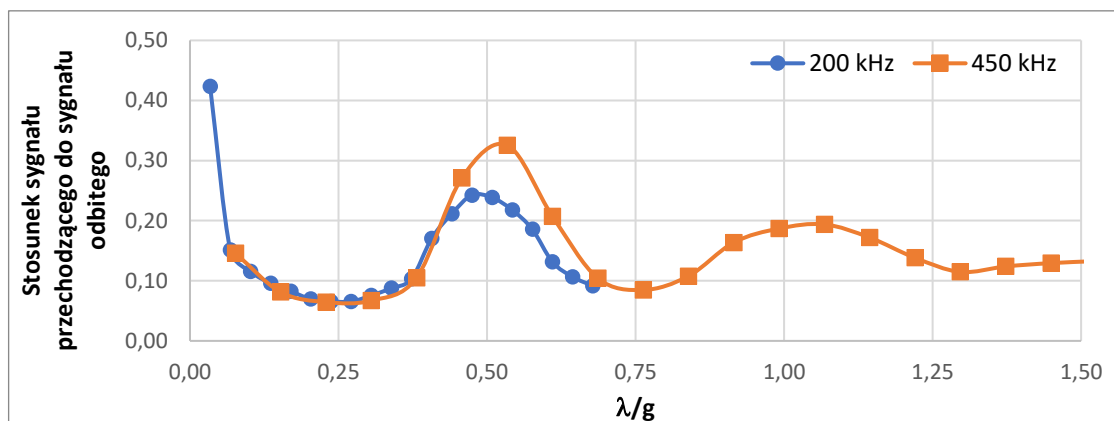
Dla pomiarów geometrii kawern przy obecności stalowej płyty znaczącą rolę ma jednak określenie współczynnika transmisji fali ultradźwiękowej przez przeszkodę. Stosunek sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R2 po jego przejściu przez stalową płytę do sygnału zarejestrowanego bezpośrednio, czyli sygnału przy braku stalowej płyty pokazany został na rysunku 6.5. Przy częstotliwości 200 kHz i grubości płyt w zakresie 13 - 16 mm rejestrowany sygnał transmitowany wynosi około 25% sygnału bezpośredniego, większa wartość zarejestrowana została jedynie dla płyty o stosunkowo małej grubości 1 mm. Przy częstotliwości 450 kHz rejestrowany sygnał transmitowany wynosi ponad 30% dla płyt stalowych o grubości 6-7 mm oraz ok. 20% dla płyt o grubości 8 mm i 12 - 15 mm.



Rysunek 6.5 Procentowy iloraz sygnału transmitowanego przez stalową płytę o różnej grubości do sygnału przy braku płyty dla fali ultradźwiękowej o częstotliwości 200 i 450 kHz

Stosunek sygnału transmitowanego przez płytę stalową zarejestrowaną przez odbiornik R2 do sygnału odbitego od płyty (odbiornik R1) w zależności od stosunku

między długością fali rozchodzącej się w stali a grubością przeszkody stalowej jest przedstawiony na rysunku 6.6. Przy częstotliwości 200 kHz i 450 kHz stosunek sygnału transmitowanego do odbitego jest minimalny dla długości fali $\lambda \sim 0,25$ g grubości płyty a swoje maksimum osiąga w okolicy $\lambda \sim 0,5$ g. Stosunek ten dla płyt o grubości równej długości fali ($g \approx \lambda$) jest około 60% niższy niż dla płyty o grubości równej połowie długości fali ($g \approx 0,5\lambda$).



Rysunek 6.6 Stosunek sygnału przechodzącego do sygnału odbitego, dla fali o częstotliwości 200 i 450 kHz, od stalowej płyty jako funkcja λ/g

6.2 Pomiary laboratoryjne przy obecności stalowej płyty

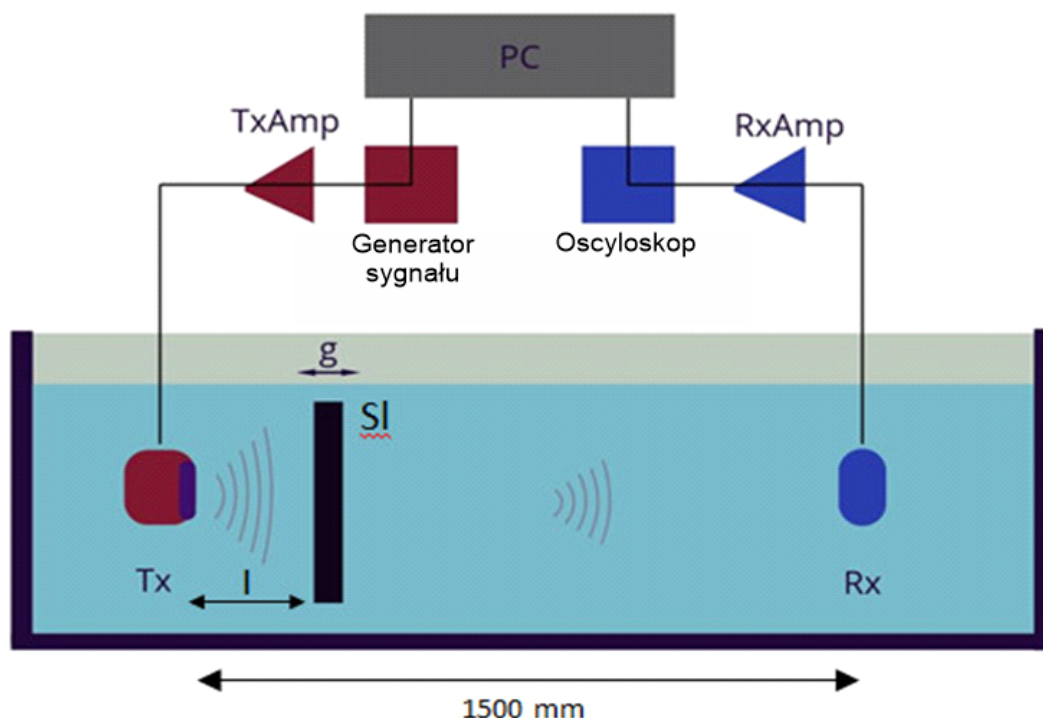
Badania symulacyjne opisane w Rozdziale 6.1 wykazały, że dla płyt stalowych o zadanych grubościach istnieją takie fale akustyczne o odpowiednich częstotliwościach, które przy przechodzeniu przez te metalowe przeszkody tracą najmniej energii w porównaniu z falami o innych częstotliwościach. W celu weryfikacji poprawności modelu i badań symulacyjnych wykonane zostały badania w warunkach laboratoryjnych. Badania te polegały na określeniu doświadczalnych wartości amplitudy sygnału transmitowanego przez równoległą płytę stalową o różnej grubości. Ponadto przeprowadzone zostały również badania mające na celu określenie wpływu odległości przetwornika ultradźwiękowego od stalowej przeszkody na amplitudę rejestrowanego sygnału przechodzącego. Uzupełniając tym samym badania przeprowadzone przez Michaud'a i jego współpracowników w zakresie pomiarów dla niskich częstotliwości stosowanych obecnie w systemach pomiarowych (Michaud i in., 2015).

W tym celu do badań użyto głowicy ultradźwiękowej ECT24™ - produktu firmy Echologger™, która może wytwarzać fale o częstotliwości 200 kHz oraz 450 kHz. Dodatkowo, dla rozszerzenia zakresu badań wykorzystano piezoceramiczne i piezomagnetyczne przetworniki ultradźwiękowe o średnicy 25 mm wykonane przez firmę „Chemkop”. Przetworniki piezoceramiczne mogą wytwarzać fale o częstotliwościach 25 kHz, 70 kHz, 100 kHz, a przetwornik piezomagnetyczny wytwarza falę o częstotliwości 47 kHz.

Laboratoryjny zbiornik o wymiarach 2000 mm x 1800 mm i wysokości 1000 mm napełniono wodą o temperaturze 20°C do wysokości 800 mm i umieszczano w nim odpowiednie nadajniki ultradźwiękowe (Rysunek 6.7). W odległości 1500 mm od nadajnika umieszczono odbiornik sygnału ultradźwiękowego „hydrofon Brüel & Kjær 8103™”. W zbiorniku umieszczono również stalową płytę S1 równoległą do

czoła nadajnika o stałej szerokości 400 mm i wysokości 500 mm, ale o różnej grubości g .

Sygnal nadawczy wytwarzany był przez nadajnik Tx w postaci paczki impulsów sinusoidalnych o zadanej częstotliwości, który generowany był przez generator funkcyjny Valleman PCGU1000™ i wzmacniany przez układ wzmacniacza lub sygnal ten generowany był przez wbudowany układ nadawczy w głowicy ultradźwiękowej ECT24™. Sygnal ultradźwiękowy rejestrowany był przez odbiornik Rx za pomocą hydrofonu współpracującego ze wzmacniaczem liniowym i oscyloskopem Valleman PCSU1000™.



Rysunek 6.7 Stanowisko laboratoryjne w badaniu przechodzenia fal ultradźwiękowych przez płyty stalowe

Własności akustyczne materiałów używanych w badaniach laboratoryjnych wykazane zostały w tabeli 6.3.

Tabela 6.3 Własności sprężyste materiałów używanych w badaniach laboratoryjnych

Właściwości	woda	Stal
Gęstość	1000 [kg/m ³]	7800 [kg/m ³]
Prędkość fali podłużnej	1483 [m/s]	5950 [m/s]
Impedancja akustyczna	1,48x10 ⁶ [kg/s m ²]	46,41x10 ⁶ [kg/s m ²]

6.3 Pomiary transmisji sygnału ultradźwiękowego przez płytę równoległą

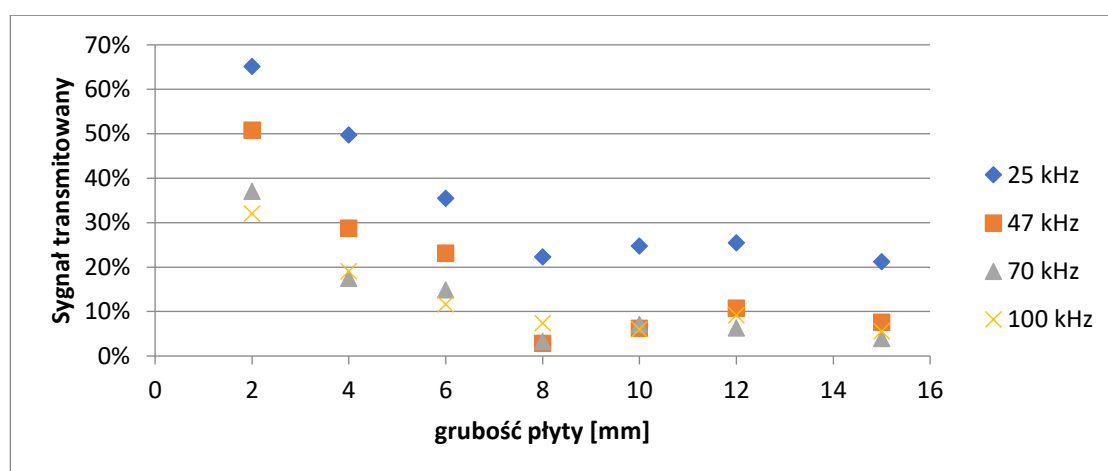
W pierwszej kolejności zmierzono hydrofonom amplitudy sygnału emitowanego z przetwornika ultradźwiękowego przy braku płyt stalowych. Zarejestrowany sygnał stanowił poziom odniesienia dla dalszych pomiarów. Następnie zmierzono amplitudę sygnału po jego przejściu przez płytę stalową o grubości kolejno równej 2, 4, 6, 8, 10, 12 oraz 15 mm umieszczoną w odległości 400 mm od przetwornika

ultradźwiękowego. Zarejestrowane sygnały fali o różnych częstotliwościach przechodzących przez płyty o w/w grubościach są przedstawione w tabeli 6.4.

Tabela 6.4. Amplitudy rejestrowanego sygnału fali z różną częstotliwością przechodzącej przez stalową płytę o różnej grubości

Częstotliwość [kHz]	Amplitudy rejestrowanego sygnału przechodzącego przez płyty stalowe							
	Bez płyty	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm	15 mm
-	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]
25kHz	660	430	328	234	147	163	168	140
47kHz	3720	1890	1070	860	106	232	400	282
70kHz	5910	2190	1030	880	192	420	370	233
100kHz	500	160	95	58	37	30	46	28
200kHz	3060	590	320	234	126	265	380	890
450kHz	1520	167	150	630	294	112	94	168

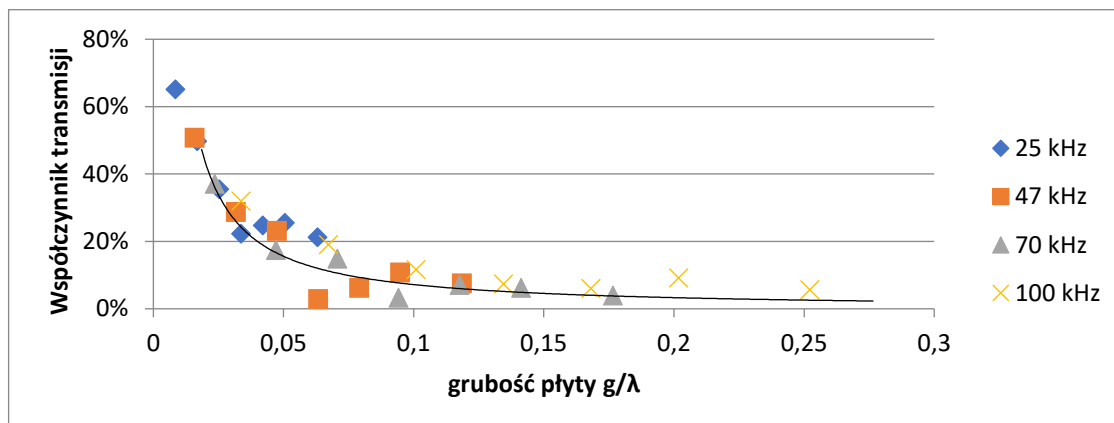
Z otrzymanych wyników pomiarowych, dla każdej częstotliwości, obliczono stosunki sygnałów rejestrowanych po przejściu fali przez płyty do sygnału przy braku płyty i sporządzono wykresy otrzymanych wartości w zależności od grubości płyty stalowej (Rysunek 6.8.). Dla najniższej częstotliwości tj. 25 kHz, poziom rejestrowanego sygnału odbiorczego w stosunku do poziomu odniesienia dla płyt o grubości od 8 do 15 mm wynosi ok. 20-25% i rośnie do poziomu ok. 65% dla płyty o grubości 2 mm. Podobnie jest dla częstotliwości 47 kHz, gdzie dla płyt o grubości 4 i 6 mm poziom sygnału wynosi 25 - 30% oraz 50% dla najcieńszej płyty. Dla wyższych częstotliwości tj. 70 kHz i 100 kHz jedynie płyta o grubości 2 mm umożliwia transmisję sygnału o wartościach powyżej 30%. Dla grubszych płyt poziom rejestrowanego sygnału wynosi poniżej 20%.



Rysunek 6.8 Stosunek procentowy rejestrowanych sygnałów fal przechodzących przez płyty o różnej grubości do sygnału rejestrowanego przy braku płyty

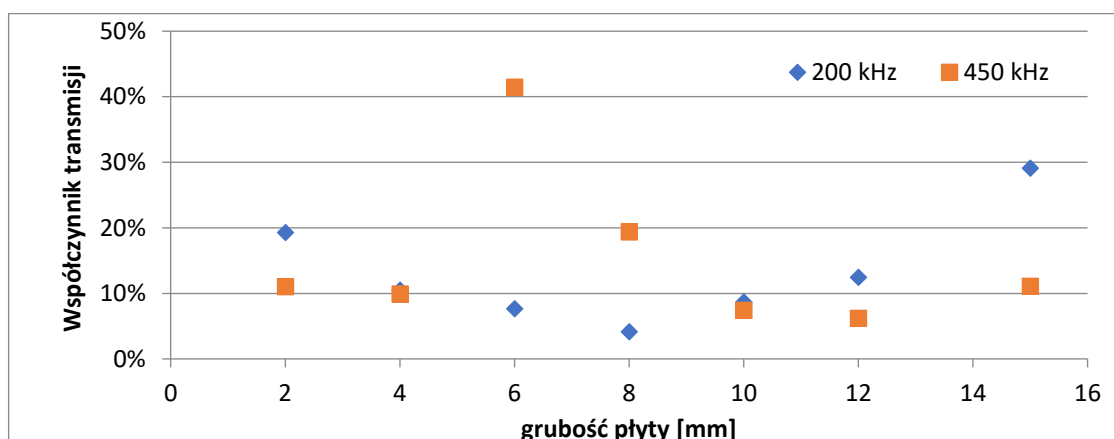
Wszystkie wymienione wyżej płyty mają grubości mniejsze niż $\frac{1}{4}$ długości fali akustycznej fal ultradźwiękowych o częstotliwościach od 25 do 100 kHz. Analiza wyników wykazuje, że najmniejsze wartości rejestrowanego sygnału wykazują płyty stalowe o grubości w okolicy jednej czwartej długości fali i w tym przypadku wynosi ona kilka procent. Wraz ze zmniejszeniem grubości płyty amplituda rejestrowanego

sygnału wyraźnie rośnie. Dla płyt o grubości poniżej $0,015 \lambda$ sygnał osiąga poziom powyżej 50% sygnału bezpośredniego (Rysunek 6.9). Procentowy stosunek sygnału transmitowanego przez płytę do sygnału przy braku płyty nazwano współczynnikiem transmisji.



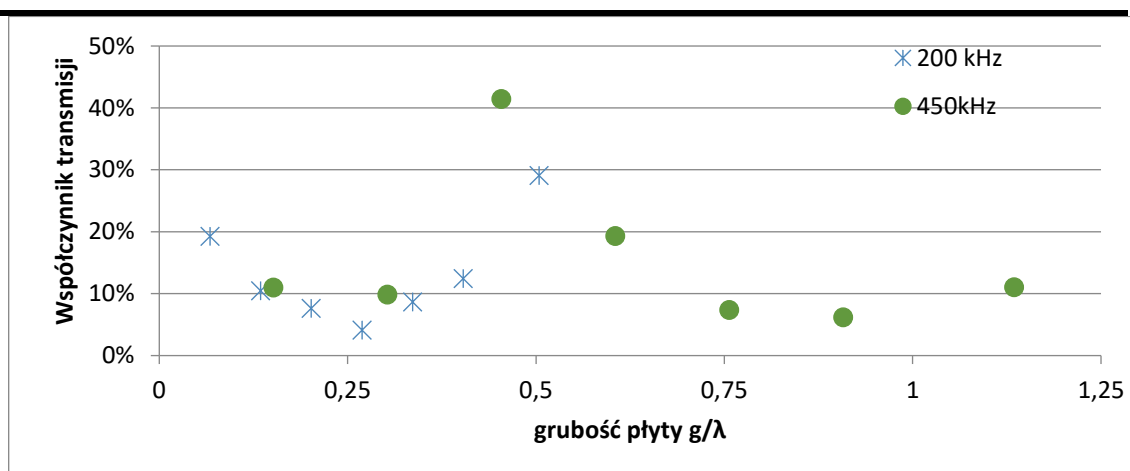
Rysunek 6.9 Zależność współczynnika transmisji sygnału przez płytę stalową o grubościach wyrażonych w jednostce długości fali.

Dla fali o częstotliwości 200 kHz współczynnik transmisji osiąga maksymalną wartość przy najgrubszej płycie (15 mm) i wynosi ok. 30%. Przy płycie o grubości 2 mm współczynnik transmisji również osiąga wysoką wartość i wynosi ok. 20%. Najmniejsze wartości sygnału odbiorczego, rzędu kilku procent, rejestrowano dla płyt o grubościach 6 – 10 mm. Dla fali o częstotliwości 450 kHz maksymalny sygnał odbiorczy został zarejestrowany dla płyty stalowej o grubości 6 mm i wynosił ponad 40% wartości sygnału bezpośredniego (Rysunek 6.10).



Rysunek 6.10 Zależność współczynnika transmisji sygnału przez płytę stalową o różnej grubości

W przypadku gdy grubość płyty wyrażona jest w jednostce długości fali, to dla fali o częstotliwości 200 kHz, grubości badanych płyt wynosiły od ok. $0,07$ do $0,5\lambda$, natomiast dla częstotliwości 450 kHz były to wartości w przedziale $0,15$ do $1,1\lambda$. Z analizy wyników można potwierdzić, że największa transmisja sygnału przez stalową równoległą przeszkodę zachodzi dla płyt o grubości w okolicach połowy długości fali (Rysunek 6.11). Ze względu na brak płyt, których grubość wynosi pełną długość fali dla częstotliwości 200 kHz oraz 450 kHz nie wykonano pomiarów dla takich przypadków.



Rysunek 6.11 Zależność współczynnika transmisji sygnału przy płycie stalowej o grubościach wyrazowych w jednostce długości fali

6.4 Badanie wpływu odległości przetwornika ultradźwiękowego od płyty stalowej na rejestrowany sygnał transmisyjny

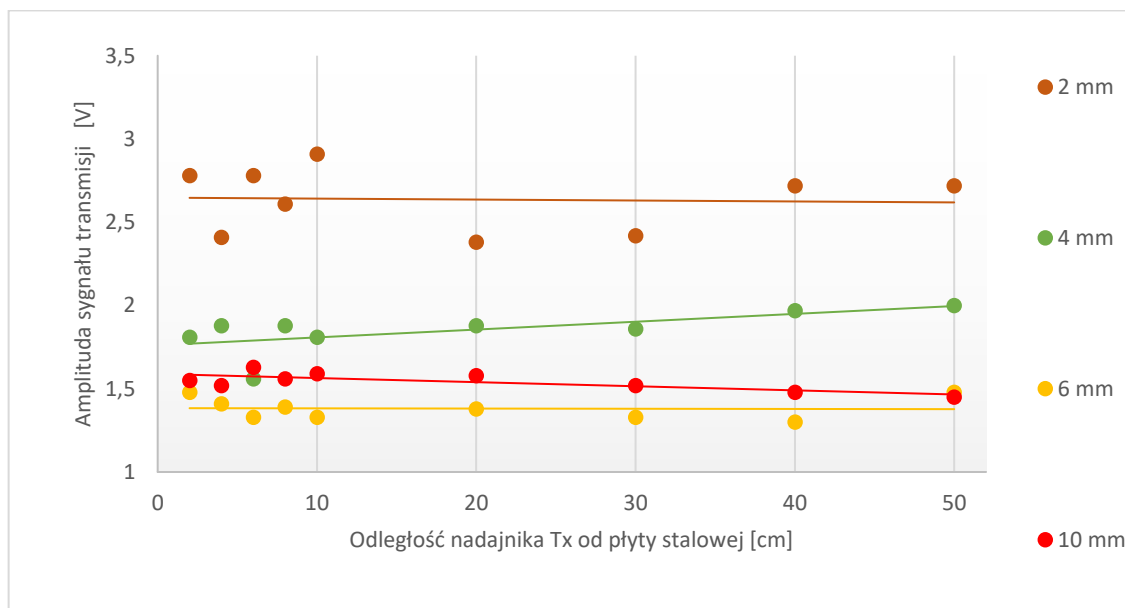
Badania wpływu odległości przetwornika ultradźwiękowego od metalowej przeszkody na poziom amplitudy rejestrowanego sygnału transmitowanego zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym. Badania wykonano dla sygnału nadawczego o częstotliwości 200 kHz i 450 kHz i płyt stalowych o grubości 2, 4, 6 i 10 mm. Pomiary wykonywano dla płyt zlokalizowanych w odległościach 0,02 - 0,5 m od przetwornika ultradźwiękowego. Sygnał przechodzący przez płytę rejestrowany był za pomocą hydrofonu znajdującego się po przeciwnej stronie płyty w odległości 1500 mm od nadajnika. Otrzymane wyniki są zestawione w tabeli 6.5.

Tabela 6.5 Zmierzone sygnały fal ultradźwiękowych po przechodzeniu przez stalowe płyty

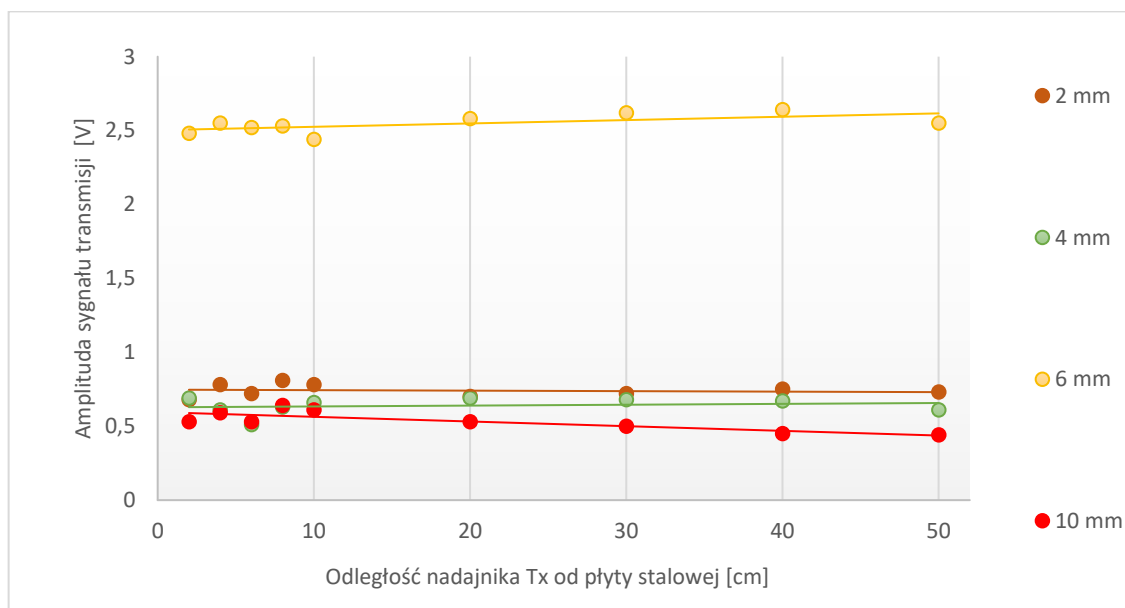
Płyta	Częstotliwość	Odległość płyty od nadajnika Tx [cm]									Średnia amplituda
		2	4	6	8	10	20	30	40	50	
10mm	200kHz	1,55	1,52	1,63	1,56	1,59	1,58	1,52	1,48	1,45	1,54
	450kHz	0,53	0,59	0,53	0,64	0,61	0,53	0,50	0,45	0,44	0,54
6mm	200kHz	1,48	1,41	1,33	1,39	1,33	1,38	1,33	1,3	1,48	1,38
	450kHz	2,48	2,55	2,52	2,53	2,44	2,58	2,62	2,64	2,55	2,55
4mm	200kHz	1,81	1,88	1,56	1,88	1,81	1,88	1,86	1,97	2,00	1,85
	450kHz	0,69	0,61	0,51	0,63	0,66	0,69	0,68	0,67	0,61	0,64
2mm	200kHz	2,78	2,41	2,78	2,61	2,91	2,38	2,42	2,72	2,72	2,64
	450kHz	0,68	0,78	0,72	0,81	0,78	0,7	0,72	0,75	0,73	0,74

Relacje pomiędzy amplitudą sygnału transmisyjnego a odległością przetwornika od płyt zostały przedstawione na Rysunkach 6.12 oraz 6.13. Zarówno dla częstotliwości 200 kHz jak również 450 kHz nie obserwowano statystycznie widocznych zmian amplitudy sygnału w zależności od odległości płyty stalowej od przetwornika ultradźwiękowego. Zmiany amplitudy sygnału w zależności od odległości nadajnika od płyty są małe i w większości przypadków nie przekraczają 10% wartości średniej

amplitudy w zakresie odległości 2 - 50 cm dla wszystkich badanych częstotliwości (Rysunki 6.12, 6.13).



Rysunek 6.12 Zmiany amplitudy sygnału transmitowanego w zależności od odległości pomiędzy przetwornikiem a płytą stalową o różnej grubości dla fali o częstotliwości 200 kHz

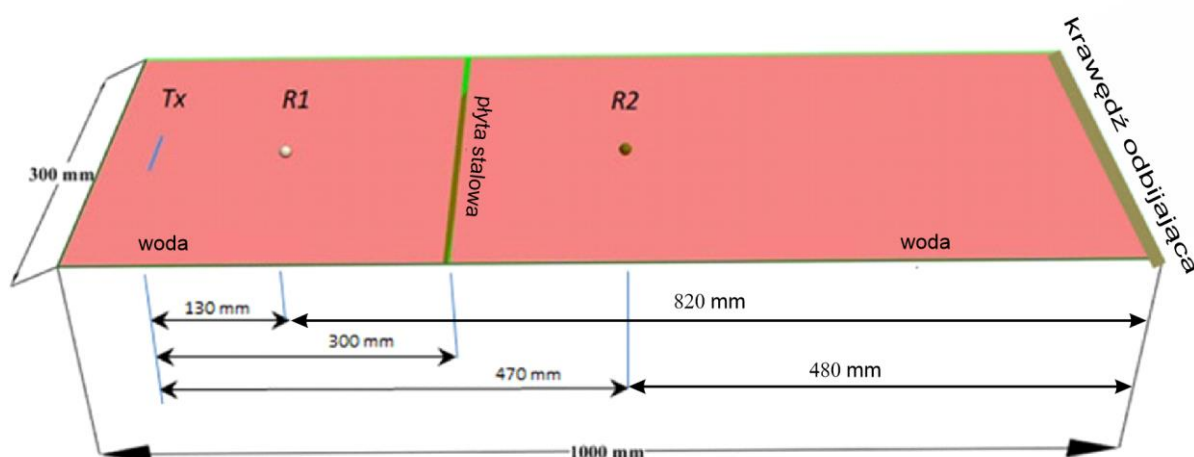


Rysunek 6.13 Zmiany amplitudy sygnału transmitowanego w zależności od odległości pomiędzy przetwornikiem a płytą stalową o różnej grubości dla fali o częstotliwości 450 kHz

6.5 Badania symulacyjne wpływu grubości warstwy stalowej i typu sygnału nadawczego na pomiar odległości nadajnika od ściany kawerny

W badaniach zastosowano model symulacyjny przedstawiony na rysunku 6.1, z jedną zmianą, że ściana końcowa (prawa krawędź) modelu całkowicie odbijała padającą na nią falę.

Symulacje polegały na emitowaniu sygnału ultradźwiękowego za pomocą nadajnika Tx, który po przejściu przez przeszkodę i odbiciu od krawędzi odbijającej modelu ponownie przechodził przez przeszkodę. Podczas całej symulacji zmiany ciśnienia akustycznego, w postaci przebiegu sygnału, były rejestrowane przez odbiorniki R1 i R2, które umieszczone zostały odpowiednio w odległości 130 mm oraz 470 mm od nadajnika. Odległość odbiorników R1 i R2 od odbijającej ściany modelu wynosiła odpowiednio 820 mm i 480 mm (Rysunek 6.14). Za pomocą odbiornika R1 rejestrowane były zarówno: sygnał bezpośredni z nadajnika, sygnał odbity od przeszkody oraz sygnał odbity od ściany modelu po przejściu przez przeszkodę. Odbiornik R2 rejestrował sygnał przechodzący przez przeszkodę oraz sygnał odbity od ściany modelu.



Rysunek 6.14 Model do badania sygnału odbitego od ściany kawerny z obecnością płyty stalowej

6.5.1 Wpływ grubości płyty na czas i amplitudę rejestrowanego echa odbitego od ściany zbiornika

W badaniu symulacyjnym emitowano paczkę nadawczą sygnału ultradźwiękowego o częstotliwości 450 kHz i czasie trwania 6,6 μ s z amplitudą 5 Pa. Sygnał ten po przejściu przez stalową przeszkodę odbijał się od ściany modelu i przechodził ponownie przez stalową warstwę, po czym rejestrowany był przez odbiornik R1. Czas przyjscia echa odbitego od krawędzi modelu do odbiornika określany był jako czas, który upłynął od chwili rozpoczęcia emisji sygnału nadawczego do momentu początku echa odbitego rejestrowanego sygnału. Odległość odbiornika R1 od nadajnika ultradźwiękowego wynosiła 130 mm, co przy założonej prędkości fali ultradźwiękowej 1496 m/s daje czas $t_0 = 86,9 \mu$ s, po tym czasie sygnał emisyjny przechodził z nadajnika do odbiornika R1. Zatem teoretyczny czas (t_k) rejestracji początku sygnału echa odbitego od krawędzi modelu oddalonego o 820 mm od R1, od momentu rozpoczęcia nadawania sygnału wynosi 1183 μ s. Odległość odbiornika

R1 od odbijającej krawędzi modelu może być obliczona w oparciu o czas sygnału echa odbitego od ściany modelu rejestrowany przez R1, dla każdej przeprowadzonej symulacji można obliczyć za pomocą wzoru:

$$d = (t - t_0) \cdot c/2 \quad (28)$$

gdzie:

d – odległość odbiornika R1 od ściany modelu,

t – czas rejestracji początku echa po odbiciu od ściany modelu przez odbiornik R1,

t_0 – czas, w którym sygnał przychodził od nadajnika Tx bezpośrednio do odbiornika R1 (przed przejściem przez płytę) - 86,9 μ s,

c – prędkość ultradźwięków w wodzie 1496 m/s.

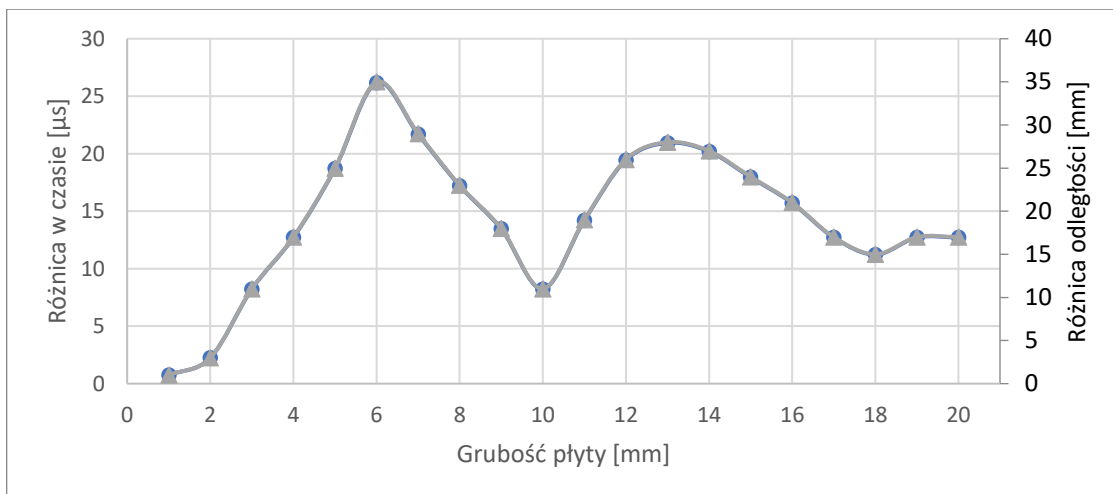
Amplituda sygnału odbitego od ściany modelu przy braku stalowej płyty w modelu wynosiła 2,40 Pa. Wartość ta stanowiła poziom odniesienia dla rejestrowanego sygnału echa w przypadku obecności stalowej płyty w zbiorniku.

Kolejno wykonano symulacje pomiarów odległości odbiornika R1 do prawej ściany modelu przy stalowej płycie o zmiennej grubości 1 - 20 mm. W tabeli 6.6 zestawiono czas odbioru echa sygnału odbitego od krawędzi modelu i różnicę między czasem rejestracji echa a czasem teoretycznym t_k . Wyliczono również odległości odbiornika R1 do prawej krawędzi modelu oraz różnicę między odległościami pomiarowymi a odległością modelową (820 mm). Określony został również procentowy stosunek amplitudy sygnału odbitego od ściany do sygnału zarejestrowanego w przypadku braku płyty stalowej.

Tabela 6.6 Zestawienie czasu odbioru echa, amplitudy oraz mierzonej odległości odbiornika R1 od ściany modelu dla częstotliwości nadajnika 450 kHz dla płyt o grubości od 1 mm do 20 mm

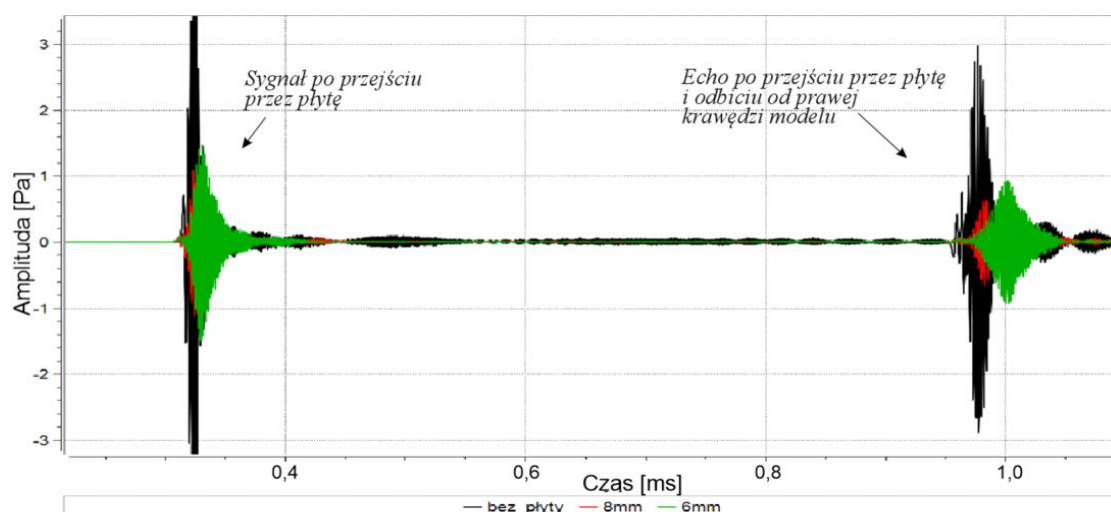
Lp.	Grubość płyty	Czas odbioru echa	Różnica czasu	Odległość	Różnica odległości	Amplituda sygnału	Stosunek amplitudy
	[mm]	[μ s]	[μ s]	[mm]	[mm]	[Pa]	[%]
1	bez płyty	1183	0	820	0	2,4	-
2	1	1184	1	821	1	0,1	4%
3	2	1186	3	822	2	0,05	2%
4	3	1194	11	828	8	0,04	2%
5	4	1200	17	833	13	0,06	3%
6	5	1208	25	839	19	0,1	4%
7	6	1218	35	846	26	0,54	23%
8	7	1212	29	842	22	0,48	20%
9	8	1206	23	837	17	0,27	11%
10	9	1201	18	833	13	0,1	4%
11	10	1194	11	828	8	0,07	3%
12	11	1202	19	834	14	0,13	5%
13	12	1209	26	839	19	0,19	8%
14	13	1211	28	841	21	0,23	10%
15	14	1210	27	840	20	0,24	10%
16	15	1207	24	838	18	0,23	10%
17	16	1204	21	836	16	0,13	5%
18	17	1200	17	833	13	0,1	4%
19	18	1198	15	831	11	0,12	5%
20	19	1200	17	833	13	0,12	5%
21	20	1200	17	833	13	0,1	4%

Na rysunku 6.15 przedstawiono różnicę zarejestrowanych czasów oraz mierzonej odległości dla sygnału echa odbitego od ściany zbiornika z wykorzystaniem fali nadawczej o częstotliwości 450 kHz przechodzącej przez płytę stalową o grubości 1 - 20 mm w stosunku do wyników otrzymanych z symulacji przy braku płyty w modelu.



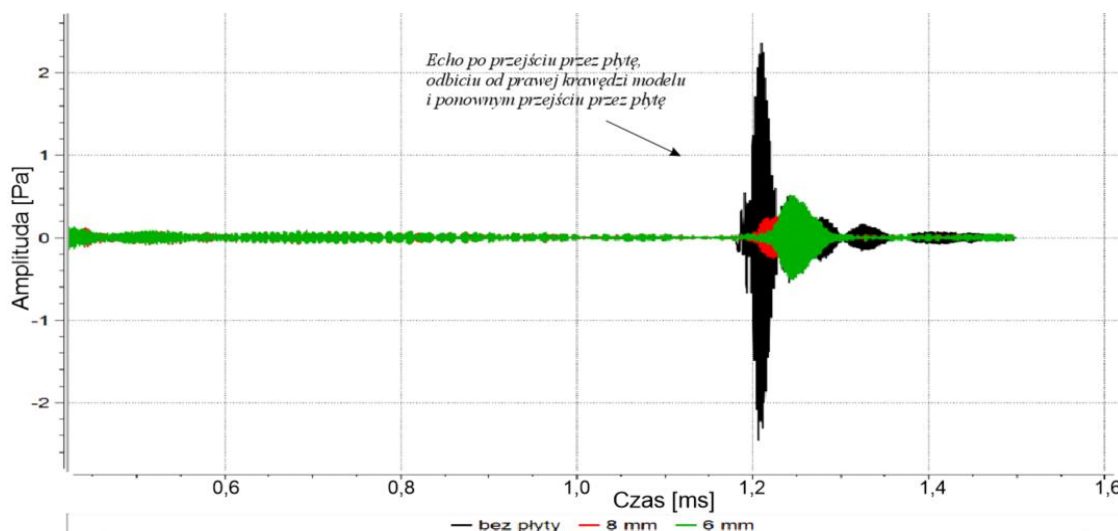
Rysunek 6.15 Różnice w czasie i w odległości odbiornika R1 od odbijającej krawędzi zbiornika dla sygnału echa odbitego z sygnału nadawczego o częstotliwości 450 kHz przy płycie stalowej o grubości od 1 mm do 20 mm

Wykonane symulacje wykazały, że grubość płyty stalowej ma wpływ na czas przyścia sygnału odbitego od krawędzi modelu do odbiornika R1. W sytuacji, kiedy grubość płyty wynosi około połowy długości fali albo równej długości fali następuje największe opóźnienie echa, powoduje to pozorne przedłużenie odległości odpowiednio o 35 mm oraz 28 mm. Przesunięcie sygnału zarejestrowane przez odbiornik R2 umieszczony za płytą stalową w stosunku do sygnału zarejestrowanego bez obecności przeszkody przedstawia Rysunek 6.16. Na tym rysunku przedstawiono echo sygnału o częstotliwości 450 kHz po przejściu przez płytę oraz po jego odbiciu od ściany modelowego zbiornika dla płyty o grubości w okolicach połowy długości fali.



Rysunek 6.16 Sygnały rejestrowane przez odbiornik R2 przy braku płyty (czarny), po przejściu przez płytę o grubości 8 mm i po odbiciu od ściany (czerwony) oraz po przejściu przez płytę o grubości 6 mm i po odbiciu od ściany (zielony)

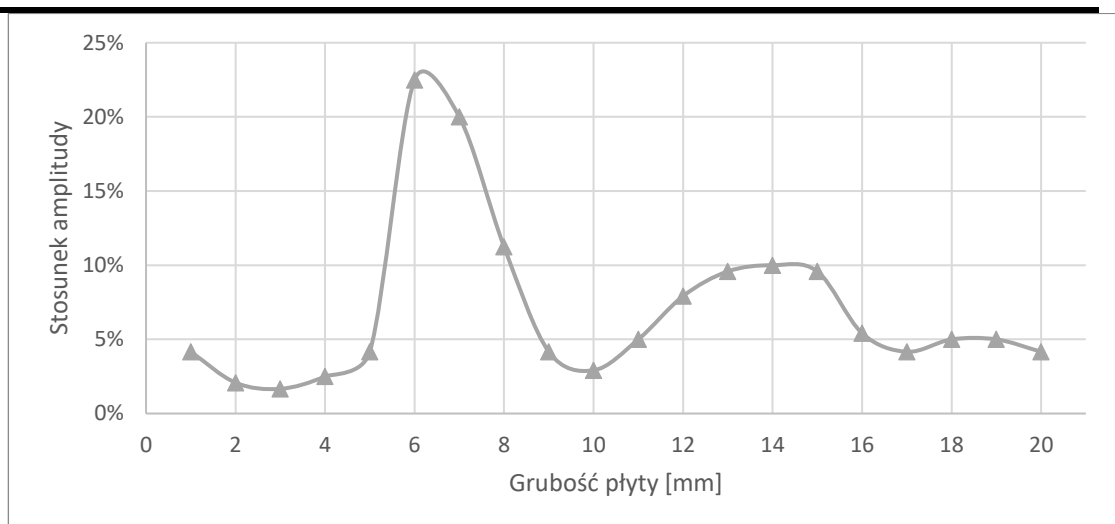
Na rysunku 6.17 przedstawiono sygnał echa odbitego od ściany modelowego zbiornika po przejściu przez płytę stalową o grubościach 6 i 8 mm dla sygnału nadawczego o częstotliwości 450 kHz oraz echo od sygnału o tej samej częstotliwości odbite od ściany zbiornika przy braku stalowej przeszkody rejestrowane przez odbiornik R1.



Rysunek 6.17 Przebieg sygnału o częstotliwości 450 kHz rejestrowany przez odbiornik R1 i echa odbite od ściany modelowego zbiornika przechodzącego przez płytę stalową o grubościach 6 i 8 mm oraz echo dla sygnału o tej samej częstotliwości odbitego od ściany modelowego zbiornika przy braku stalowej przeszkody

Z jednej strony obecność stalowej przeszkody o grubości 10 mm w modelu powinna wpłynąć na skrócenie czasu przejścia fali przez płytę o ok. 5 μ s z powodu większej prędkości fali w stali w stosunku do prędkości fali w wodzie. Jednakże już za przeszkodą sygnał jest opóźniony, co pozornie przesuwają w czasie rejestrowane echo. Sytuacja taka została zauważona wyraźnie dla płyt o grubości odpowiadającej wielokrotności połowy długości fali. To zjawisko prawdopodobnie związane jest z interferencją fal w czasie ich przechodzenia przez płytę i powinno zostać poddane odrębnej dokładnej analizie.

Na rysunku 6.18 przedstawiony został również procentowy stosunek amplitudy sygnału echa zarejestrowanego przez odbiornik R1, po odbiciu od ściany modelu i przejściu przez stalową przeszkodę do sygnału odbitego od ściany modelu przy braku płyty stalowej. Również w tym przypadku sygnały transmitowane przez płyty o grubościach w okolicach połowy długości fali oraz całej długości fali mają największe amplitudy (najmniej tracą energii przy przejściu przez płyty) w porównaniu z płytami o innych grubościach.



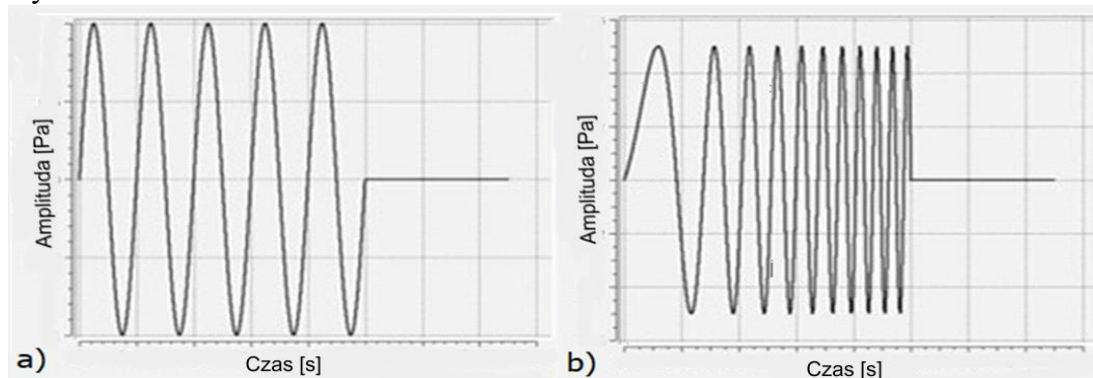
Rysunek 6.18 Procentowy stosunek amplitudy sygnału zarejestrowanego przez odbiornik RI, po odbiciu od ściany modelu i przejściu przez stalową przeszkodę o grubości od 1 mm do 20 mm do amplitudy sygnału odbitego od ściany modelu przy braku płyty stalowej. Częstotliwość sygnału nadawczego 450 kHz

Dla płyty stalowej o grubości 6 oraz 7 mm amplituda sygnału odbitego od ściany po przejściu przez płytę stalową osiąga największe wartości i wynosi odpowiednio 23% oraz 20 %, a dla płyt o grubościach 12 - 15 mm sygnał odbity osiąga wartości 8% - 10% sygnału odbitego od ściany zbiornika modelowego przy braku płyty.

6.5.2 Badania wpływu postaci sygnału nadawczego na amplitudę echa odbitego od ściany i na jego czas przyścia do odbiornika

Opisane w poprzednich rozdziałach badania symulacyjne i badania laboratoryjne wykazały, że dla fal o odpowiednio dobranych częstotliwościach, w zależności od grubości przeszkody, można transmitować sygnał ultradźwiękowy przez płytę stalową i określić odległość nadajnika od ściany znajdującej się za płytą.

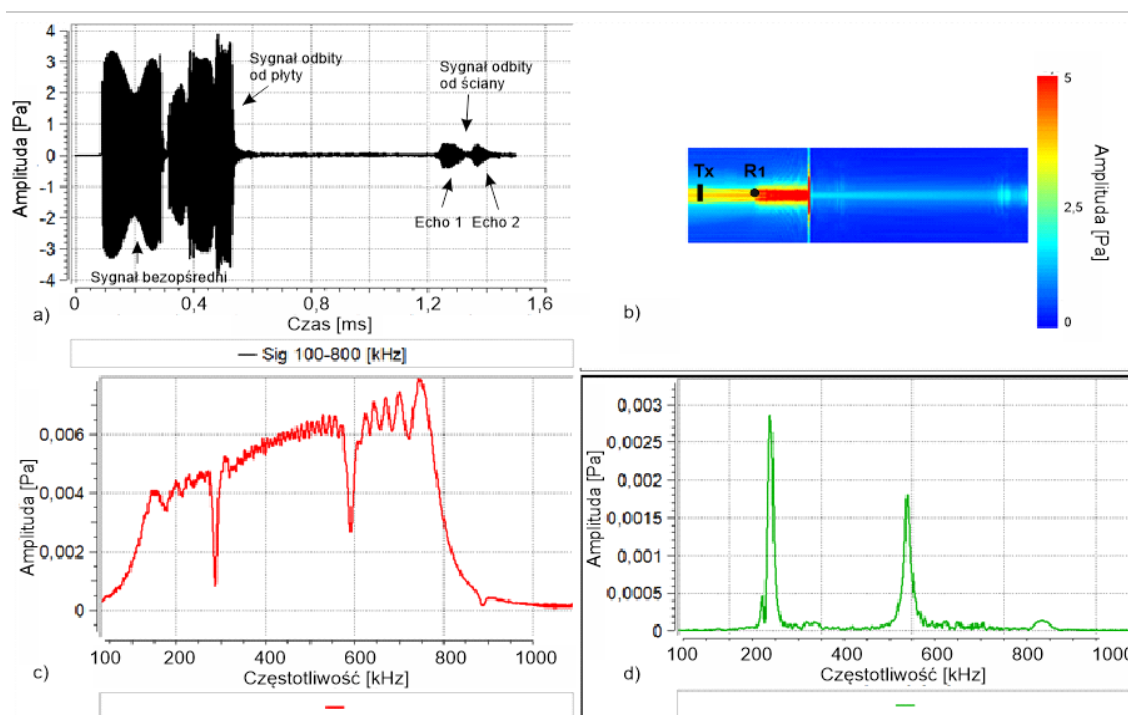
W celu określenia wpływu postaci generowanego sygnału nadawczego na amplitudę i czas przyścia echa odbitego od ściany modelu do odbiornika przeprowadzono kolejne symulacje dla płyty stalowej o grubości 10 mm i sygnałów nadawczych, które albo stanowiła paczka fali sinusoidalnej o pojedynczej częstotliwości, tzw. burst lub też fala z liniową modulacją częstotliwości (LFM – *Linear frequency-modulated*) (Rysunek 6.19). Amplituda sygnałów nadawczych dla wszystkich typów sygnałów wynosiła 5 Pa.



Rysunek 6.19 Sygnał nadawczy; a) sygnał sinusoidalny (burst), b) sygnał z liniową modulacją częstotliwości (LFM)

W pierwszej kolejności wykonano pomiar odległości odbiornika R1 od ściany modelu przy braku stalowej przeszkody. Amplituda sygnału po odbiciu od krawędzi modelu wyniosła 2,40 Pa, a początek echa zarejestrowano po czasie 1183 μ s. Sygnał ten stanowił wartość odniesienia dla porównania wyników otrzymanych w przypadku obecności stalowej płyty.

W pierwszej symulacji sygnał nadawczy był liniowo modulowany częstotliwościowo w zakresie 100 – 800 kHz, a czas jego trwania wynosił 200 μ s (3,5 kHz na 1 μ s). Odbiornik R1 rejestrował bezpośredni sygnał z nadajnika, sygnał odbity od przeszkody stalowej o grubości 10 mm oraz sygnał odbity od krawędzi modelu i przechodzący przez przeszkodę (Rysunek 6.20a). W wyniku symulacji uzyskano również rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego dla całego modelu (Rysunek 6.20b). Maksymalny poziom amplitudy wiązki ultradźwiękowej za płytą stalową, dla tej symulacji, wynosił 1,25 Pa (Rysunek 6.20b).



Rysunek 6.20 Wyniki symulacji dla sygnału nadawczego modulowanego częstotliwościowo w zakresie 100 – 800 kHz i płyty stalowej o grubości 10 mm, a) przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1, b) rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego w modelu, c) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od płyty, d) widmo sygnału odbitego od ściany modelu

Sygnał odbity od ściany modelu charakteryzuje się dwoma wyraźnymi obszarami o maksymalnej amplitudzie, czyli dwoma echami. Pierwsze z nich ma amplitudę 0,37 Pa natomiast drugie 0,33 Pa (Rysunek 6.20a). Analiza częstotliwościowa sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1 pozwala jednoznacznie odróżniać sygnał echa odbitego od przeszkody od echa odbitego od ściany modelu. Sygnały odbite od ściany modelu i przechodzące przez płytę stalową o grubości 10 mm mają częstotliwości odpowiadające długościom fali, które są wielokrotnością połowy grubości przeszkody, czyli tzw. częstotliwość rezonansową. W tym przypadku są to częstotliwości 290 kHz dla pierwszego echa sygnału odbitego oraz 590 kHz dla drugiego sygnału odbitego (Rysunek 6.20d). Wartości częstotliwości sygnału transmitowanego przez płytę stalową widoczne są również w widmie sygnału

odbitego od przeszkody jako lokalne minima (Rysunek 6.20c). Pierwsza z częstotliwości, czyli 290 kHz jest jednak mniejsza niż teoretycznie obliczona półfalowa częstotliwość rezonansowa o 5 kHz, natomiast druga częstotliwość odpowiada teoretycznej falowej częstotliwości rezonansowej.

W przypadku sygnału nadawczego z liniowo modulowaną częstotliwością sygnał o częstotliwości 290 kHz odbity od ściany modelu został zarejestrowany po czasie 1230 μs , a sygnał odbity o częstotliwości 590 kHz był rejestrowany po 1337 μs . Stanowi to opóźnienie o 47 μs dla pierwszego echa i 154 μs dla drugiego echa w stosunku do sygnału zarejestrowanego przy braku przeszkody stalowej. Przesunięcie między zarejestrowanymi sygnałami odbitymi od ściany modelu dla echa pierwszego i drugiego, związane jest głównie z różnicą czasu generowania częstotliwości rezonansowych dla sygnału nadawczego, która w tym przypadku wynosi 86 μs $((590 \text{ kHz} - 290 \text{ kHz}) / 3,5 \text{ kHz} \cdot \mu\text{s}^{-1})$ oraz nakładania się sygnałów wewnątrz stalowej płyty, co wprowadza dodatkowe opóźnienie. Amplituda pierwszego echa stanowi 15,8% echa sygnału odniesienia, a amplituda drugiego echa wynosi 14,1% echa sygnału odniesienia. W tabeli 6.7 zestawione są czasy przyścia ech o częstotliwościach 290 i 590 kHz do odbiornika R1 odbitych od krawędzi modelu, ich amplitudy i różnice czasu rejestracji sygnału oraz stosunek ich amplitud do echa przy braku stalowej przeszkody w modelu.

Tabela 6.7 Czas przyścia ech sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału nadawczego modulowanego częstotliwościowo w zakresie 100 – 800 kHz

Sygnał nadawczy 100 ÷ 800 kHz (LFM)	Czas rejestracji ech [μs]	Różnica czasów [μs]	Amplituda sygnału [Pa]	Stosunek amplitud [%]
Pierwsze echo odbite	1230	47	0,365	15,8
Drugie echo odbite	1337	154	0,325	14,1

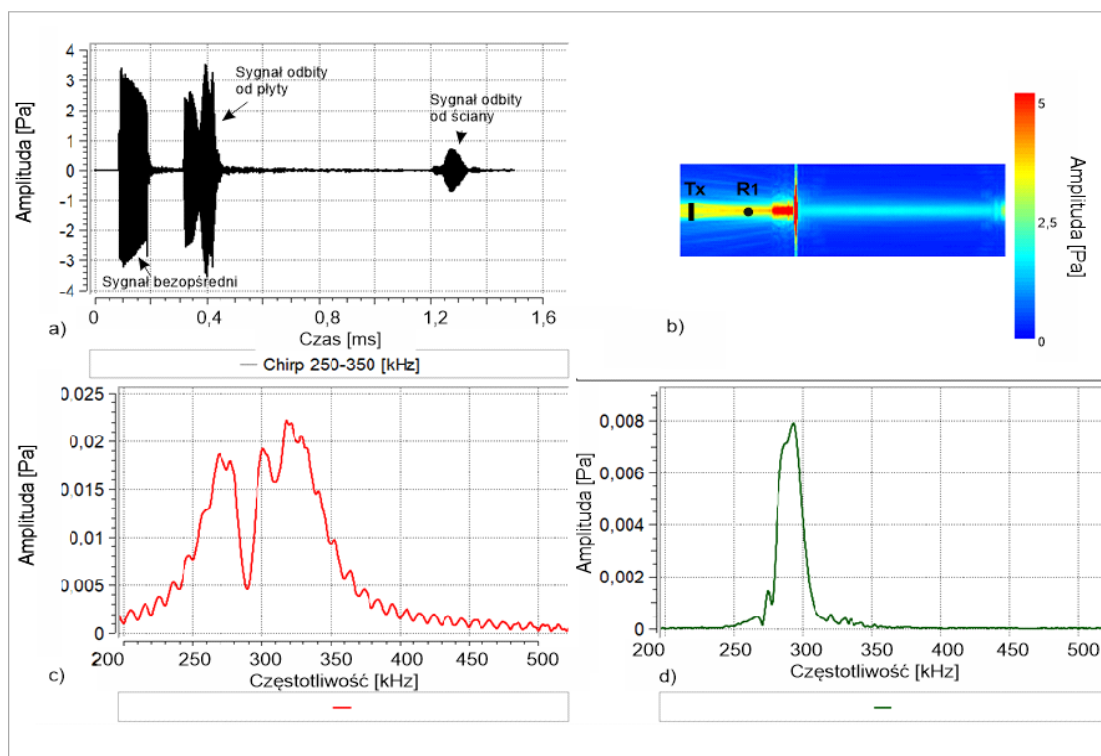
Powyższe przesunięcia sygnału echa powoduje, że mierzona odległość odbiornika R1 od odbijającej krawędzi badanego modelu wynosi 855 mm dla pierwszego echa oraz 935 mm dla echa drugiego. Te odległości są dłuższe od modelowej odległości (820 mm) o 35 mm dla pierwszego echa i 115 mm dla drugiego echa (Tabela 6.8).

Tabela 6.8 Odległości pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczone w oparciu o czasy przyścia sygnałów pierwszego (290 kHz) i drugiego (590 kHz) odbitych od ściany do odbiornika R1 przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnice w odległościach w odniesieniu do odległości obliczonej w przypadku braku stalowej przeszkody

Sygnał nadawczy 100 kHz – 800 kHz (LFM)	Mierzona odległość [mm]	Różnica odległości [mm]
Pierwsze echo odbite	855	35
Drugie echo odbite	935	115

W praktyce stosuje się przetworniki o węższym pasmie przenoszenia niż zastosowany w poprzedniej symulacji. Skłoniło to autora do wykonania symulacji dla sygnału liniowo modulowanej częstotliwości z mniejszym zakresem. W tym przypadku nadajnik generował sygnał z liniowo zmienną częstotliwością w zakresie 250 – 350 kHz w czasie 100 μs (1 kHz na 1 μs). Podobnie jak w poprzedniej symulacji,

odbiornik R1 zarejestrował echo bezpośrednie od nadajnika, echo odbite od metalowej przeszkody oraz echo odbite od ściany modelu i przechodzące przez przeszkodę. W tym przypadku odbiornik zarejestrował tylko jeden sygnał echa odbitego od ściany modelu, którego amplituda wyniosła 0,73 Pa (Rysunek 6.21a), co jest wartością prawie dwukrotnie wyższą niż w poprzedniej symulacji. Z analizy częstotliwościowej wynika, że odbity sygnał rejestrowany przez R1 miał częstotliwość 290 kHz. Maksymalna amplituda wiązki ultradźwiękowej za płytą stalową dla tej symulacji, wynosiła 1,70 Pa (Rysunek 6.21b).



Rysunek 6.21 Wyniki symulacji dla sygnału nadawczego modulowanego częstotliwościowo w zakresie 250 – 350 kHz i płyty stalowej o grubości 10 mm, a) przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1, b) rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego w modelu, c) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od płyty, d) widmo sygnału odbitego od ściany modelu

Początek echa odbitego od ściany modelu zarejestrowany został po czasie 1204 μ s od momentu nadania sygnału. W stosunku do symulacji przy braku stalowej przeszkody, echo odbite od ściany modelu jest opóźnione o 21 μ s (Tabela 6.9). Amplituda echa stanowi 30,4 % sygnału odniesienia.

Tabela 6.9 Czas przyjscia echa sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału modulowanego częstotliwościowo w zakresie 250 – 350 kHz

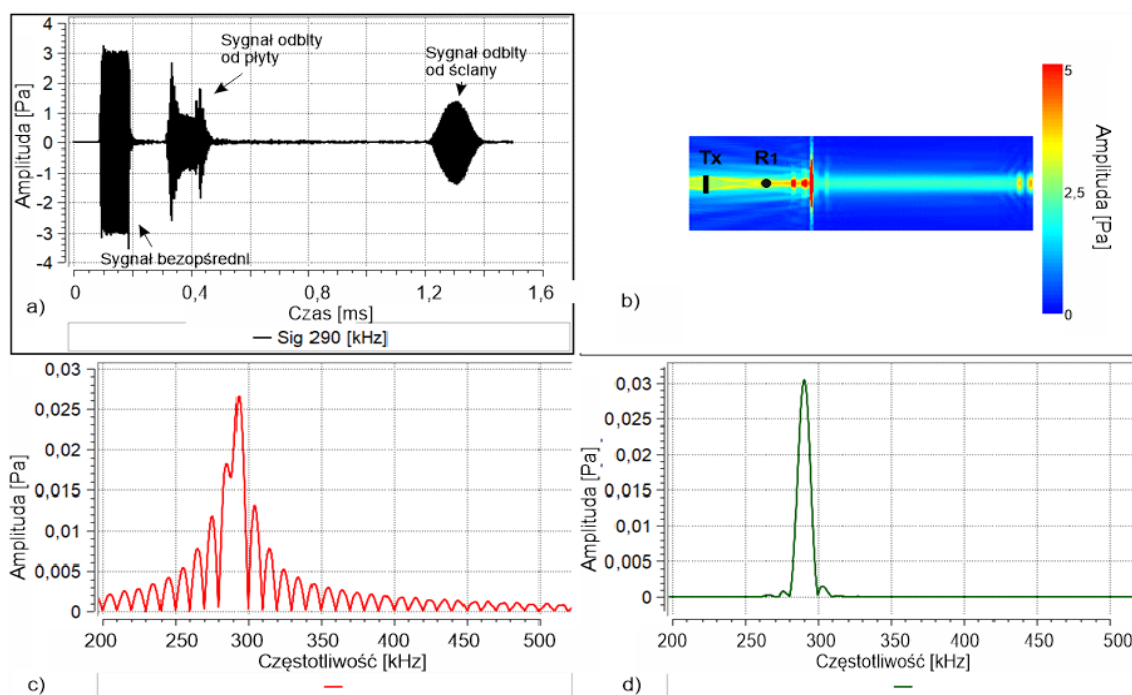
Sygnał nadawczy 250 kHz÷350 kHz (LFM)	Czas rejestracji echa [μ s]	Różnica czasów [μ s]	Amplituda sygnału [Pa]	Stosunek amplitud [%]
Echo odbite	1204	21	0,73	30,4

Mierzona odległość odbiornika R1 od krawędzi odbijającej badanego modelu wynosi 835,6 mm i jest dłuższa od modelowej odległości (820 mm) o 15,6 mm (Tabela 6.10).

Tabela 6.10 Odległość pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczona w oparciu o czas przyjscia sygnału do R1 odbitego od ściany przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnica odległości obliczonej przy braku stalowej przeszkody

Sygnał nadawczy 250 kHz – 350 kHz (LFM)	Mierzona odległość [mm]	Różnica odległości [mm]
Echo odbite	835,6	15,6

Z poprzedniej symulacji wynika, że amplituda sygnału odbitego od ściany kawerny i przechodzącego przez płytę do odbiornika R1 była największa dla częstotliwości 290 kHz, z tego powodu wykonano kolejną symulację, gdzie sygnał o tej właśnie częstotliwości nadawany był przez 100 μ s. W tym przypadku zarejestrowano sygnały echa bezpośrednio emitowanego z nadajnika, sygnał odbity od stalowej przeszkody oraz sygnał echa odbity od krawędzi modelu (Rysunek 6.22). Amplituda echa odbitego od ściany modelu wyniosła 1,38 Pa (57,5% sygnału odniesienia), natomiast maksymalny poziom amplitudy wiązki ultradźwiękowej za płytą stalową wynosił 2,03 Pa.



Rysunek 6.22 Wyniki symulacji dla sygnału nadawczego typu burst o częstotliwości 290 kHz i płyty stalowej o grubości 10 mm, a) przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1, b) rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego w modelu, c) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od płyty, d) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od ściany modelu

Początek sygnału odbitego od ściany został zarejestrowany po czasie 1215 μ s, w stosunku do sygnału odniesienia on jest przesunięty o 33 μ s (Tabela 6.11).

Tabela 6.11 Czas przyjscia echa sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału typu burst o częstotliwości 290 kHz.

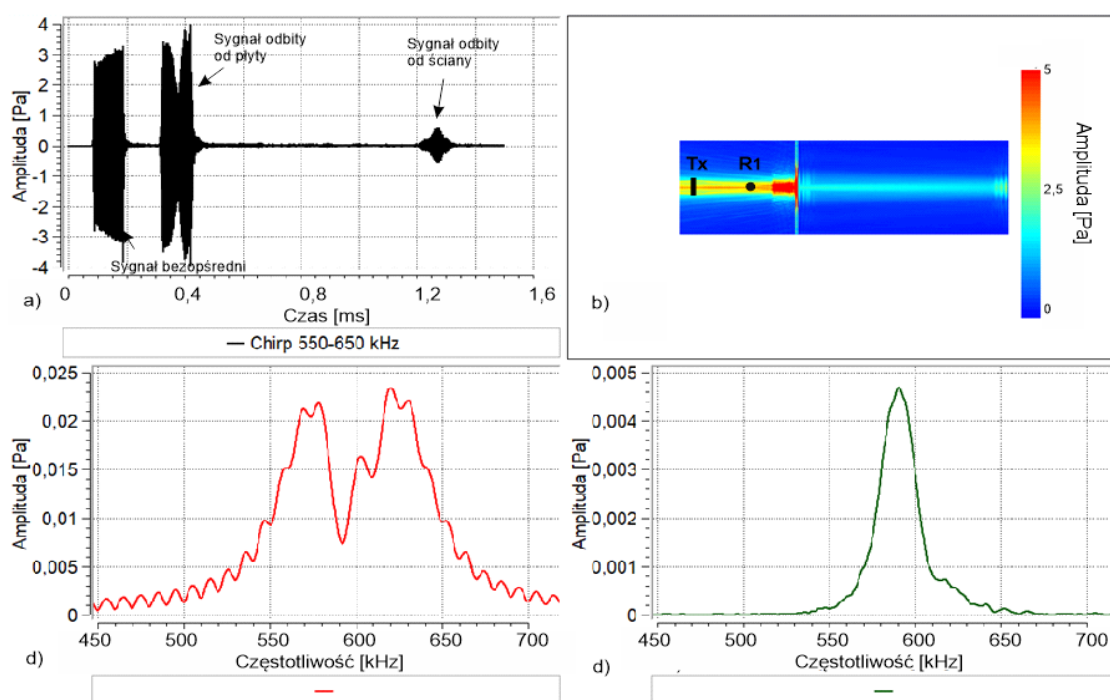
Sygnał nadawczy 290 kHz (burst)	Czas rejestracji echa [μ s]	Różnica czasów [μ s]	Amplituda sygnału [Pa]	Stosunek amplitud [%]
Echo odbite	1215	33	1,38	57,5

Przeliczając rejestrowane czasy otrzymanego sygnału echa odbitego, odległość odbiornika R1 od ściany modelu dla przeprowadzonej symulacji wynosi 843,8 mm i jest dłuższa o 23,8 mm w stosunku do odległości dla sygnału odniesienia (Tabela 6.12).

Tabela 6.12 Odległość pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczona w oparciu o czas przyścia sygnału do R1 odbitego od ściany przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnica odległości obliczonej przy braku stalowej przeszkody

Sygnał nadawczy 290 kHz (burst)	Mierzona odległość [mm]	Różnica odległości [mm]
Echo odbite	843,8	23,8

Wyniki uzyskane z pierwszej symulacji dla pierwszej częstotliwości rezonansowej (Rysunek 6.20) przyczyniły się do wykonania badań symulacyjnych dla drugiej częstotliwości rezonansowej. W związku z tym wykonano symulację dla sygnału nadawczego o liniowo modulowanej częstotliwości w zakresie 550 - 650 kHz. Sygnał nadawczy, podobnie jak poprzednio, generowany był przez czas 100 μ s (1 kHz na 1 μ s). Amplituda echa odbitego od ściany modelu dla wykonanej symulacji wynosiła 0,59 Pa, co stanowi 24,6% amplitudy sygnału odniesienia. Częstotliwość zarejestrowanego echa wynosi 590 kHz (Rysunek 6.23). Maksymalny poziom amplitudy wiązki ultradźwiękowej za płytą stalową, dla tej symulacji to 1,80 Pa.



Rysunek 6.23 Wyniki symulacji dla sygnału nadawczego modulowanego częstotliwościowo w zakresie 450 - 550 kHz i płyty stalowej o grubości 10 mm, a) przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1, b) rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego w modelu, c) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od płyty, d) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od ściany modelu

Echo odbite od ściany modelu zarejestrowano po czasie 1205 μ s. W stosunku do sygnału odniesienia początek echa przesunięty jest o 22 μ s (Tabela 6.13).

Tabela 6.13 Czas przyścia echa sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału modulowanego częstotliwościowo w zakresie 550 - 650 kHz

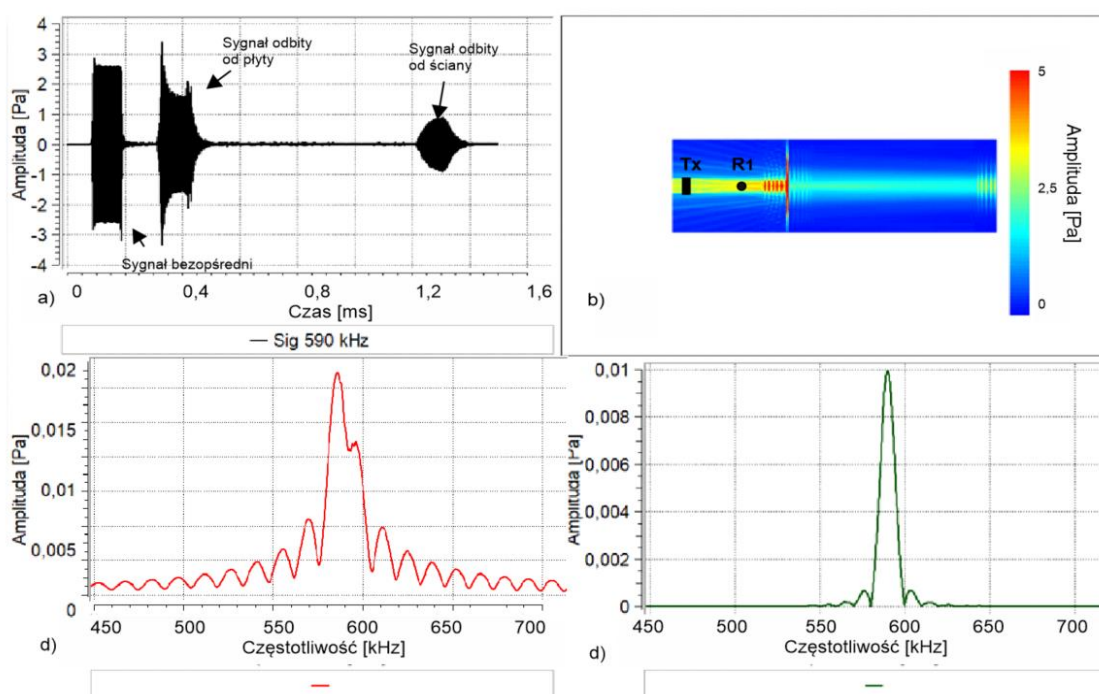
Sygnał nadawczy 550 kHz – 650 kHz (LFM)	Czas rejestracji echa [μs]	Różnica czasów [μs]	Amplituda sygnału [Pa]	Stosunek amplitud [%]
Echo odbite	1205	22	0,59	24,6

Mierzona odległość odbiornika R1 od krawędzi odbijającej badanego modelu wynosi 836,3 mm i jest dłuższa od modelowej odległości (820 mm) o 16,3 mm (Tabela 6.14).

Tabela 6.14 Odległość pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczona w oparciu o czas przyścia sygnału do R1 odbitego od ściany przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnica odległości obliczonej przy braku stalowej przeszkody

Sygnał nadawczy 550 – 650 kHz (LFM)	Mierzona odległość [mm]	Różnica odległości [mm]
Echo odbite	836,3	16,3

Biorąc pod uwagę fakt, że największą amplitudę sygnału echa odbitego od ściany modelu zarejestrowano dla częstotliwości 590 kHz, kolejną symulację przeprowadzono generując sygnał nadawczy o tej właśnie częstotliwości w czasie 100 μs. Wyniki symulacji przedstawione zostały na rysunku 6,24. Amplituda sygnału echa odbitego od ściany modelu dla tego przypadku wyniosła 0,88 Pa, co stanowi 36,7 % amplitudy sygnału odniesienia. Maksymalny poziom amplitudy wiązki ultradźwiękowej za płytą stalową, dla tej symulacji to 2,04 Pa.



Rysunek 6.24 Wyniki symulacji dla sygnału nadawczego typu burst o częstotliwości 290 kHz i płyty stalowej o grubości 10 mm, a) przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1, b) rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego w modelu, c) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od płyty, d) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od ściany modelu

Echo odbite od ściany modelu zarejestrowano po czasie 1214 μs . W stosunku do sygnału odniesienia początek echa przesunięty jest o 31 μs (Tabela 6.15).

Tabela 6.15 Czas przyjscia echa sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału typu burst o częstotliwości 590 kHz.

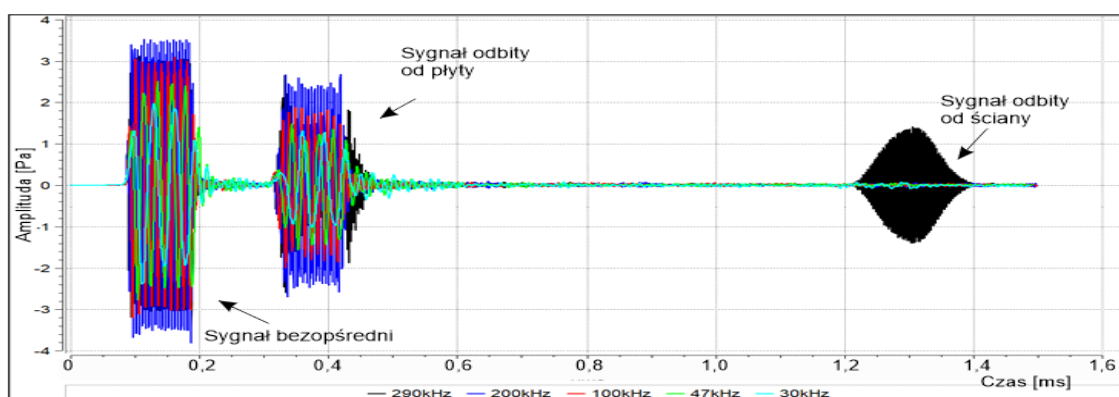
Sygnał nadawczy 590 kHz (burst)	Czas rejestracji echa [μs]	Różnice czasów [μs]	Amplituda sygnału [Pa]	Stosunek amplitud [%]
Echo odbite	1214	31	0,88	36,7

Mierzona odległość odbiornika R1 od krawędzi odbijającej badanego modelu wynosi 843,1 mm i jest dłuższa od modelowej odległości (820 mm) o 23,1 mm (Tabela 6.16).

Tabela 6.16 Odległość pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczona w oparciu o czas przyjscia sygnału do R1 odbitego od ściany przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnica odległości obliczonej przy braku stalowej przeszkody

Sygnał nadawczy 590 kHz (burst)	Mierzona odległość [mm]	Różnica odległości [mm]
Echo odbite	843,1	23,1

Dodatkowo wykonane zostały symulacje, gdzie nadawano sygnał ultradźwiękowy typu burst o czasie trwania 100 μs i częstotliwościach 30, 47, 100 i 200 kHz. Otrzymano przebiegi sygnałów zarejestrowanych przez odbiornik R1 (Rysunek 6.25), w których można wyróżnić echo sygnału bezpośredniego, echo odbite od metalowej płyty o grubości 10 mm oraz sygnał echa odbitego od ściany modelu. Dla porównania przebiegów sygnałów na rysunku 6.25 przedstawiono również sygnał zarejestrowany przez odbiornik R1 gdzie częstotliwość sygnału nadawczego wynosiła 290 kHz.



Rysunek 6.25 Przebiegi sygnałów zarejestrowanych przez odbiornik R1 dla sygnałów nadawczych o częstotliwościach 30, 47, 100 i 200 kHz przechodzących przez płytę stalową o grubości 10 mm i odbitych od ściany modelu. Linia czarna – sygnał odbity od ściany modelu dla częstotliwości nadawczej 290 kHz

Zarejestrowano wyraźny sygnał bezpośredni oraz sygnał odbity od metalowej przeszkody. Amplituda echa odbitego od krawędzi modelu była na granicy średniego poziomu szumu sygnału (0,03 Pa) i dla częstotliwości 30 kHz wynosiła 0,07 Pa, dla 47 kHz to 0,04 Pa, a dla 200 kHz to 0,05 Pa (Tabela 6.17). Dla częstotliwości 100 kHz nie określono amplitudy sygnału odbitego, ponieważ jego poziom był zbyt niski.

Tabela 6.17 Czas przyścia echa sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału typu burst o częstotliwości 30, 47, 100 oraz 200 kHz.

Sygnał nadawczy (burst) [kHz]	Czas rejestracji echa [μ s]	Różnice w czasach [μ s]	Amplituda sygnału [Pa]	Stosunek amplitud [%]
30	1219	36	0,07	2,9
47	1225	42	0,04	1,7
100	-	-	-	-
200	1212	29	0,05	2,1

Przeliczone odległości ściany modelu od odbiornika R1 oraz różnice odległości w stosunku do modelowej odległości przedstawione zostały w tabeli 6.18.

Tabela 6.18 Odległość pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczona w oparciu o czas przyścia sygnału do R1 odbitego od ściany przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnica odległości obliczonej przy braku stalowej przeszkody

Sygnał odbity od ściany (burst) [kHz]	Odległość przy początku echa [mm]	Różnica odległości [mm]
30	846,8	26,8
47	851,3	31,3
100	-	-
200	841,6	21,6

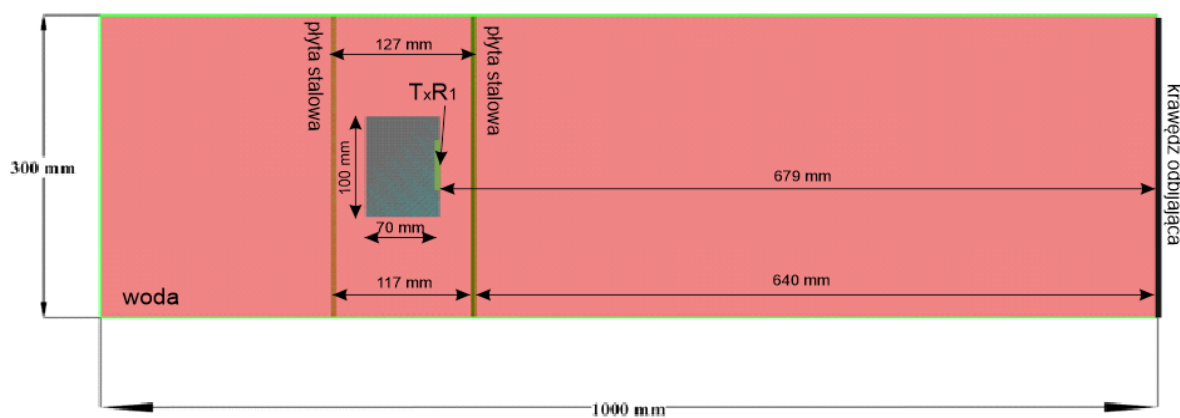
Bardzo niski poziom sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1 skutkował problemami z określeniem dokładnego początku czasu rejestracji ech odbitych od ściany modelu, wyniki pomiaru odległości odbiornika od krawędzi dla częstotliwości poza zakresem częstotliwości rezonansowych płyty obarczone są dużym błędem.

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że dla sygnału nadawczego o czasie trwania 100 μ s największe amplitudy sygnału odbitego od ściany modelu po przejściu przez metalową przeszkodę o grubości 10 mm zarejestrowano dla sygnału nadawczego o częstotliwości 290 kHz. Poziom zarejestrowanego echa wynosi 57,5% sygnału odniesienia. Generowanie paczki sygnału nadawczego o częstotliwości 590 kHz, czyli drugiej częstotliwości rezonansowej, skutkowało rejestracją echa odbitego na poziomie 36,7% sygnału odniesienia. Dla sygnału nadawczego liniowo modulowanego częstotliwościowo wartości te wynoszą odpowiednio 30,4% oraz 24,6% dla sygnałów z przedziału 250 – 350 kHz oraz 550 – 650 kHz. Generowanie sygnałów nadawczych typu burst o częstotliwościach rezonansowych powoduje również pozorne przesunięcie sygnału echa odbitego i zwiększenie odległości odbiornika R1 od ściany modelu o ok. 24 mm. Mniejsze przesunięcie odległości występuje przy zastosowaniu sygnału nadawczego modulowanego częstotliwościowo w okolicy częstotliwości rezonansowych płyty. Mierzona odległość jest dłuższa od modelowej o ok. 15 mm.

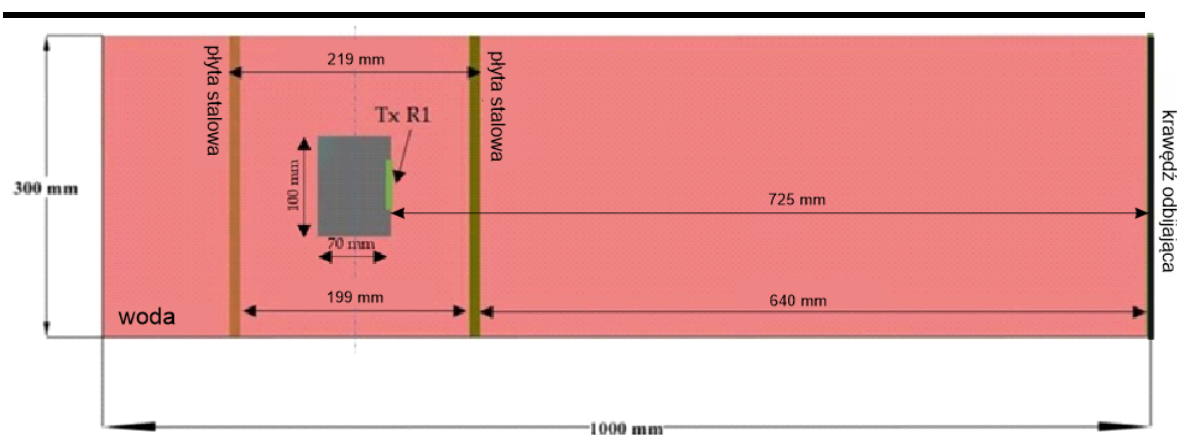
6.5.3 Symulacja pomiarów odległości w przypadku, kiedy przetwornik umieszczony jest między dwoma równoległymi płytami

W celu zbadania możliwości pomiaru odległości zbudowano model symulacyjny, w którym głowica ultradźwiękowa znajduje się w przestrzeni między dwoma równoległymi przeszkodami stalowymi. Taka geometria jest zbliżona do rzeczywistej geometrii pomiarowej, w której echosonda znajduje się we wnętrzu rury ługowniczej o średnicy zewnętrznej 127 mm (5") ze ścianą o grubości 5 mm (Rysunek 6.26) lub rury o średnicy zewnętrznej 219 mm (8 5/8") ze ścianą o grubości 10 mm (Rysunek 6.27). Przetwornik ultradźwiękowy o wysokości 50 mm, umieszczony został na przodzie warstwy tłumiącej o wymiarach 70 na 100 mm. Takie rozmiary obudowy wykonanej z materiału mocno pochłaniającego fale ultradźwiękowe, umożliwiają wytłumienie wstecznego promieniowania ultradźwiękowego. Odległość przetwornika od prawej ściany modelu wynosi 725 mm w przypadku rury o średnicy 219 mm oraz 679 mm w przypadku rury o średnicy 127 mm. W symulacji przetwornik ultradźwiękowy odgrywa podwójną rolę jako nadajnik Tx i odbiornik R1 fal ultradźwiękowych. Częstotliwość sygnału nadawczego 590 kHz została wybrana dla obu rur o średnicach zewnętrznych 127 i 219 mm. Częstotliwość ta odpowiadała pierwszej częstotliwości rezonansowej dla grubości ścianki 5 mm, natomiast dla rury o grubości ściany 10 mm odpowiadała drugiej częstotliwości rezonansowej. Dla rury o większym promieniu przeprowadzono również symulację z częstotliwością sygnału nadawczego 290 kHz, czyli w okolicach pierwszej częstotliwości rezonansowej, dla której w rozdziale 6.3.2 uzyskano największą amplitudę sygnału przechodzącego przez płytę o grubości 10 mm. Dla wszystkich symulacji amplituda sygnału nadawczego wynosiła 50 Pa.

Czas przebiegu całej symulacji określony został na poziomie 1,6 ms i był wystarczająco długi, żeby sygnał od momentu emisji, przechodził przez ścianę rury, został odbity od ściany kawerny (krawędzi odbijającej) i wrócił do odbiornika umieszczonego w głowicy. Takie badania umożliwiły analizę wpływu równoległych przeszkód znajdujących się z dwóch stron przetwornika pomiarowego, które symulują przekrój pionowy przez głowicę pomiarową umieszczoną w rurze stalowej, na rejestrację sygnałów odbitych od ściany modelu.

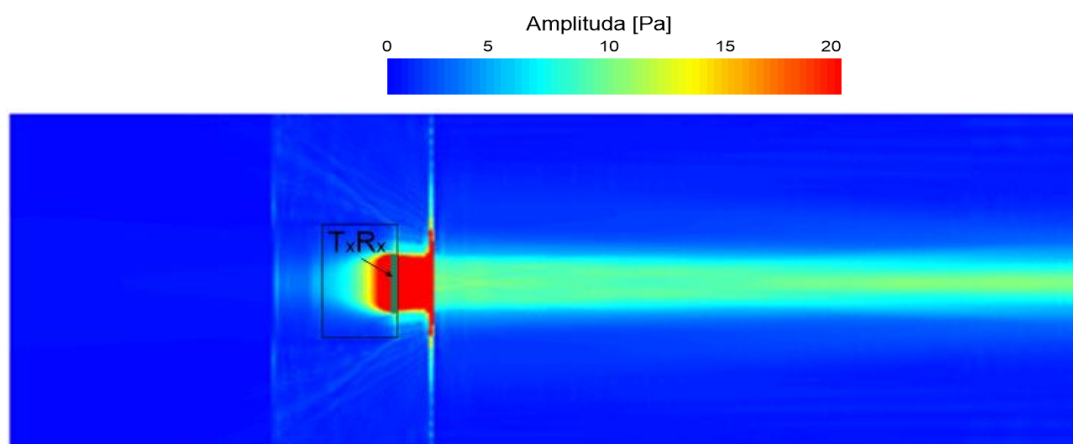


Rysunek 6.26 Model do badania rejestracji sygnałów odbitych od ściany kawerny, kiedy sonda pomiarowa znajduje się między stalowymi płytami o grubości 5 mm oddległymi od siebie o 127 mm

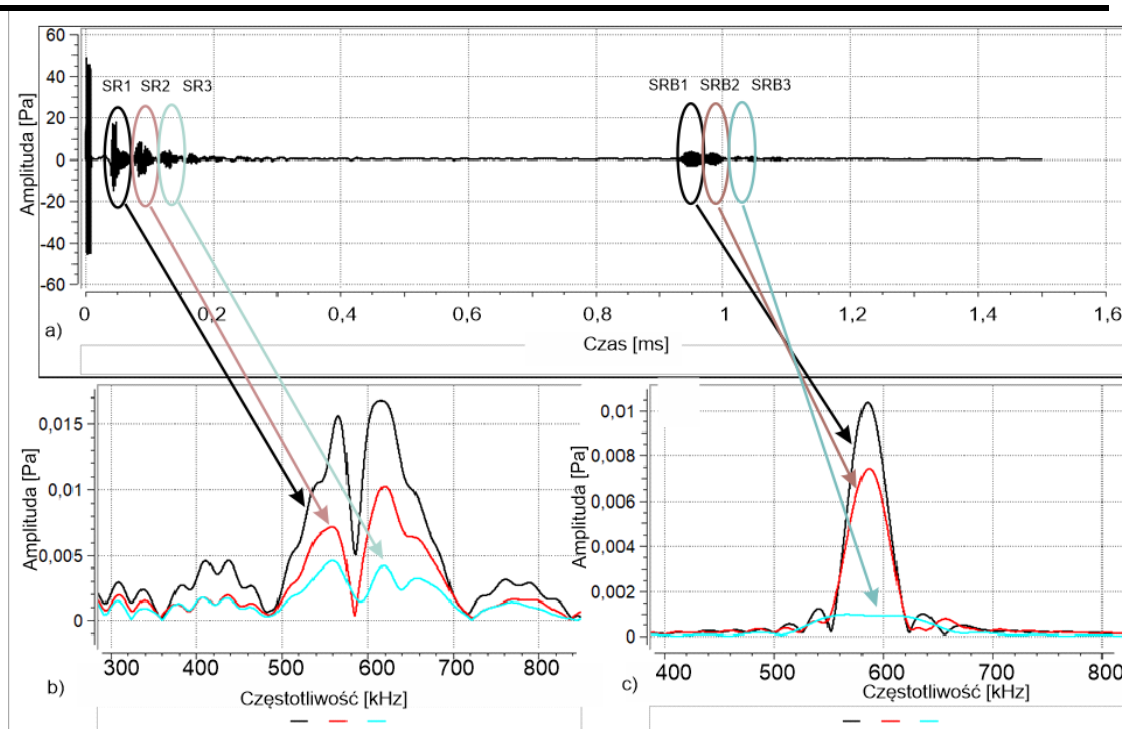


Rysunek 6.27 Model do badania rejestracji sygnałów odbitych od ściany kawerny, kiedy sonda pomiarowa znajduje się między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm

Pierwsza symulacja polegała na umieszczeniu głowicy pomiarowej między stalowymi płytami o grubości 5 mm odpowiadającymi rurze o średnicy 127 mm, w odległości 679 mm od prawej ściany modelu. Nadajnikiem ultradźwiękowym Tx wyzwalano sygnał ultradźwiękowy o częstotliwości 590 kHz i czasie trwania 8,5 μ s. Rozkład ciśnienia akustycznego przedstawiony został na rysunku 6.28. Na tym rysunku widać, że maksymalne ciśnienie akustyczne generowane jest na linii między czołem głowicy pomiarowej a płytą. Natomiast średnie ciśnienie akustyczne emitowanego sygnału w osi między płytą stalową a krawędzią odbijającą modelu wynosiło 9,85 Pa.



Rysunek 6.28 Rozkład ciśnienia akustycznego dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a częstotliwość sygnału nadawczego wynosiła 590 kHz

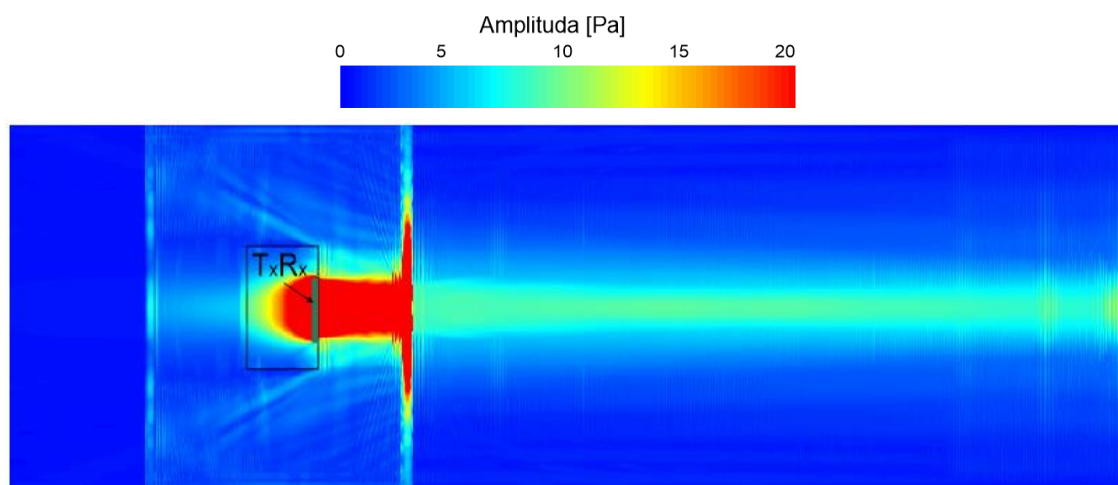


Rysunek 6.29 Sygnały zarejestrowane przez odbiornik R1 (a) dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a sygnał nadawczy nadawany był z częstotliwością 590 kHz, b) widma częstotliwościowe sygnałów odbitych od płyty, c) widma sygnału echa odbitych od ściany modelu, SR1, SR2 i SR3 – pierwszy, drugi i trzeci sygnał odbity między głowicą a płytą; SRB1, SRB2 i SRB3 – pierwszy, drugi i trzeci sygnał odbity od ściany modelu

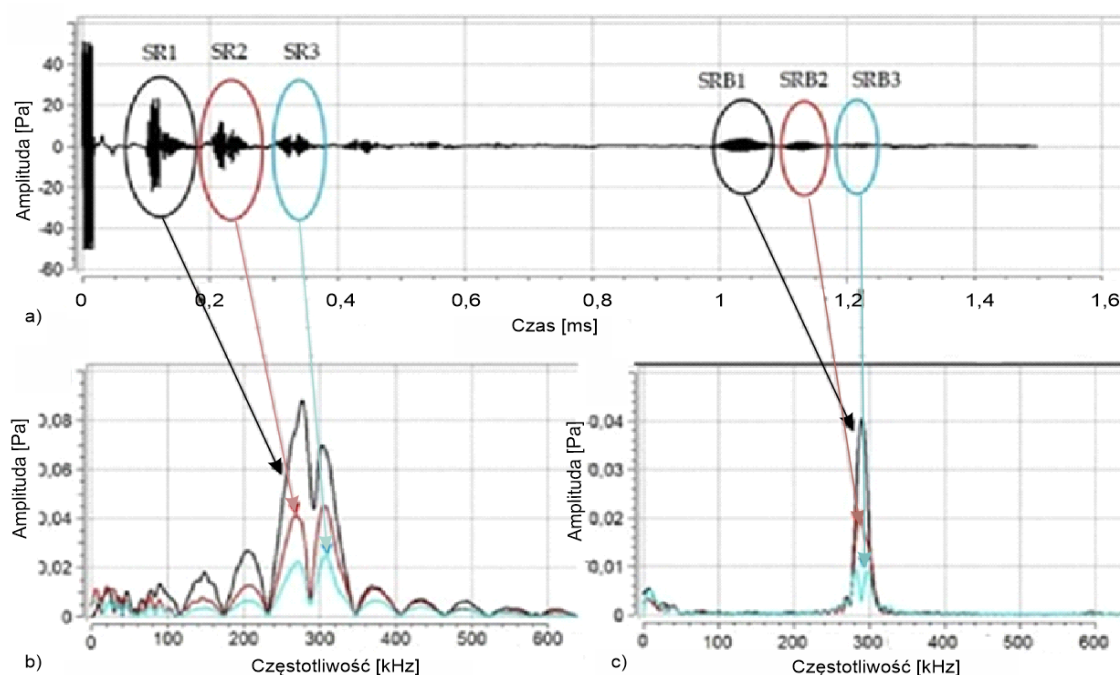
Umieszczenie głowicy pomiarowej pomiędzy równoległymi płytami stalowymi spowodowało powstawanie licznych wewnętrznych odbić SR, w szczególności między głowicą a płytą stalową znajdującą się przed nadajnikiem, a czas rejestracji echa wielokrotnie odbitych wewnętrznie odpowiada wielokrotności odległości między nadajnikiem i płytą. Analiza częstotliwościowa wewnętrznych echa odbitych wykazuje minima lokalne w okolicach pierwszej częstotliwości rezonansowej płyty stalowej odpowiadającej długości fali równej połowie grubości płyty ($\lambda=1/2g$) (Rysunek 6.29 b). Rejestrowany sygnał zawiera również echa odbite od ściany modelu SRB, które są wynikiem transmisji sygnału przez stalową przeszkodę oraz wewnętrznych echa odbitych. Częstotliwość sygnału echa odbitych od ściany modelu wynosi 590 kHz (Rysunek 6.29 c). Pierwszy sygnał echa SRB1 o amplitudzie 3,46 Pa zarejestrowano po czasie 929 μ s (Rysunek 6.29a), kolejny SRB2 o amplitudzie 2,93 Pa po czasie 991 μ s, a trzecie echo SRB3 o amplitudzie 1,1 Pa po czasie 1016 μ s. Pozostałe echa nie zostały określone, ponieważ ich amplitudy były zbyt małe. Z wyżej wymienionych danych został wyliczony współczynnik tłumienia dla fal wielokrotnie odbitych o częstotliwości 590 kHz, który wynosił $0,75 \pm 0,42$ dB/m. Tak duży błąd może wynikać z dużego odchylenia odczytu czasu, zwłaszcza, że rejestrowane czasy były bardzo krótkie, rzędu jednej milisekundy, a poszczególne echa nie zdążyły wygasnąć.

Kolejne symulacje wykonane zostały dla przypadku, w którym głowicę pomiarową umieszczono między stalowymi płytami o grubości 10 mm, a ich odległość wynosiła 219 mm i odpowiadała średnicy zewnętrznej nominalnej rury 219 mm. Sygnał

ultradźwiękowy o częstotliwości 290 kHz i czasie trwania 17,2 μ s wyzwalany był z nadajnika Tx. Rozkład ciśnienia akustycznego sygnału przedstawiony jest na rysunku 6.30. Średnie ciśnienie akustyczne emitowanego sygnału w osi między płytą stalową a krawędzią modelu wynosiło 8,8 Pa.



Rysunek 6.30 Rozkład ciśnienia akustycznego dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a częstotliwość sygnału nadawczego wynosiła 290 kHz

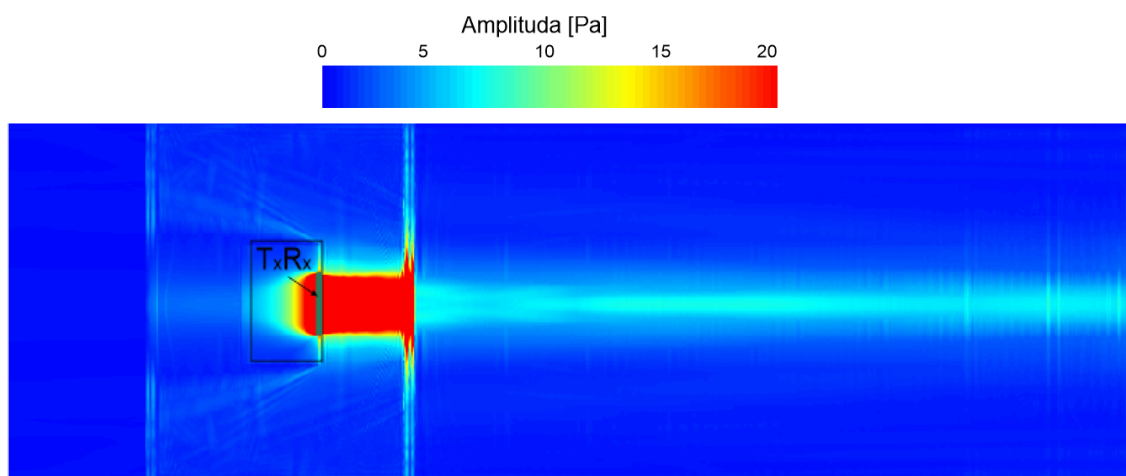


Rysunek 6.31 Sygnały zarejestrowane przez odbiornik R1 (a) dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a częstotliwość sygnału nadawczego wynosiła 290 kHz, b) widmo częstotliwościowe sygnałów odbitych od płyty, c) widmo sygnału echa odbitych od ściany modelu

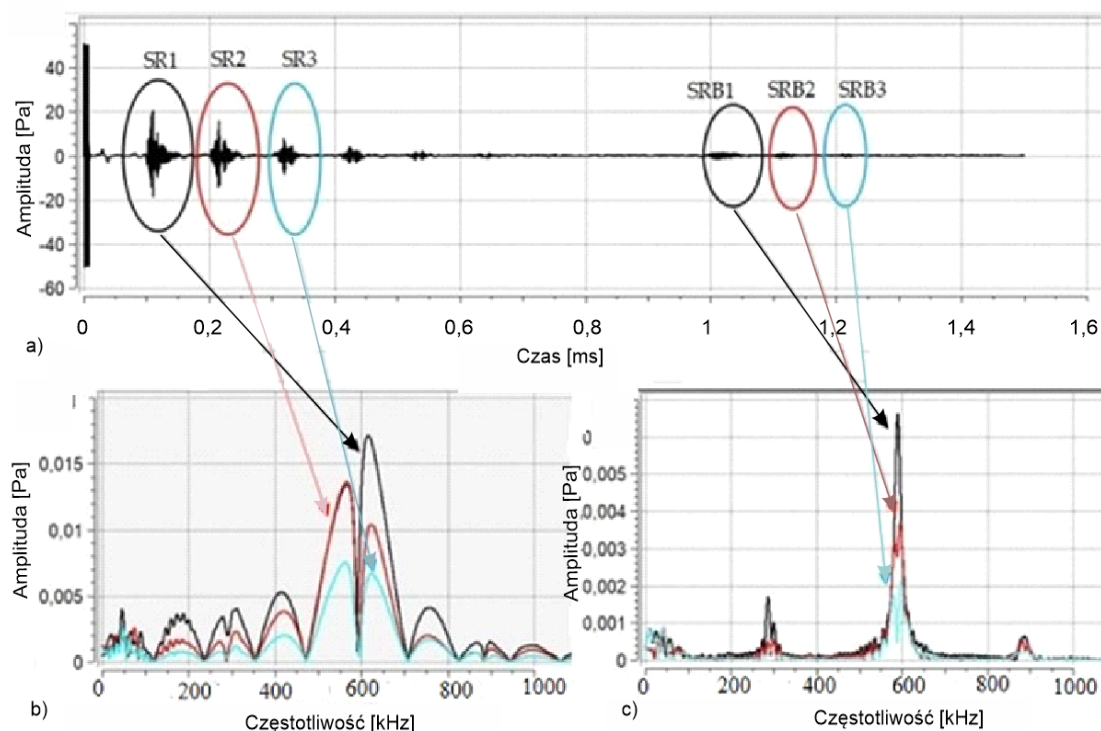
Można zauważyć, że czasy rejestrowanych wewnętrznych ech wielokrotnie odbitych SR na rysunku 6.31a są od siebie bardziej oddalone niż te czasy na rysunku 6.29a. Związane jest to z większą odległością głowicy ultradźwiękowej od płyty stalowej niż w przypadku płyt o mniejszym rozstawie. Sytuacja ta powoduje również, że echa odbite od płyty o większym rozstawie są łatwiejsze do wyodrębnienia pomimo

dłuższego czasu nadawania. Widma częstotliwościowe wewnętrznych ech wielokrotnie odbitych, charakteryzują się również lokalnymi minimami w okolicy pierwszej częstotliwości rezonansowej odpowiadającej grubości płyty stalowej. Główną częstotliwością ech odbitych od ściany modelu jest częstotliwość równa 290 kHz. W przeprowadzonej symulacji zarejestrowano trzy główne echa odbite od ściany modelu. Pierwsze echo SRB1 o amplitudzie 3,76 Pa zarejestrowano po czasie 994,2 μ s, następne SRB2 o amplitudzie 2,12 Pa po czasie 1100,8 μ s i kolejne SRB3 o amplitudzie 1,32 Pa po czasie 1180 μ s. Na podstawie w/w danych wyliczony współczynnik tłumienia sygnału dla ech wielokrotnych fali ultradźwiękowej o częstotliwości 290 kHz wynosi $0,42 \pm 0,01$ dB/m. Tym razem błąd wyliczenia współczynnika osłabienia jest znacznie mniejszy w porównaniu z poprzednim przypadkiem, co oznacza, że odczyty czasu ech były znacznie dokładniejsze.

W następnej symulacji, nadajnik Tx wyzwał sygnał ultradźwiękowy o częstotliwości 590 kHz i czasie trwania 8,5 μ s. Rozkład ciśnienia akustycznego przedstawiony został na rysunku 6.32. Średnie ciśnienie akustyczne emitowanego sygnału w osi między płytą stalową a krawędzią modelu wynosiło 7,29 Pa. Zarejestrowane sygnały wielokrotnie odbite między ścianą stalową a płytą i sygnały wielokrotnie odbite od ściany modelu oraz ich widma częstotliwościowe przedstawione zostały na rysunku 6.33.



Rysunek 6.32 Rozkład ciśnienia akustycznego dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a sygnał nadawczy nadawany był z częstotliwością 590 kHz

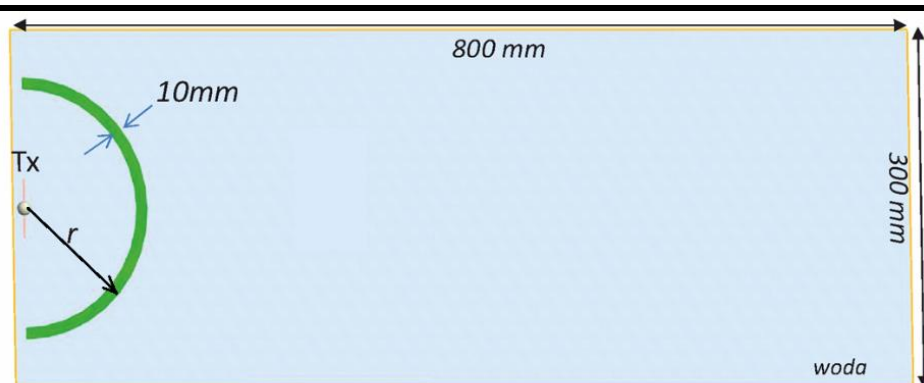


Rysunek 6.33 Sygnał zarejestrowany przez odbiornik R1 (a) dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a częstotliwość sygnału nadawczego wynosiła 590 kHz, b) widmo częstotliwościowe sygnałów odbitych od płyty, c) widmo sygnału ech odbitych od ściany modelu

Z analizy sygnałów widać, że dwukrotnie krótszy czas nadawania sygnału zmniejsza nie tylko amplitudy wewnętrznych ech wielokrotnie odbitych wewnątrz rury, ale również dodatkowo amplitudy ech odbitych od ściany modelu. Lokalnie minimalna amplituda ech odbitych wewnątrz rury oraz maksymalna amplituda ech odbitych od krawędzi modelu wpadają w częstotliwość 590 kHz. Amplituda pierwszego echa odbitego od ściany modelu SRB1 wynosi 1,69 Pa i zostało ono zarejestrowane po czasie 990,2 μ s, kolejne echo SRB2 o amplitudzie 1,24 Pa po czasie 1096,2 μ s i trzecie echo SRB3 po czasie 1203,1 μ s i amplitudzie 0,85 Pa.

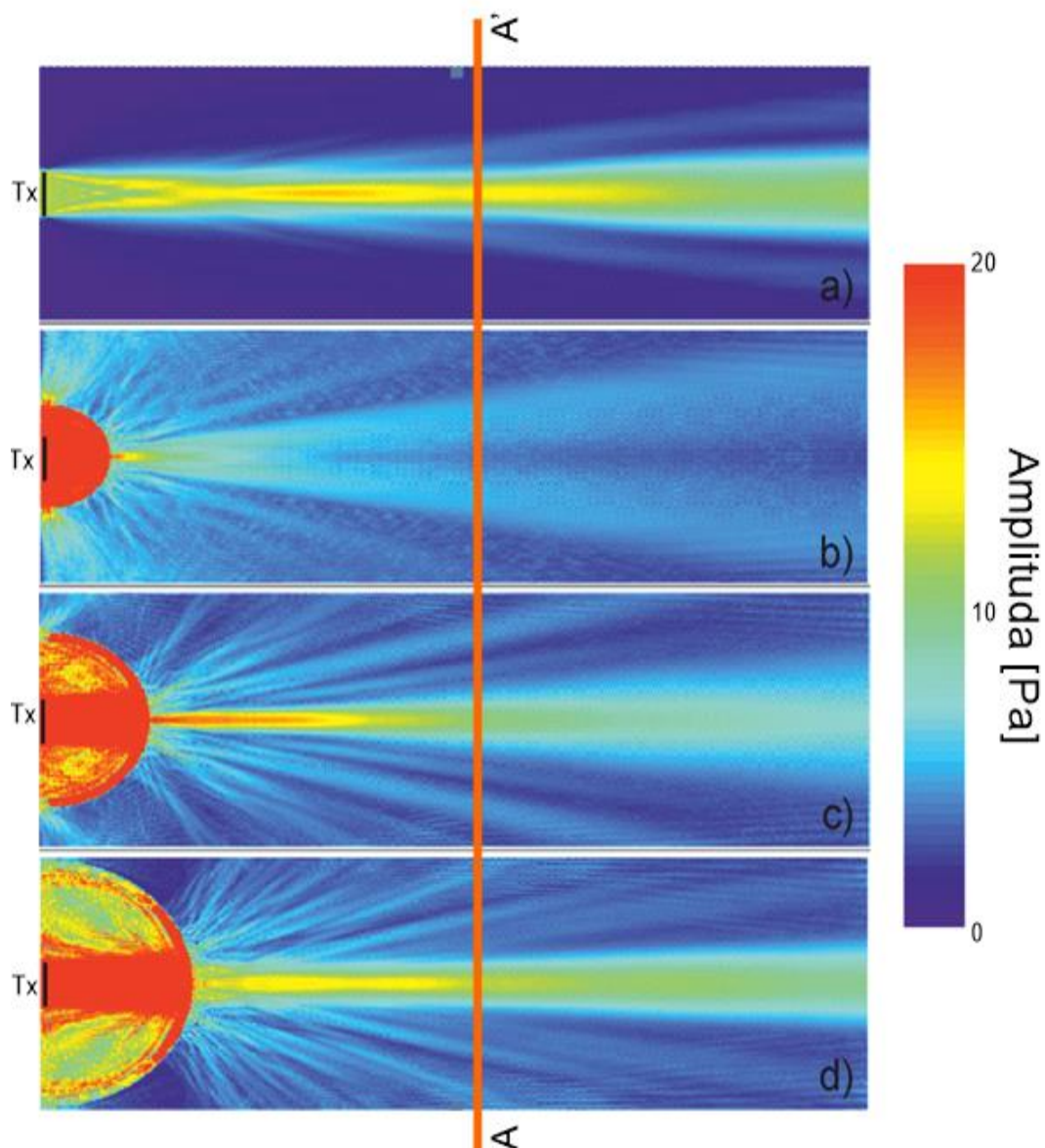
6.6 Symulacyjne badanie wpływu rury o różnej średnicy na kształt wiązki fali ultradźwiękowej

Badania wpływu rozmiaru rur, w których znajduje się głowica pomiarowa na kształt strumienia fali ultradźwiękowej zostały wykonane w modelu 2D o wymiarach 800 mm x 300 mm. W tym modelu umieszczono wycinek rury o stałej grubości 10 mm, ale o zmiennej średnicy (Rysunek 6.34). W środku badanego wycinka rury znajdował się nadajnik Tx o wysokości 50 mm, który generował sygnał o częstotliwości 290 kHz w czasie 17,2 μ s. Czas przebiegu całej symulacji wynosił 800 μ s. W celu uzyskania poziomego odniesienia otrzymanych sygnałów symulacje wykonane zostały również w modelu, gdzie nie było wycinka rury. Kolejne symulacje przeprowadzono dla rur o średnicach 114 mm, 127 mm, 194 mm, 219 mm oraz 273 mm.



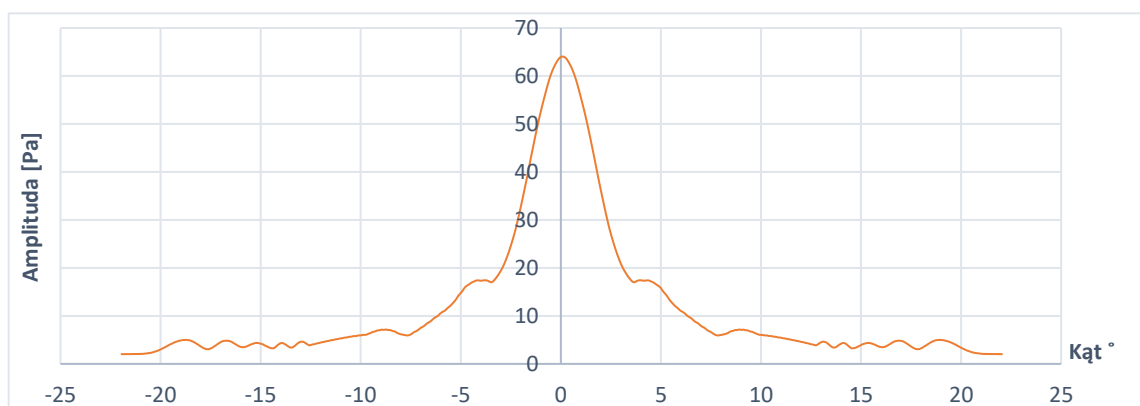
Rysunek 6.34 Model symulacyjny do badania wpływu promienia rury na kształt wiązki fali. Tx - nadajnik sygnału o częstotliwości 290 kHz, r - promień zewnętrzny wycinka rury odpowiadający połowie jej średnicy

Wynikami symulacji były rozkłady ciśnienia akustycznego dla całego modelu. W przypadku braku stalowego wycinka rury wiązka generowanej fali ultradźwiękowej jest wąska i skupiona. Natomiast kiedy nadajnik znajduje się wewnątrz rury następuje ugięcie i rozproszenie generowanej wiązki fali, która rozszerza się wraz ze zmniejszeniem promienia rury (Rysunek 6.35).



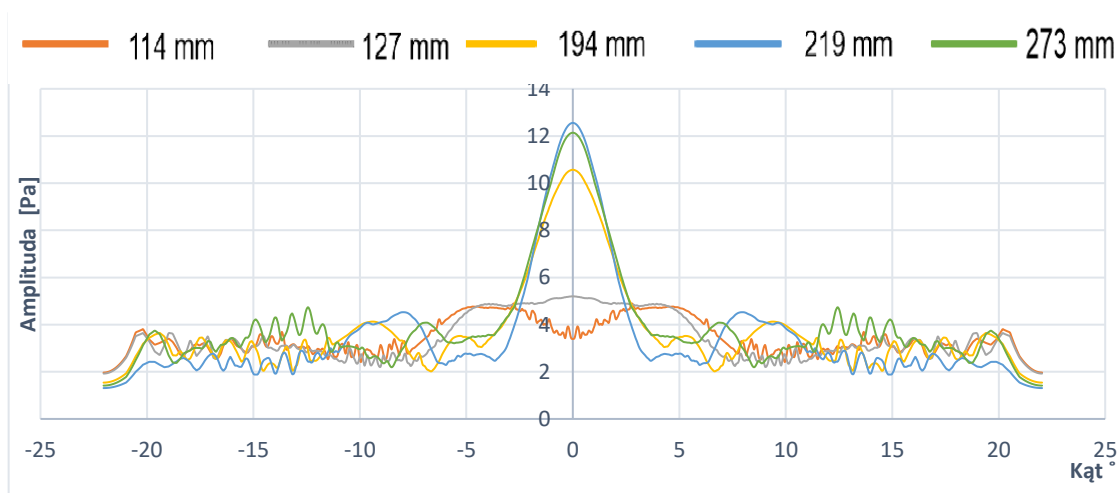
Rysunek 6.35 Wizualizacja zmiany kształtu strumienia fali ultradźwiękowej dla rur stalowych o grubości 10 mm i o różnych średnicach: a) bez rury, b) dla rury o średnicy 127 mm, c) dla rury o średnicy 219 mm, d) dla rury o średnicy 293 mm

W odległości 400 mm od nadajnika Tx, na przekroju A-A' z Rysunku 6.35, sporządzone zostały przekroje rozkładu ciśnienia akustycznego dla każdej symulacji. W przypadku braku stalowego wycinka rury, szerokość połówkowa wiązki ultradźwiękowej wynosi $4,4^\circ$ (Rysunek 6.36).



Rysunek 6.36 Rozkład kątowy ciśnienia akustycznego wiązki fali ultradźwiękowej w przypadku braku wycinka rury stalowej

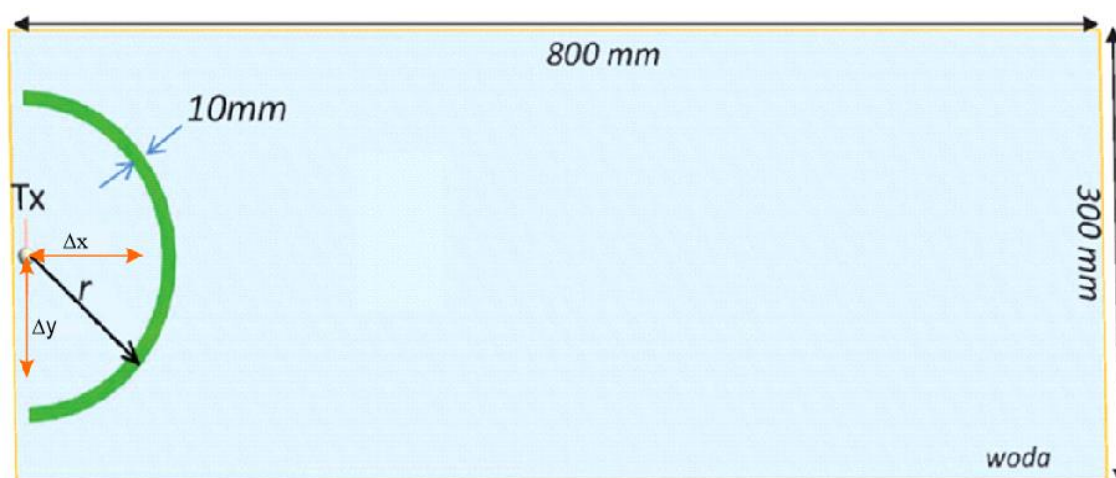
W przypadku, kiedy nadajnik umieszczony jest wewnątrz rury o średnicy 273 mm lub rury o średnicy 219 mm maksymalna rejestrowana amplituda ciśnienia akustycznego wynosiła ok. 12 Pa, a szerokość połówkowa wiązki akustycznej wynosiła $4,6^\circ$. Dla rur o średnicy 194 mm wartość maksymalnej amplitudy ciśnienia akustycznego wynosiła 10,3 Pa, a szerokość połówkowa wiązki to $5,2^\circ$. Dla rur o mniejszych średnicach następuje gwałtowny spadek amplitudy ciśnienia akustycznego i zwiększa znacznie szerokość połówkową wiązki fali. Na przykład, gdy przetwornik umieszczony jest w rurze o średnicy 127 mm amplituda wynosi 5,2 Pa a szerokość połowy wiązki akustycznej wynosi 13° . Dla najmniejszej średnicy, czyli 114 mm, amplituda ciśnienia akustycznego osiąga maksimum 4,8 Pa. Szerokość połówkowa wiązki akustycznej wynosi $16,4^\circ$ (Rysunek 6.37).



Rysunek 6.37 Rozkład kątowy ciśnienia akustycznego wiązki fali ultradźwiękowej dla wycinków rury stalowej o grubości 10 mm, ale o różnych średnicach

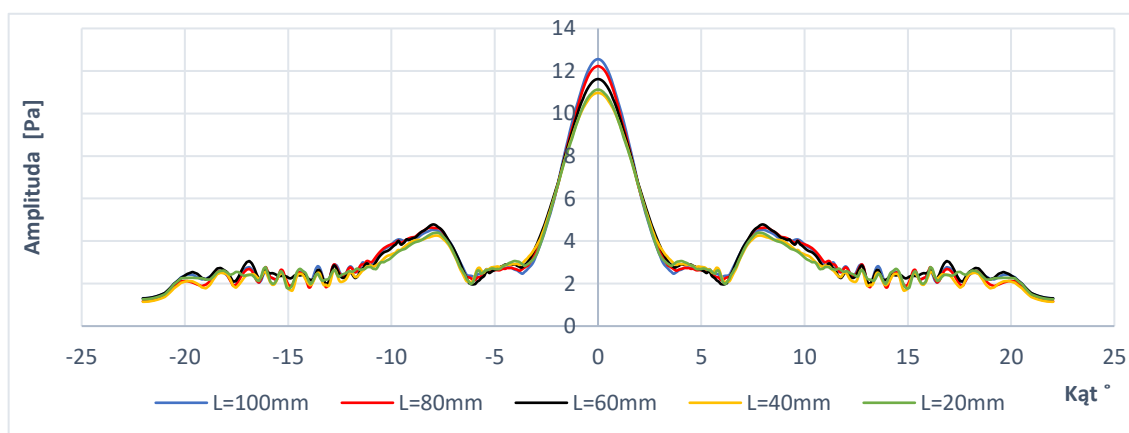
6.6.1 Badanie wpływu położenia przetwornika w wewnętrznej przestrzeni rury na wiązkę fali ultradźwiękowej

W podrozdziale 6.6 zbadano wpływ rury o różnym promieniu na kształt wiązki fali, kiedy przetwornik znajdował się ściśle w środku rury. Nasuwa się pytanie, czy jeżeli przetwornik nadawczy nie znajduje się dokładnie w centralnej części rury, to jak zmienia się kształt i kierunek wiązki fali? W odpowiedzi na powyższe pytanie przeprowadzono symulacje dla wycinka rury o średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm dla sytuacji, kiedy nadajnik nie znajduje się w centralnej części rury (Rysunek 6.38). W tym przypadku nadajnik generował sygnał sinusoidalny o częstotliwości 290 kHz w czasie 17,2 μ s. Czas symulacji wynosił 800 μ s.



Rysunek 6.38 Model do badania wpływu położenia transmitera Tx w wewnętrznej przestrzeni rury o średnicy zewnętrznej 219 mm i grubości ścianki 10 mm (rzut poziomy)

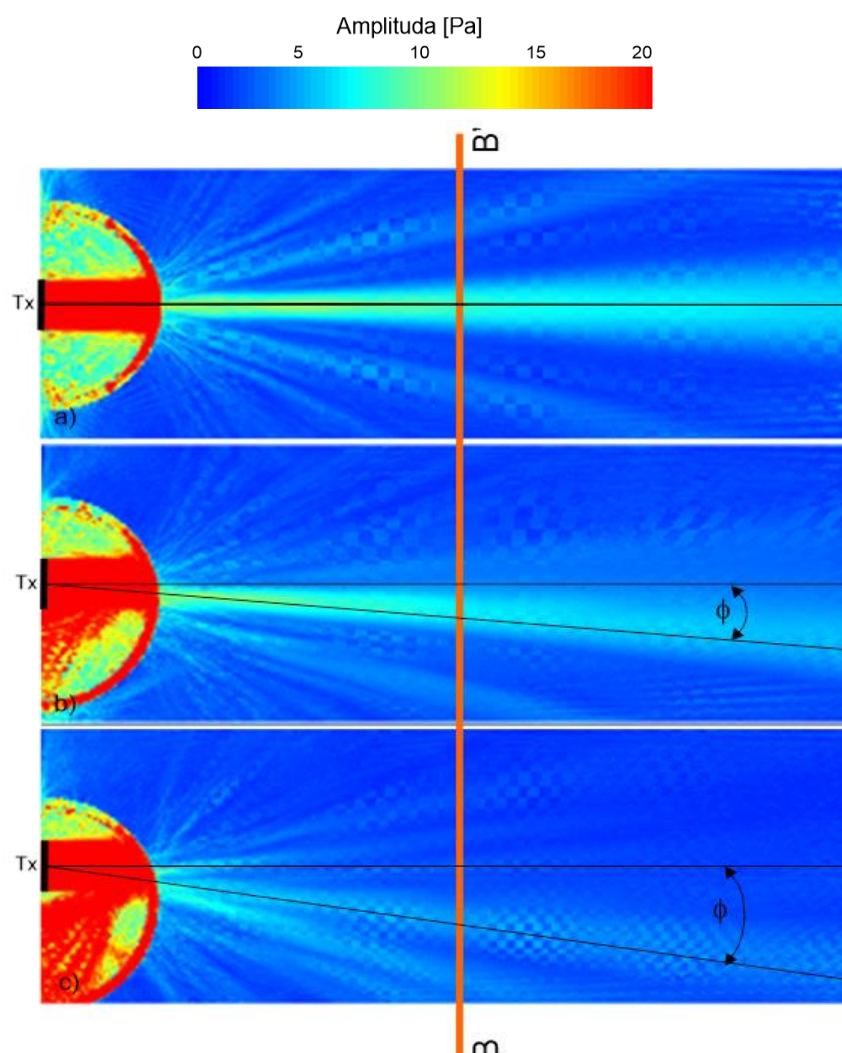
W pierwszej kolejności symulacje odbyły się, kiedy nadajnik położony był w osi, w odległościach $\Delta x = 20, 40, 60, 80$ i 100 mm od wewnętrznej ściany rury. W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano rozkłady amplitudy sygnału akustycznego dla każdej z wymienionych odległości oraz sporządzono przekroje wiązki fali w odległości 290 mm od zewnętrznej krawędzi wycinka rury (Rysunek 6.39).



Rysunek 6.39 Przekroje wiązki fali ultradźwiękowej uzyskane z symulacji, kiedy transmitter znajduje się w różnej odległości od wewnętrznej ściany rury w jej wnętrzu

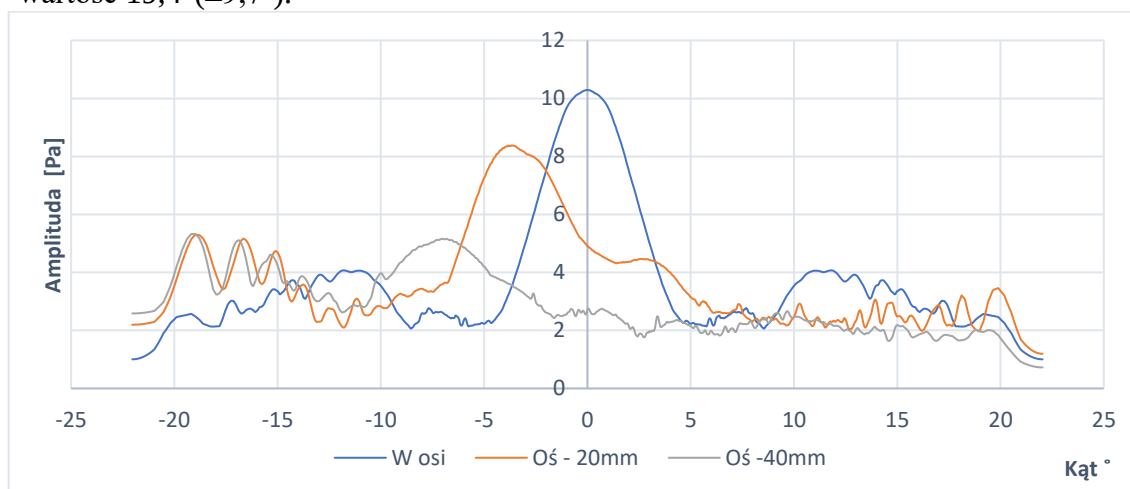
Największa amplituda ciśnienia akustycznego rejestrowana była dla największej odległości nadajnika od wewnętrznej krawędzi rury (100 mm) i wynosiła 12,1 Pa, a najmniejsza amplituda rejestrowana była dla odległości 20 oraz 40 mm i wynosiła 10,9 Pa. Dla przeprowadzonych symulacji kąt rozwarcia wiązki akustycznej dla odległości 100 mm wyniósł $4,4^\circ$ natomiast dla 20 mm kąt wynosił $4,6^\circ$ (Rysunek 6.39).

Przeprowadzono również kolejne symulacje, w których nadajnik sygnału znajdował się w odległości $\Delta l = 100$ mm od wewnętrznej krawędzi wycinka rury dla przypadków, kiedy przetwornik przesunięty jest w osi y prostopadłej do osi x o $\Delta y = 20$ i 40 mm od poziomej osi rury. Wynikiem symulacji były rozkłady ciśnienia akustycznego dla całego modelu (Rysunek 6.40). Największą amplitudę sygnału zarejestrowano między nadajnikiem a wewnętrzną krawędzią rury. Z przedstawionych wyników można określić kąt ϕ załamania wiązki fali ultradźwiękowej, który wzrasta wraz z większym przesunięciem nadajnika Tx od osi pionowej rury.



Rysunek 6.40 Wizualizacja rozkładu ciśnienia fali akustycznej, kiedy transponder Tx znajdował się w odległości 100 mm od wewnętrznej ściany i przesunięciu od osi rury o: a) $\Delta y = 0$ mm b) $\Delta y = 20$ mm i c) $\Delta y = 40$ mm

Sporządzono przekroje rozkładu ciśnienia akustycznego w odległości 400 mm od nadajnika B-B', dla przypadku, gdzie nadajnik umieszczony w środku wycinka rury oraz dla przypadku, kiedy nadajnik został przesunięty wzdłuż osi y od środka rury o 20 i 40 mm (Rysunek 6.41). Analiza uzyskanych danych wykazuje, że położenie nadajnika w stosunku do osi rury znacznie wpływa na osłabienie amplitudy sygnału i na przesunięcie kąta ϕ promienia wodzącego wiązki fali. Dla nadajnika przesuniętego wzdłuż osi y o 20 mm od środka wycinka rury amplituda maksymalnego ciśnienia akustycznego wynosi 8,4 Pa przy kącie $3,4^\circ$, natomiast dla nadajnika przesuniętego o 40 mm od wycinka rury amplituda wynosi 5,1 Pa przy kącie $6,5^\circ$. Kąt rozwarcia wiązki fali w połowie amplitudy sygnału dla przesunięcia nadajnika o 20 mm wynosi $6^\circ(\pm 3^\circ)$, natomiast dla przesunięcia o 40 mm jest to wartość $19,4^\circ(\pm 9,7^\circ)$.



Rysunek 6.41 Rozkład ciśnienia wiązki fali akustycznej dla przypadku, kiedy nadajnik jest przesunięty w osi y w odległości 0, 20 i 40 mm od środka

Z wyników przeprowadzonych symulacji wynika, że przesunięcie nadajnika wzdłuż linii wiązki (x) wpływa nieznacznie na stopień rozwarcia wiązki i spadek amplitudy za rurą. Natomiast przesunięcie nadajnika w linii poziomej prostopadłej do wiązki fali (y) powoduje zmianę kierunku rozchodzenia wiązki fali o kąt ϕ , znaczne osłabienie sygnału transmitowanego i powstawanie dodatkowych odbić wielokrotnych wewnątrz rury.

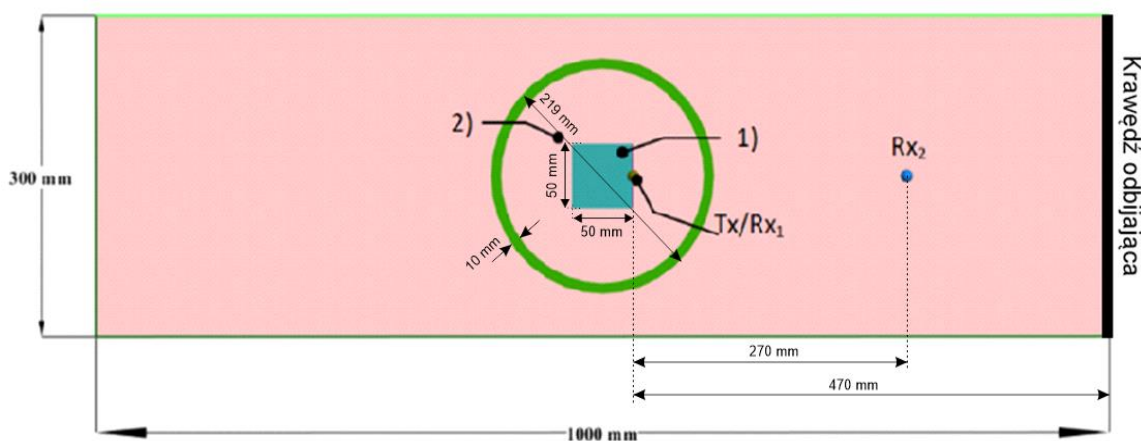
6.7 Pomiary odległości, kiedy sonda pomiarowa znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rury

W poprzednich rozdziałach rozważano zagadnienia generowania sygnałów akustycznych w celu dobrania optymalnych parametrów transmisji fal ultradźwiękowych przez metalowe przeszkody, jak również wpływy krzywizny rur czy położenia nadajnika ultradźwiękowego we wnętrzu rur na ukształtowanie wiązki fal akustycznych.

W tym podrozdziale autor rozpatruje możliwości wykonywania pomiarów odległości, w sytuacji, kiedy zarówno nadajnik jak i odbiornik akustyczny znajdują się w wewnętrznej przestrzeni stalowych rur. Badania te będą prowadzone przez symulacje komputerowe jak i eksperymenty na modelu fizycznym.

6.7.1 Symulacja pomiarów odległości, kiedy sonda pomiarowa znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rury eksploatacyjnej

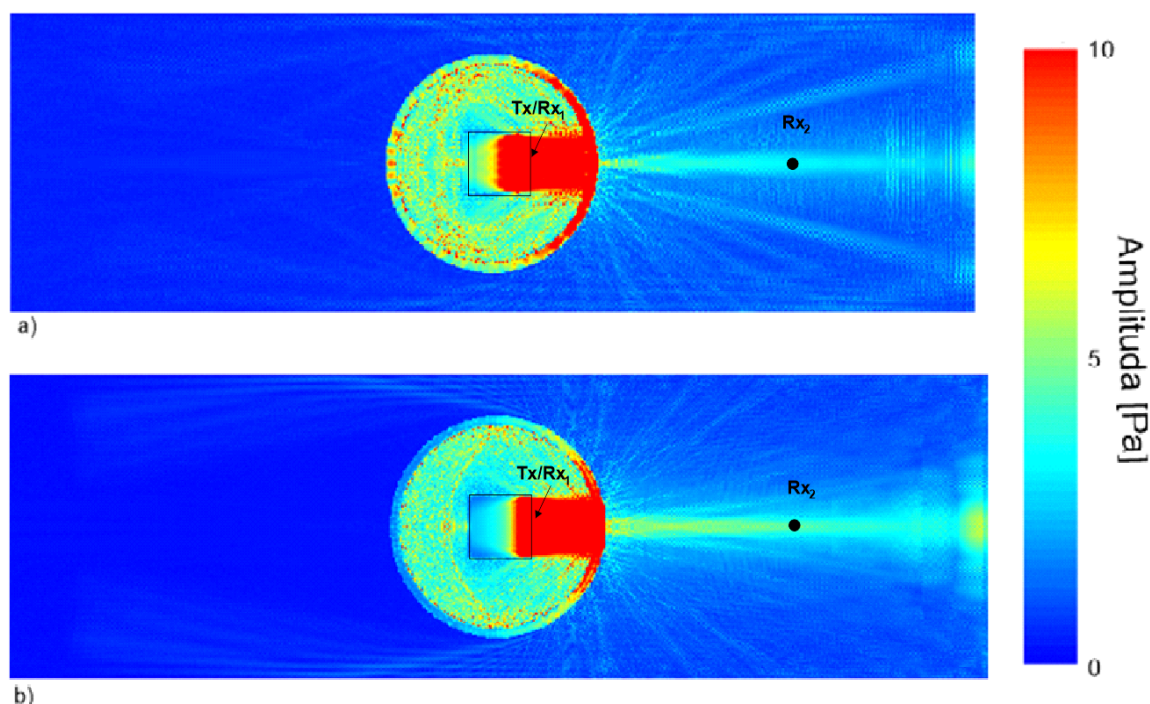
Symulacje przeprowadzone zostały na modelu 2D o wymiarach 1000 x 300 mm imitującym zbiornik wodny, którego prawa krawędź całkowicie odbija padające na nią fale ultradźwiękowe (Rysunek 6.42). W zbiorniku umieszczona została rura stalowa o średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm, wewnątrz której znajdowała się głowica pomiarowa o wymiarach 50 mm x 50 mm z nadajnikiem Tx o wysokości 50 mm i odbiornikiem Rx₁. Odległość czoła głowicy od krawędzi odbijającej modelu wynosiła 470 mm. Między rurą a ścianą odbijającą w odległości 270 mm od głowicy umieszczony był również odbiornik Rx₂, który miał za zadanie rejestrowanie sygnału przechodzącego przez rurę jak i sygnału odbitego od ściany i powracającego do sondy. W przeprowadzonych symulacjach sygnałem nadawczym był sygnał sinusoidalny o częstotliwościach 290 kHz lub częstotliwości 590 kHz, o czasie nadawania 50 μ s i amplitudzie 50 Pa.



Rysunek 6.42 Dwuwymiarowy model do badania symulacyjnego pomiaru dystansu między głowicą echosondy a ścianą kawerny. Głowica pomiarowa umieszczona wewnątrz rury o średnicy zewnętrznej 219 mm i grubości 10 mm

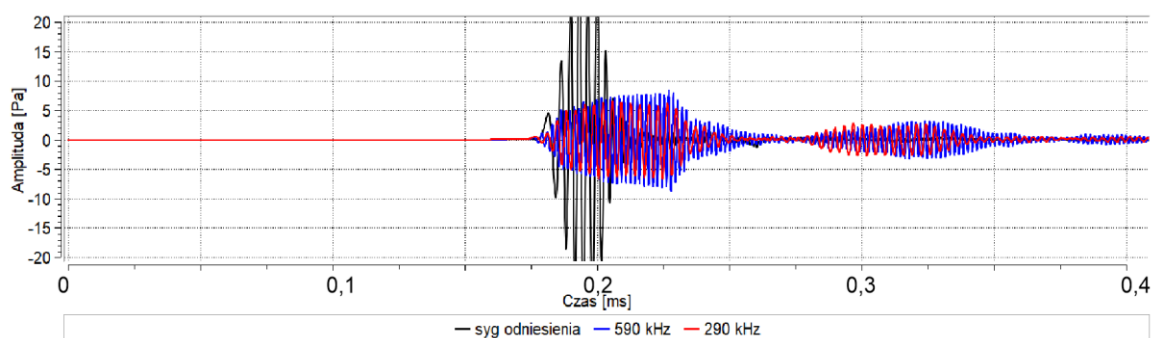
W pierwszej kolejności wykonano symulację przy braku stalowej rury w celu rejestracji czasu oraz amplitudy sygnału przez odbiornik umieszczony na głowicy pomiarowej Rx₁. Sygnał ten stanowi sygnał odniesienia. Amplituda sygnału przechodzącego bezpośrednio do odbiornika Rx₂ wynosiła 30 Pa, natomiast amplituda echa odbitego od krawędzi modelu rejestrowana przez odbiornik Rx₁ była na poziomie 21 Pa. Czas rejestracji sygnału echa odbitego od ściany modelu przez odbiornik Rx₁ wynosił 628 μ s, co odpowiada odległości 470 mm, przy prędkości fali w wodzie równej 1496 m/s.

Następnie wykonywano symulacje dla modelu ze stalową rurą dla fal o częstotliwościach 290 i 590 kHz. Dla każdej częstotliwości otrzymano rozkład ciśnienia akustycznego (Rysunek 6.43). Wyniki symulacji wskazują, że największe ciśnienie sygnału w obydwu przypadkach występowało w przestrzeni między czołem głowicy a wewnętrzną krawędzią rury, co jest wynikiem licznych wielokrotnych odbić wewnętrznych i nakładania się fal w tym obszarze.



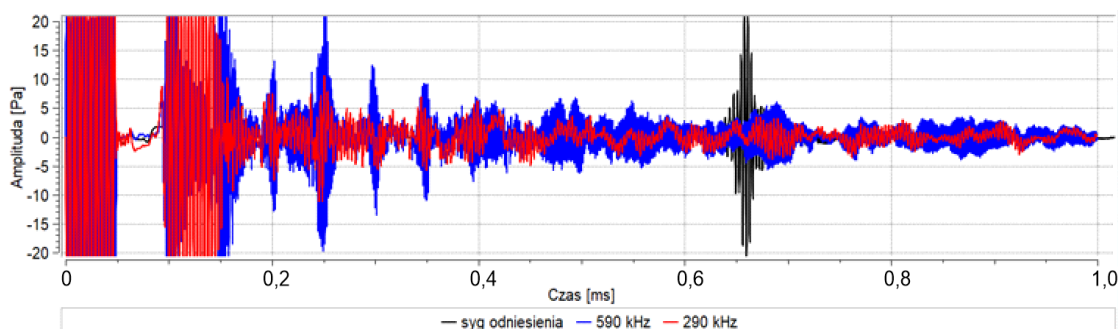
Rysunek 6.43 Rozkład ciśnienia akustycznego dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona jest w wewnętrznej przestrzeni rury stalowej o średnicy 219 mm i grubości 10 mm; a) dla częstotliwości nadawania 290 kHz oraz b) częstotliwości nadawania 590 kHz

Dla sygnału nadawczego o częstotliwości 290 kHz, sygnał przechodzący przez ścianę rury rejestrowany przez odbiornik Rx_2 był na poziomie 6,7 Pa. Natomiast dla sygnału nadawczego o częstotliwości 590 kHz, sygnał ten miał wartość 7,8 Pa (Rysunek 6.44). Na rysunku tym zaznaczono również przebieg sygnału odniesienia (linia czarna), czyli sygnału przy braku stalowej rury w modelu.



Rysunek 6.44 Przebieg sygnału o częstotliwościach 290 oraz 590 kHz rejestrowanego odbiornikiem Rx_2 umieszczonym za metalową rurą o średnicy 219 mm i grubości 10 mm wraz z przebiegiem sygnału odniesienia

Rysunek 6.45 przedstawia przebiegi zarejestrowanego sygnału przez odbiornik Rx_1 dla częstotliwości nadawania 290 oraz 590 kHz wraz z sygnałem odniesienia (linia czarna).

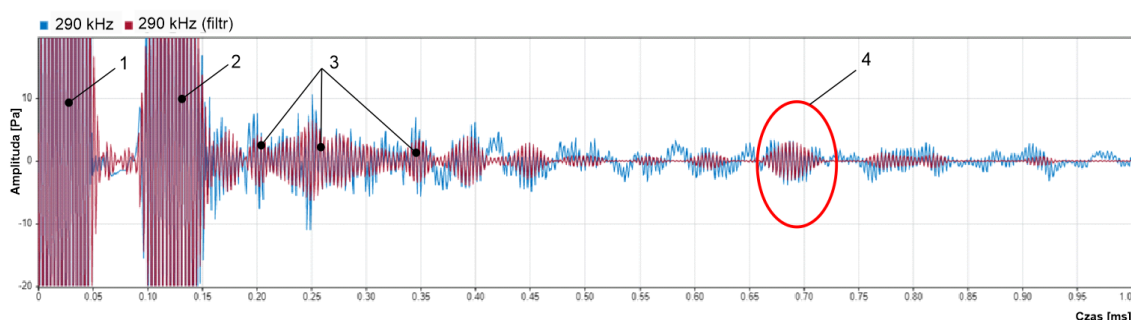


Rysunek 6.45 Przebieg sygnału o częstotliwościach 290 oraz 590 kHz rejestrowanego odbiornikiem Rx_1 umieszczonym wewnątrz stalowej rury o średnicy 219 mm i grubości 10 mm wraz z przebiegiem sygnału odniesienia

Zarejestrowane przez odbiornik Rx_1 sygnały charakteryzują się dużym szumem i echemi wielokrotnie odbitymi wewnątrz rury, co maskuje sygnał odbity od krawędzi modelu.

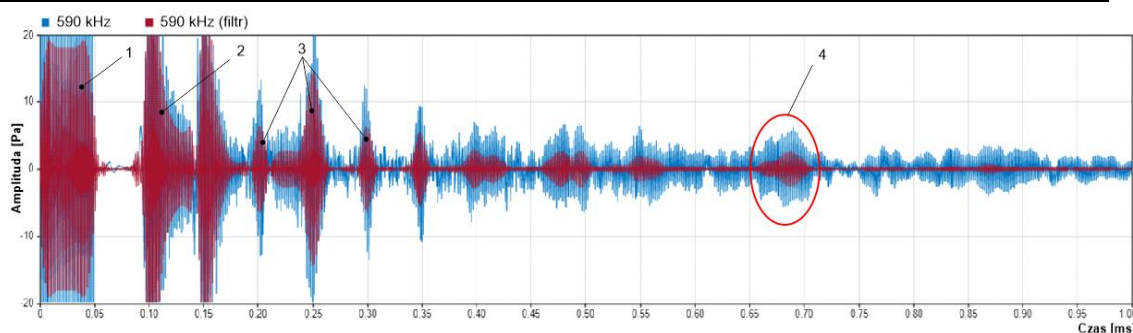
W celu wyznaczenia sygnału odbitego od ściany modelu, zarejestrowany sygnał został poddany odszumieniu oraz filtracji filtrem pasmowo przepustowym w programie Matlab™.

Dla sygnału nadawczego o częstotliwości 290 kHz w wyniku przeprowadzonej filtracji sygnału uzyskano wyraźne echo odbite od krawędzi modelu o amplitudzie 3,2 Pa, które było zarejestrowane po czasie 662 μ s, co odpowiada odległości 495 mm (Rysunek 6.46)



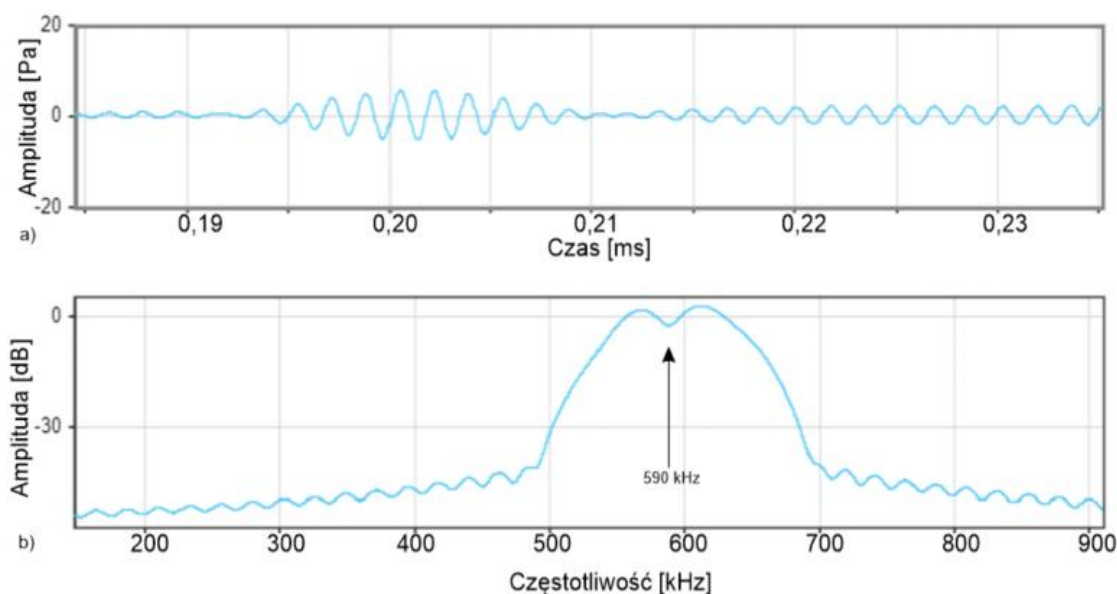
Rysunek 6.46 Przebieg rejestrowanego sygnału dla częstotliwości sygnału nadawczego wynoszącego 290 kHz zarejestrowanego przez odbiornik Rx_1 przed (linia niebieska) i po filtracji (linia czerwona). 1) sygnał nadawczy, 2) pierwsze echo odbite od ściany rury, 3) kolejne echa wielokrotnie odbite od ściany rury, 4) echo odbite od krawędzi modelu

Dla sygnału nadawczego o częstotliwości 590 kHz w wyniku przeprowadzonej filtracji sygnału uzyskano echo odbite od krawędzi modelu o amplitudzie 2,6 Pa, które było zarejestrowane po czasie 655 μ s, co odpowiada odległości 490 mm (Rysunek 6.47).



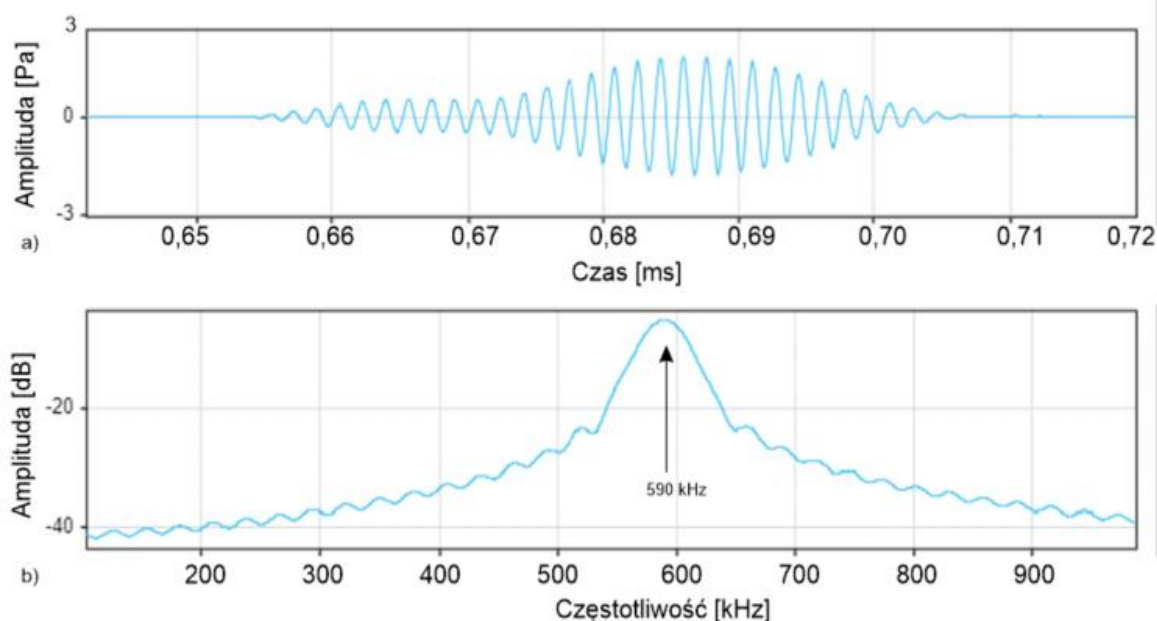
Rysunek 6.47 Przebieg rejestrowanego sygnału o częstotliwości 590 kHz zarejestrowanego przez odbiornik Rx_1 przed (linia niebieska) i po filtracji (linia czerwona). 1) sygnał nadawczy, 2) pierwsze echo odbite od ściany rury, 3) kolejne echa wielokrotnie odbite od ściany rury, 4) echo odbite od krawędzi modelu

Na rysunku 6.47 zauważono, że sygnały ech odbitych między czołem głowicy pomiarowej a ścianą rury charakteryzują się równymi odległościami od siebie wynikającymi z dystansu między przetwornikiem a ścianą rury. Amplituda tego sygnału zmniejsza się wraz z czasem, a charakterystyka częstotliwościowa sygnałów odbitych wyróżnia się lokalnymi minimami odpowiadającymi częstotliwości rezonansowej (Rysunek 6.48)



Rysunek 6.48 a) Przebieg sygnału echa odbitego wewnątrz przestrzeni rurowej i b) jego widmo częstotliwościowe dla sygnału nadawczego o częstotliwości 590 kHz

Echo sygnału użytecznego, czyli sygnału odbitego od krawędzi modelu przyjmuje natomiast wartości maksymalne przy częstotliwości rezonansowej (Rysunek 6.49), co oznacza, że sygnał ten może zostać wyróżniony na tle innych sygnałów.



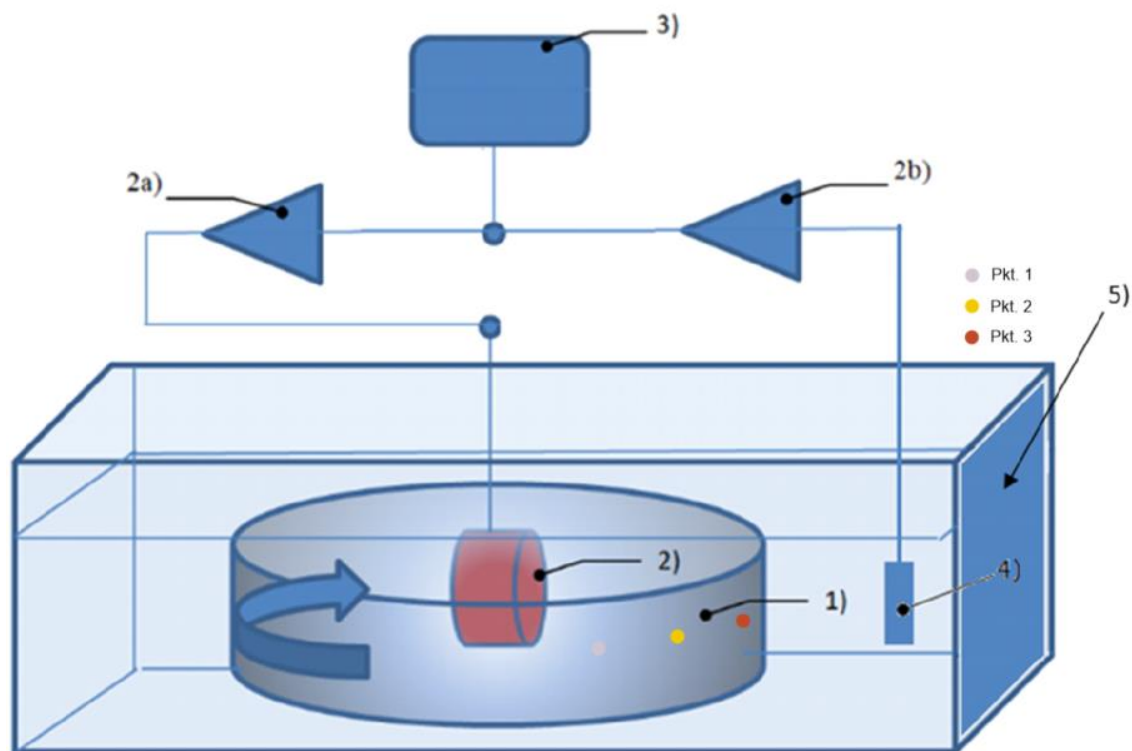
Rysunek 6.49 a) Przebieg sygnału echa odbitego od prawej krawędzi modelu, b) jego widmo częstotliwościowe od sygnału nadawczego o częstotliwości 590 kHz

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że amplituda sygnału transmitowanego przez stalową rurę rejestrowanego przez odbiornik Rx₂ wynosi 22% sygnału odniesienia dla częstotliwości 290 kHz oraz 26% dla częstotliwości 590 kHz. Po odbiciu sygnału od ściany modelu odbiornik Rx₁ zarejestrował echo o maksymalnej amplitudzie wynoszącej 15% sygnału odniesienia dla częstotliwości 290 kHz oraz 12% dla sygnału 590 kHz. Przy zastosowaniu niższej częstotliwości nadawania pozorne przesunięcie początku echa odbitego od ściany modelu wynosiło 25 mm natomiast dla drugiej, wyższej częstotliwości wartość ta wynosiła 20 mm, w stosunku do odległości 470 mm obliczonej z echa zarejestrowanego przy braku rury (sygnał odniesienia).

6.8 Laboratoryjne pomiary amplitudy sygnału w sytuacji, kiedy echosonda umieszczona jest w wewnętrznej przestrzeni rury

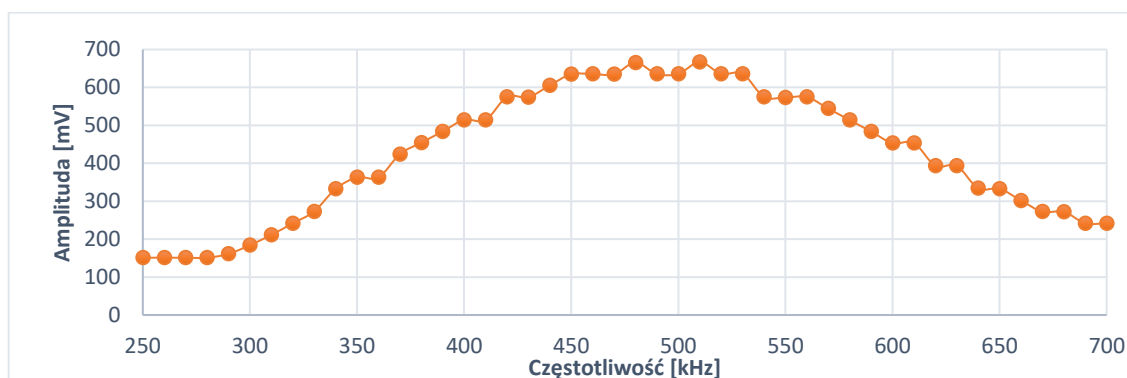
Możliwości wykonania pomiarów odległości w sytuacji, kiedy urządzenie pomiarowe znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rur stalowych zostały potwierdzone badaniami symulacyjnymi. W celu weryfikacji wyników symulacji komputerowych przeprowadzone zostały badania laboratoryjne na specjalnie do tego celu stanowisku pomiarowym.

Stanowisko laboratoryjne składało się ze zbiornika o długości 800 mm, szerokości 600 mm i wysokości 500 mm, wypełnionego wodą, w którym umieszczono układ pomiarowy składający się z transmittera ultradźwiękowego o średnicy 32 mm oraz z odbiornika (hydrofonu). Odległość między transmittorem ultradźwiękowym a odbiornikiem wynosiła 250 mm, natomiast odległość transmittera od ściany odbijającej odbiornika wynosiła 300 mm (Rysunek 6.50).



Rysunek 6.50 Stanowisko laboratoryjne do pomiaru odległości od transmitera do ściany zbiornika, kiedy transmiter znajduje się we wewnętrznej przestrzeni stalowej rury; 1) rura z zaznaczonymi punktami pomiarowymi, 2) głowica pomiarowa z nadajnikiem Tx i odbiornikiem Rx, 2a) wzmacniacz sygnału nadawczego, 2b) wzmacniacz sygnału odbiorczego, 3) komputer 4) odbiornik R2, 5) ściana zbiornika

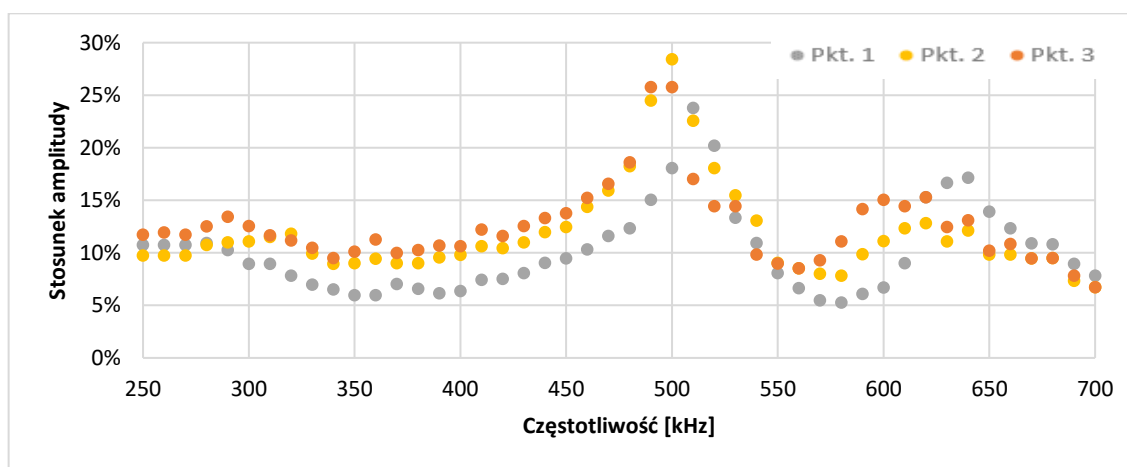
W pierwszej kolejności nadajnikiem Tx umieszczonym w wewnętrznej przestrzeni odcinka stalowej rury generowany był sygnał ultradźwiękowy o długości $50\ \mu\text{s}$ i częstotliwości $250\ \text{kHz}$. Pomiary przeprowadzono dla sygnału nadawczego o częstotliwościach $250 - 700\ \text{kHz}$, z krokiem $10\ \text{kHz}$. Odbiornik R2 umieszczony za rurą mierzył sygnał transmitowany przez rurę, a zmierzone wartości zostały przedstawione jako procentowy stosunek amplitudy sygnału transmitowanego do amplitudy sygnału odniesienia, czyli sygnału zarejestrowanego przez odbiornik przy braku rury. Zmierzone amplitudy sygnału odniesienia o różnych częstotliwościach są przedstawione na rysunku 6.51.



Rysunek 6.51 Zarejestrowane sygnały odbiornikiem R2 przy braku rury – sygnał odniesienia

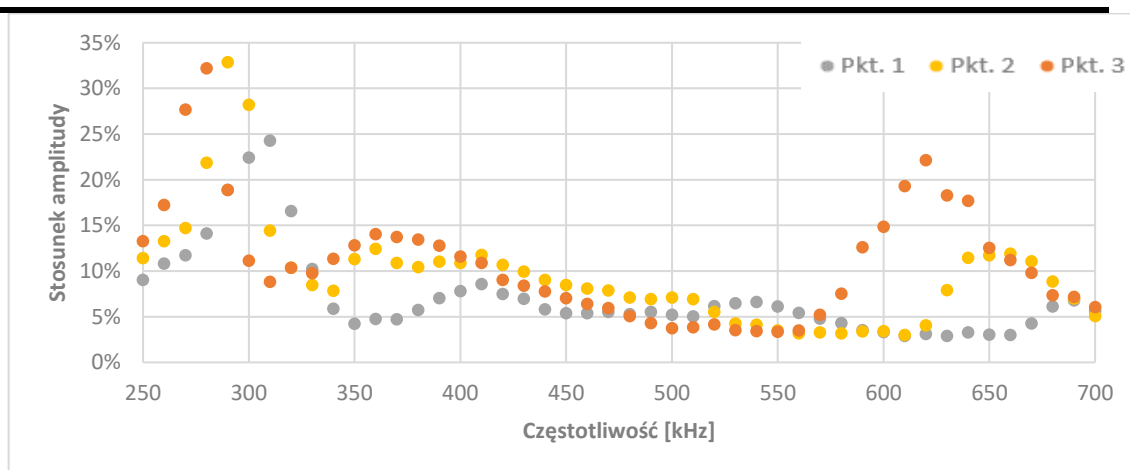
Dla każdej z wymienionych częstotliwości zostały przeprowadzone badania ze stalowymi rurami przemysłowymi o nominalnych rozmiarach: średnica zewnętrzna 127 mm i grubość ścianki 5,5 mm oraz średnica zewnętrzna 219 mm i grubość ścianki 10 mm. Badania przeprowadzono również dla rury z włókna szklanego o średnicy zewnętrznej 219 mm i grubości ścianki 10 mm. Wykonano również pomiary, gdy nadajnik ultradźwiękowy znajdował się w wewnętrznej przestrzeni podwójnych rur stalowych o średnicy 127 mm i 219 mm.

Dla rury stalowej o średnicy 127 mm odbiornikiem R2 zmierzono amplitudy fal ultradźwiękowych transmisyjnych przez trzy wybrane punkty znajdujące się na obwodzie na ścianie rury o wysokości 60 mm od jej podstawy (Rysunek 6.50). Dla punktu pomiarowego nr 1 maksymalny sygnał transmisyjny zarejestrowano przy częstotliwości 510 kHz (24% sygnału odniesienia), kolejne maksimum lokalne zarejestrowano również przy częstotliwościach 630 i 640 kHz (ok. 17% sygnału odniesienia). Dla punktu nr 2 maksimum sygnału zarejestrowano przy częstotliwościach 490 i 500 kHz (26% sygnału odniesienia) oraz 620 kHz (12% sygnału odniesienia). Dla punktu nr 3 maksimum sygnału zarejestrowano dla częstotliwości 500 kHz (28% sygnału odniesienia), kolejne maksima znajdują się w przedziale 600 – 610 kHz (ok. 15% sygnału odniesienia) oraz lokalne maksima występują dla częstotliwości 290 kHz (13% sygnału odniesienia). Wyniki pomiaru przedstawione zostały na rysunku 6.52.



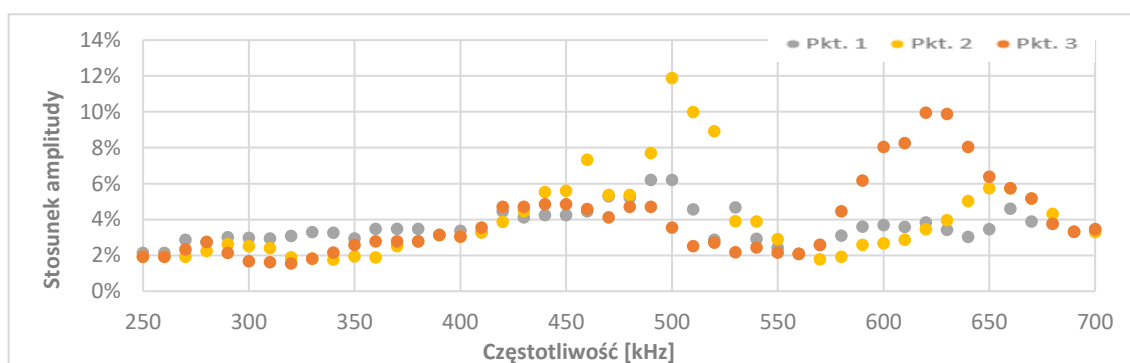
Rysunek 6.52 Stosunek amplitud sygnałów rejestrowanych przez odbiornik R2 umieszczony poza rurą stalową o nominalnej średnicy 127 mm i grubości ścianki 5,5 mm do sygnału odniesienia w zależności od częstotliwości w przedziale 250 – 700kHz dla trzech różnych punktów pomiarowych

Podobnie jak wyżej dla rury o średnicy 219 mm wykonano pomiary amplitudy fali ultradźwiękowej przechodzącej również przez trzy punkty o tych samych pozycjach jak poprzednio. Dla punktu nr 1 lokalne maksimum sygnału było rejestrowane przy częstotliwości 310 kHz (24% sygnału odniesienia) natomiast dla punktu nr 2 maksymalny sygnał był dla częstotliwości 290 kHz (33% sygnału odniesienia) oraz 650 kHz (12% sygnału odniesienia). Dla punktu nr 3 były dwa lokalne maksima przy częstotliwości 280 kHz (32% sygnału odniesienia) oraz 620 kHz (22% sygnału odniesienia). Wyniki pomiaru przedstawione zostały na rysunku 6.53.



Rysunek 6.53 Stosunek amplitudy sygnałów rejestrowanych przez odbiornik R2 umieszczony poza rurą stalową o nominalnej średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm do sygnału odniesienia w zależności od częstotliwości w przedziale 250 – 700 kHz dla trzech różnych punktów na obwodzie ściany rury na wysokości 60 mm od jej podstawy

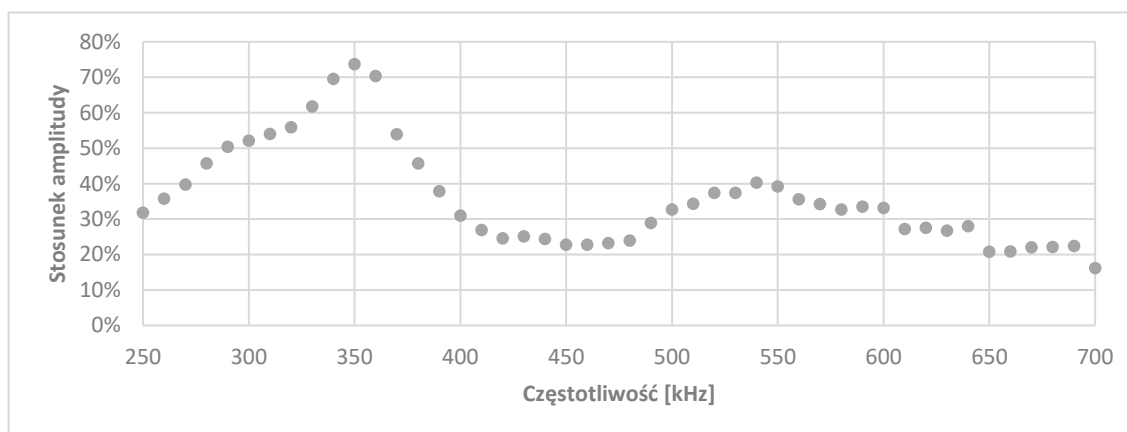
Wykonano też badania transmisji sygnału dla przypadku, kiedy nadajnik znajdował się wewnątrz dwóch stalowych rur o średnicy 127 mm i grubości 5,5 mm oraz rury o średnicy 219 mm i grubości 10 mm umieszczonych współosiowo. Pomierzono amplitudy fal przechodzących przez wybrane trzy różne punkty położone na obwodzie na ścianie zewnętrznej rury na wysokości 60 mm od jej podstawy. Dla punktu nr 1 rejestrowany sygnał transmisyjny w całym zakresie częstotliwości wynosił kilka procent w stosunku do sygnałów odniesienia. Jedynie dla punktów nr 2 i nr 3 lokalizowano maksima ok. 12% sygnału odniesienia dla częstotliwości 500 kHz oraz ok. 10% sygnału odniesienia przy częstotliwości 620 kHz oraz 630 kHz. Wyniki pomiaru przedstawione zostały na rysunku 6.54.



Rysunek 6.54 Stosunek amplitudy sygnałów rejestrowanych przez odbiornik R2 umieszczony poza dwoma rurami stalowymi o nominalnych rozmiarach średnicy 127 mm i grubości ścianki 5,5 mm oraz rury o średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm do sygnału odniesienia w zależności od częstotliwości w przedziale 250 – 700 kHz dla trzech różnych punktów na ścianie rury zewnętrznej na obwodzie o wysokości 60 mm od jej podstawy

Badania transmisji sygnału ultradźwiękowego wykonano również dla przypadku, kiedy nadajnik znajdował się wewnątrz rury wykonanej z włókna szklanego o nominalnych rozmiarach średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm. Największą

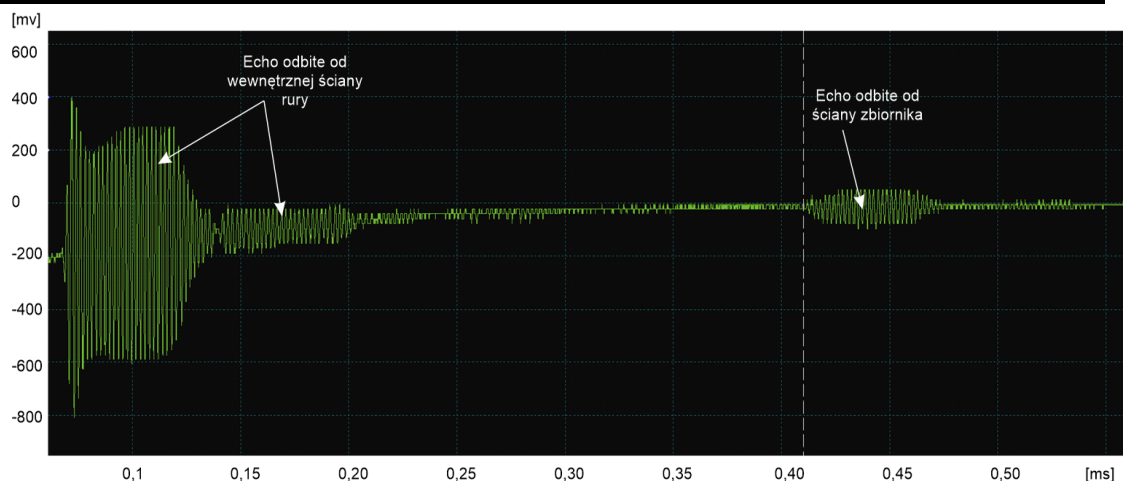
wartość sygnału zarejestrowano dla częstotliwości 350 kHz i wynosi ona ponad 70% sygnału odniesienia, również dla częstotliwości w zakresie 520 - 540 kHz poziom rejestrowanego sygnału wynosi ok. 40% sygnału odniesienia. Minimalna rejestrowana wartość sygnału z rury z włókna szklanego wynosi ponad 20% sygnału odniesienia (Rysunek 6.55). Wyższe amplitudy sygnałów transmisyjnych w stosunku do rur stalowych są spowodowane znacznie mniejszą impedancją akustyczną włókna szklanego w porównaniu z impedancją stali.



Rysunek 6.55 Stosunek amplitudy sygnałów rejestrowanych przez odbiornik R2 umieszczony poza rurą wykonaną z włókna szklanego o nominalnych rozmiarach średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm do sygnału odniesienia w zależności od częstotliwości w przedziale 250 – 700 kHz dla trzech różnych punktów pomiarowych

Na podstawie wyników otrzymanych z wyżej przeprowadzonych badań, wykonano pomiary testowe odległości nadajnika do ściany zbiornika dla przypadków, kiedy nadajnik i odbiornik umieszczone w głowicy znajdującej się w wewnętrznej przestrzeni pojedynczej rury stalowej, dwóch rur stalowych i rury z włókna szklanego. Pomiary te przeprowadzono tylko dla punktów i częstotliwości, przy których występowały maksymalne amplitudy określone z poprzednich badań. W celu porównania wyników amplituda sygnału echa była odniesiona do echa odbitego od ściany zbiornika przy braku rury – amplituda odniesienia.

Przykładowo Rysunek 6.56 przedstawia przebieg sygnału zarejestrowany przez odbiornik Rx dla przypadku, kiedy głowica pomiarowa znajduje się we wnętrzu przestrzeni rury stalowej o średnicy 127 mm.



Rysunek 6.56 Przebieg sygnału zarejestrowany przez odbiornik znajdujący się wewnątrz stalowej rury o nominalnych rozmiarach średnicy 127 mm i grubości 5,5 mm

W tabeli 6.19 przedstawione zostały zmierzone czasy odbioru echa odbitego od ściany zbiornika po przejściu przez rury i odległości od głowicy pomiarowej do ściany zbiornika obliczone przy uwzględnieniu zmierzonej prędkości ultradźwięków w wodzie, która wynosiła 1500 m/s.

Tabela 6.19 Zestawienie zmierzonych czasów i obliczonych odległości od głowicy umieszczonej wewnątrz rur od ściany zbiornika

Średnica rury [mm]	Materiał	Punkt pomiarowy	Częstotliwość sygnału nadawczego [kHz]	Czas odbioru echa [μs]	Zmierzona odległość [mm]	Różnica odległości ^{a)} [mm]	Stosunek do sygnału odniesienia [%]
127	stal	2	500	410	308	8	15
219	Stal	2	290	410	308	8	12
219	stal	3	620	409	307	7	8,5
127-219	Stal	2 i 3	500, 620, 630	brak	brak	brak	brak
219	Włókno szklane	1	350	400	300	0	38
219	Włókno szklane	1	540	400	300	0	29

^{a)} odległość między głowicą pomiarową a ścianą zbiornika 300 mm

Amplitudę echa sygnału odbitego od ściany zbiornika zarejestrowanego w zakresie od kilku do kilkunastu procent sygnału odniesienia dla rur stalowych oraz ok. 30 - 40% dla rur wykonanych z włókna szklanego, co oznacza, że amplituda sygnału zarejestrowanego przez odbiornik umieszczony wewnątrz stalowej rury jest ok. 2 - 3 krotnie niższa niż amplituda sygnału zarejestrowanego bezpośrednio za rurą. Dla rury z włókna szklanego poziom sygnału rejestrowanego odbiornikiem umieszczonym w rurze jest mniejszy ok. 30 - 40% od zarejestrowanego sygnału przechodzącego po raz pierwszy przez rurę.

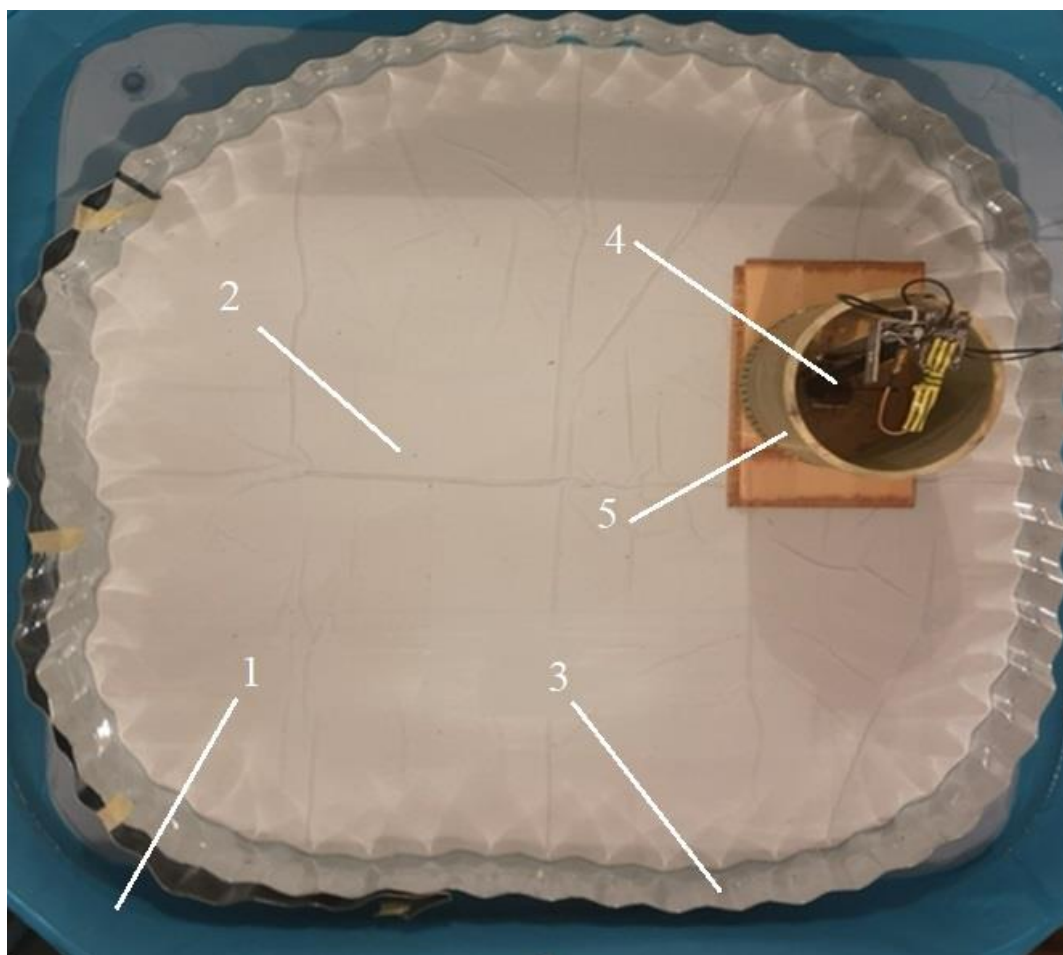
W przypadku, w którym urządzenie pomiarowe znajduje się wewnątrz dwóch rur stalowych niestety nie udało się wyróżnić echa odbitego od ściany zbiornika.

Porównując wyniki uzyskane z badań symulacyjnych i testów laboratoryjnych możemy zauważyć, że poziomy rejestrowanego sygnału echa odbitego od ściany zbiornika przez odbiornik umieszczony wewnątrz stalowej rury o średnicy 219 mm w stosunku do sygnału odniesienia w obu przypadkach są zbliżone. Wyniki symulacji określają amplitudę echa odbitego na poziomie 15% i 12% dla pierwszej i drugiej

częstotliwości rezonansowej, natomiast wyniki badań laboratoryjnych wartości te wynoszą odpowiednio 12% oraz 8,5%. Natomiast, zauważalne różnice są przy określeniu odległości echa odbitego od ściany zbiornika. W badaniach laboratoryjnych pozorne przesunięcie echa wynosi 8 mm oraz 7 mm, natomiast dla symulacji są to wartości 25 mm oraz 20 mm dla pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej.

6.9 Laboratoryjne pomiary geometrii zbiornika, kiedy echosonda znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rury

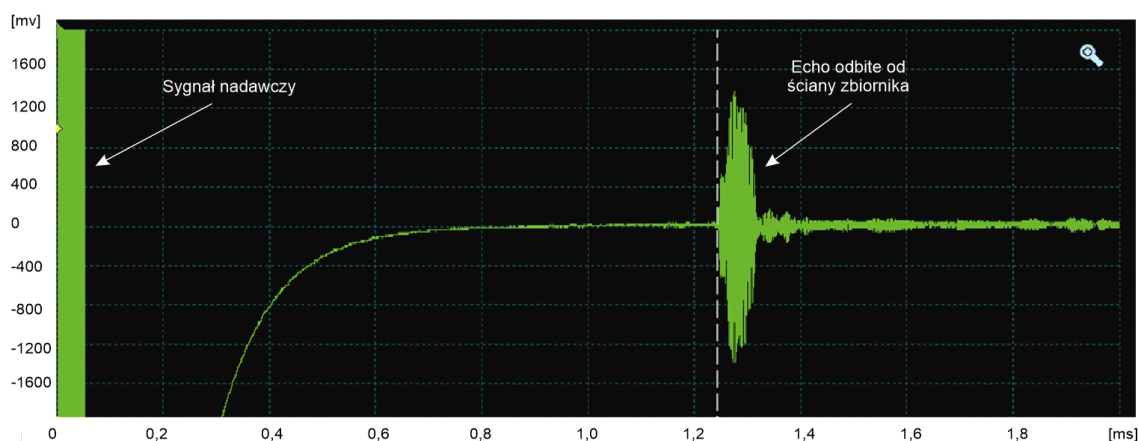
Na podstawie wyników otrzymanych z pomiarów odległości z symulacji komputerowej oraz otrzymanych z badań laboratoryjnych, przeprowadzono pomiary geometrii zbiornika na stanowisku testowym, gdzie nadajnik (transmitter) i odbiornik fal ultradźwiękowych znajdują się w wewnętrznej przestrzeni rury stalowej lub rury z włókna szklanego. W tym celu wykorzystano owalny zbiornik o wymiarach 1200 x 1200 x 160 mm, w którym umieszczono ścianę wykonaną z aluminiowej blachy falowanej o grubości 2 mm. Zbiornik ten był wypełniony wodą do wysokości 150 mm (Rysunek 6.57).



Rysunek 6.57 Stanowisko pomiarowe do pomiaru geometrii zbiornika wypełnionego wodą. 1) basen, 2) zbiornik wypełniony wodą, 3) aluminiowa ściana zbiornika, 4) głowica pomiarowa, 5) rura.

W zbiorniku umieszczono również głowicę pomiarową (echosondę), która pełniła rolę zarówno nadajnika (transmitera) jak i odbiornika ultradźwiękowego. Na

początku zmierzono kontur zbiornika na wysokości 70 mm od jego podstawy metodą ultradźwiękową przy braku rur. Aby wykonywać pomiar konturu zbiornika echosonda mierzyła odległości od głowicy pomiarowej do ściany aluminiowej. W tym doświadczeniu echosonda obracając się wokół swojej osi co $11^\circ \pm 2^\circ$ wykonywała punktowy pomiar odległości uzyskując w ten sposób 32 punkty pomiarowe. Na każdym punkcie pomiarowym fala o częstotliwości 400 kHz była emitowana w czasie 50 μ s. Przykładowy zarejestrowany sygnał przedstawiony został na rysunku 6.58, na którym widać wyraźny sygnał odbity od aluminiowej ściany.



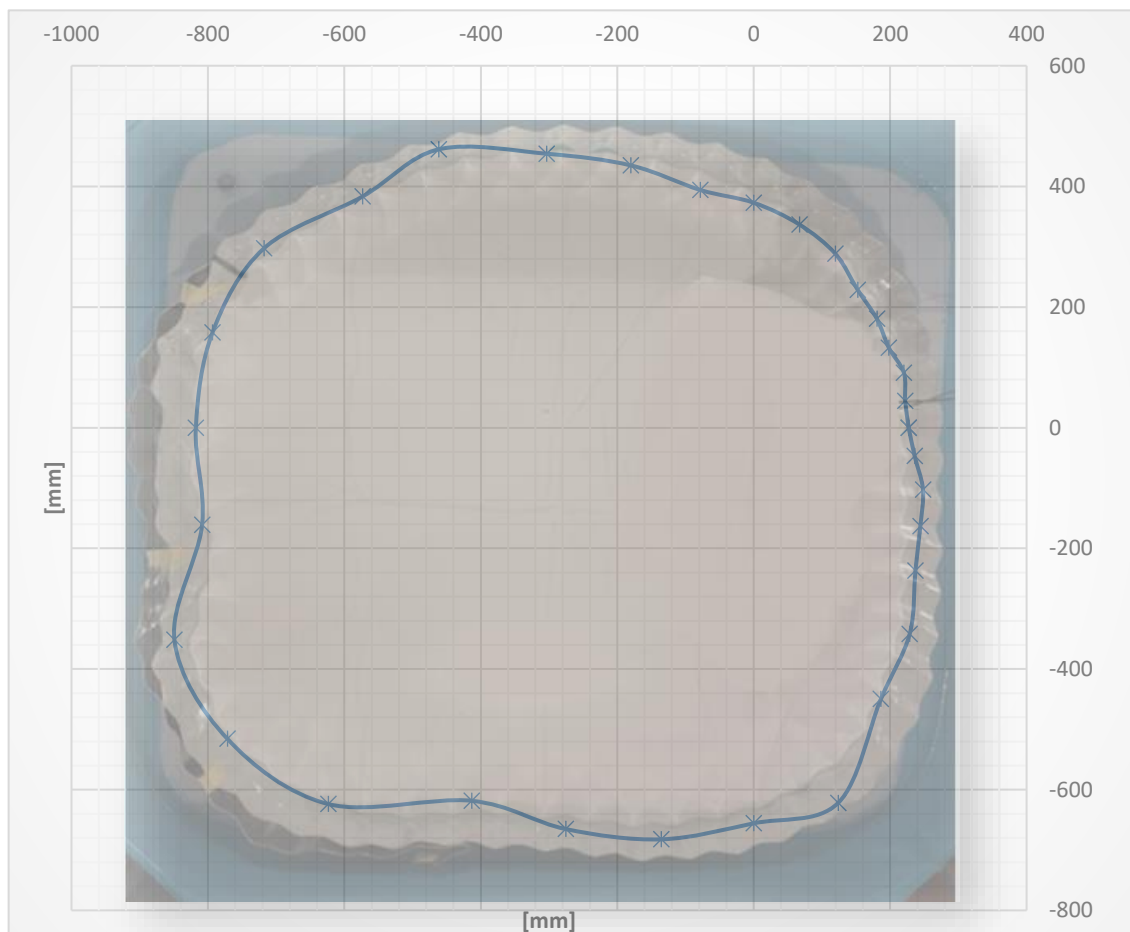
Rysunek 6.58 Przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik na punkcie z blachy aluminiowej dla promienia wodzącego o azymucie 203° (punkt nr 19 Tabela 6.21) przy braku rur

Dla każdego z zarejestrowanych przebiegów określono czas odbioru echa od ściany blachy aluminiowej. Odległości głowicy ultradźwiękowej od ściany basenu zostały obliczone na podstawie czasu i zmierzonej prędkości fal ultradźwiękowych w wodzie, która wynosiła 1479 m/s. Otrzymane odległości głowicy do pomiarowych punktów są prezentowane w tabeli 6.20.

Tabela 6.20 Zarejestrowane czasy ech odbitych przy braku rury i obliczone odległości sondy od blachy aluminiowej na punktach pomiarowych

Zbiornik							
Lp.	Kąt	Czas	Odległość	Lp.	Kąt	Czas	Odległość
-	[°]	[μ s]	[mm]	-	[°]	[μ s]	[mm]
1	0	307	227	17	180	1105	818
2	11	306	226	18	191	1114	824
3	23	322	238	19	203	1242	919
4	34	322	238	20	214	1254	928
5	45	345	255	21	225	1192	882
6	56	371	275	22	236	1005	744
7	68	422	312	23	248	973	720
8	79	464	343	24	259	940	696
9	90	504	373	25	270	886	656
10	101	543	402	26	281	857	634
11	113	636	471	27	293	658	487
12	124	738	546	28	304	556	414
13	135	882	653	29	315	453	335
14	146	932	690	30	326	397	294
15	158	1050	777	31	338	363	269
16	169	1093	809	32	349	325	241

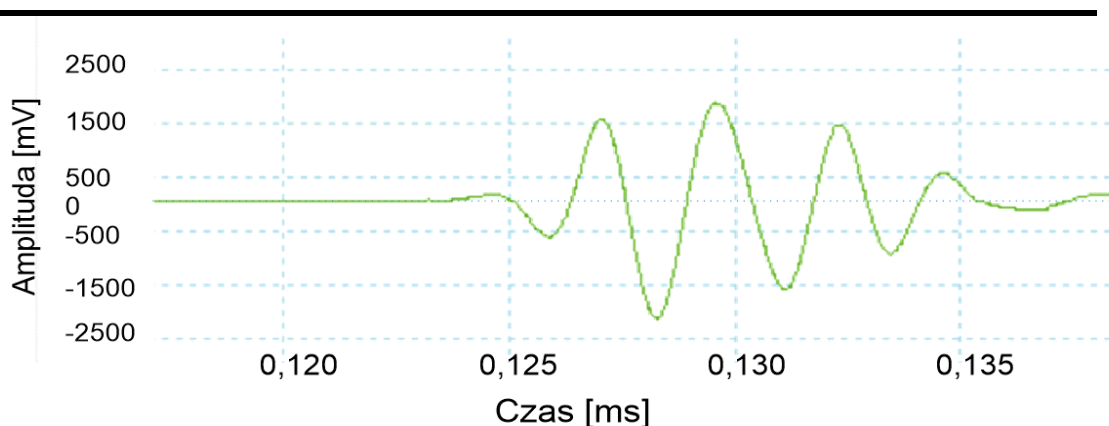
Na podstawie danych z tabeli 6.20 sporządzono kontur zbiornika (Rysunek 6.59). Najmniejsza zarejestrowana odległość głowicy pomiarowej do ściany zbiornika wynosiła 226 mm natomiast największa odległość wynosiła 928 mm.



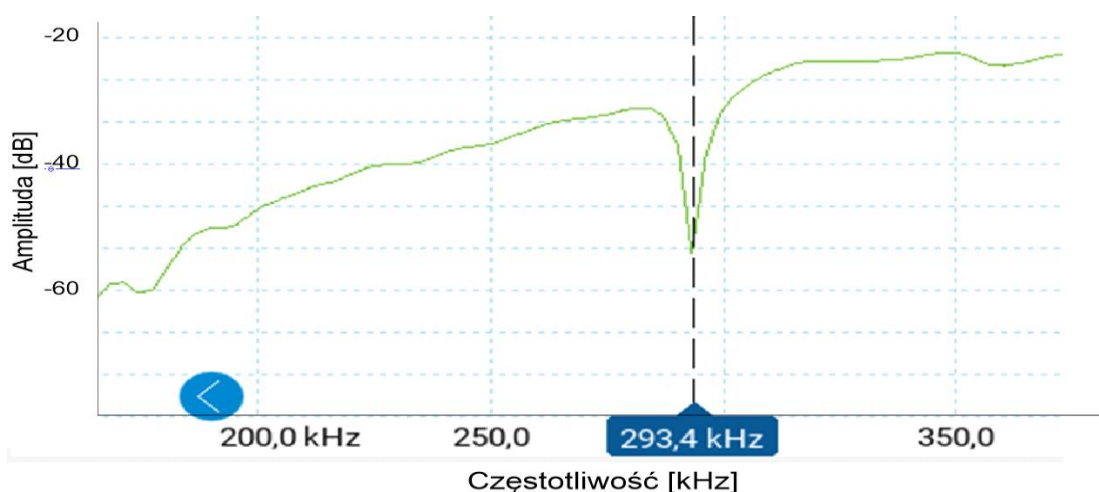
Rysunek 6.59 Kształt zbiornika na wysokości 70 mm określony na podstawie pomiaru ultradźwiękowego przy braku rur

Następnie zmierzono ten sam kontur zbiornika, kiedy głowica pomiarowa umieszczona została w rurze stalowej lub w rurze z włókna szklanego z zastosowaniem fal o odpowiednich częstotliwościach rezonansowych. Sonda obracała się punktowo z krokiem kątowym $11^{\circ} \pm 2^{\circ}$, w ten sposób otrzymano 32 przebiegi sygnału. Odległości konturu zbiornika określono na podstawie pomiaru czasu początku echa odbitego od aluminiowej ściany i prędkości rozchodzenia fali w wodzie.

W pierwszej kolejności wyznaczano częstotliwość rezonansową fali dla grubości rury na danym punkcie pomiarowym na rurze, przez który wiązka fali ma przechodzić w kierunku ściany zbiornika. Określenie częstotliwości rezonansowej postępowało w ten sposób, że najpierw wysyłano sygnał ultradźwiękowy o czasie trwania ok. 5 μ s i o częstotliwości, która odpowiadała długości fali w rurze o nominalnej grubości jej ścianki. Następnie rejestrowany był sygnał odbity od wewnętrznej ściany rury (Rysunek 6.60), a w jego widmie częstotliwości lokalizowano minimum lokalne (Rysunek 6.61). Wyznaczona częstotliwość jest częstotliwością rezonansową, której sygnał jest najlepiej transmitowany przez ten punkt na rurze.



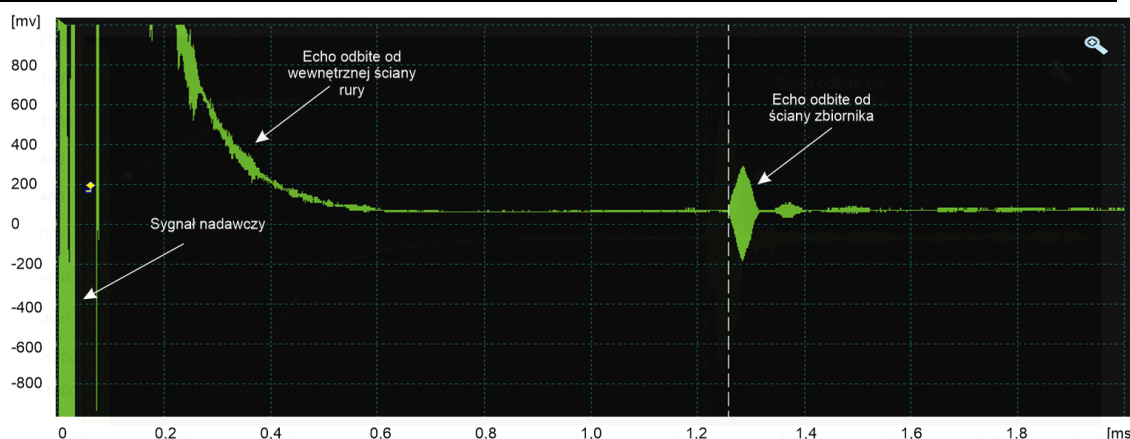
Rysunek 6.60 Echo sygnału odbitego od wewnętrznej ściany rury stalowej o średnicy 219 mm i grubości 10 mm otrzymane dla sygnału nadawczego o częstotliwości 300 kHz, o czasie trwania 5 μ s.



Rysunek 6.61 Widmo częstotliwościowe sygnału echa odbitego od wewnętrznej ściany rury stalowej o średnicy 219 mm i nominalnej grubości 10 mm otrzymane dla sygnału nadawczego o częstotliwości 300 kHz, o czasie trwania 5 μ s, z zaznaczoną częstotliwością rezonansową 293,4 kHz

Kolejno skierowano na danym punkcie pomiarowym sygnał o częstotliwości rezonansowej w czasie 50 μ s i rejestrowano przebieg sygnału.

W przypadku stalowej rury o nominalnych średnicy 127 mm i grubości 5,5 mm, do wykonywania pomiarów odległości głowicy od ściany basenu zastosowano pierwszą częstotliwość rezonansową, która w zależności od grubości ścianki rury na różnych punktach wahała się w przedziale 490 - 525 kHz. W wyniku pomiarów otrzymano przebiegi sygnałów, gdzie określony został czas przyjścia echa odbitego od ściany basenu (Rysunek 6.62).



Rysunek 6.62 Przebieg sygnału zarejestrowany przez głowicę pomiarową, która znajdowała się wewnątrz stalowej rury 5", dla częstotliwości 512 kHz, dla kąta 203° (pozycja pomiarowa nr 19)

Ze wszystkich punktów pomiarowych otrzymano echa sygnału odbitego od aluminiowej ściany basenu. Rejestrowane czasy sygnału echa odbitego i obliczone odległości wraz z dobranymi częstotliwościami zostały przedstawione w tabeli 6.21. Odchylenie standardowe różnic pomiędzy zmierzonymi odległościami w przypadku obecności stalowej rury o nominalnych rozmiarach średnicy 127 mm i grubości 5,5 mm w porównaniu z odległościami mierzonymi przy braku rury wyniosła 16,8 mm.

Tabela 6.21 Rejestrowane czasy sygnału echa odbitego i obliczone odległości wraz z dobranymi częstotliwościami dla przypadku, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz rury stalowej o rozmiarach nominalnych średnicy 127 mm i grubości 5,5 mm przy użyciu sygnału nadawczego odpowiadającego pierwszej częstotliwości rezonansowej

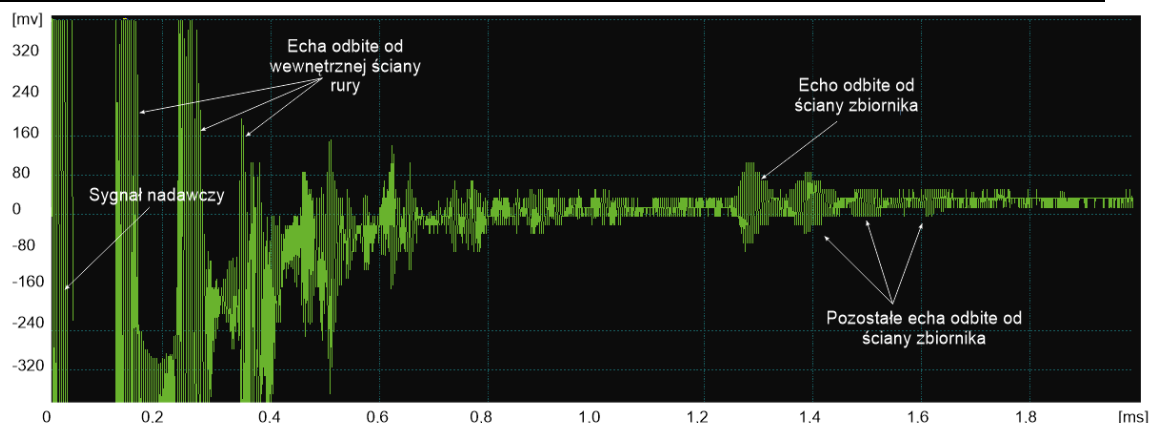
Rura stalowa: średnica 127 mm grubość 5,5 mm – f1											
Lp.	Kąt	f1	Czas	Odległość	Różnica	Lp.	Kąt	f1	Czas	Odległość	Różnica
-	[°]	[kHz]	[μs]	[mm]	[mm]	-	[°]	[kHz]	[μs]	[mm]	[mm]
1	0	494,0	300,0	222	-5	17	180	522	1115	825	7
2	11	495	297	220	-7	18	191	525	1147	849	24
3	23	498	314	232	-6	19	203	512	1257	930	11
4	34	500	352	260	22	20	214	508	1253	927	-1
5	45	498	354	262	7	21	225	497	1209	895	13
6	56	496	407	301	27	22	236	495	946	700	-4,
7	68	495	470	348	36	23	248	500	892	660	-6
8	79	490	529	391	48	24	259	514	888	657	-38
9	90	498	556	411	38	25	270	494	876	648	-7
10	101	495	641	474	73	26	281	507	841	622	-12
11	113	502	749	554	84	27	293	507	642	475	11
12	124	510	850	629	83	28	304	511	571	422	10
13	135	515	888	657	4	29	315	510	467	345	-3
14	146	520	980	725	36	30	326	489	402	297	4
15	158	525	1100	814	37	31	338	491	312	231	-38
16	169	520	1102	815	7	32	349	490	320	237	-4

Z danych z Tabeli 6.21 sporządzono kontur zbiornika na tle konturu basenu otrzymanego z danych w przypadku braku rury (Rysunek 6.63).

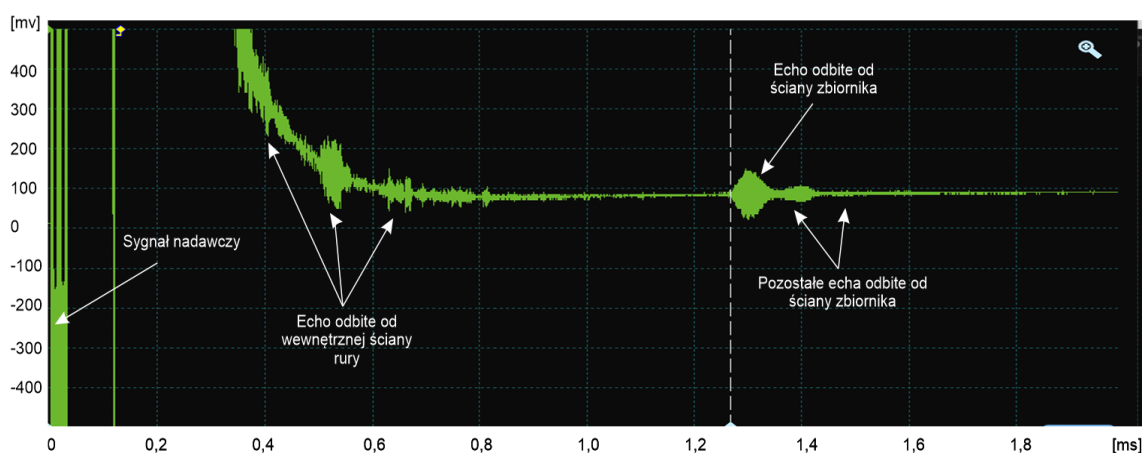


Rysunek 6.63 Kontur zbiornika wyznaczony na podstawie pomiaru bez obecności rury (linia niebieska) oraz w przypadku, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz nominalnej rury stalowej o średnicy 127 mm i grubości 5,5 mm (linia czerwona). Częstotliwość sygnału nadawczego odpowiadała pierwszej częstotliwości rezonansowej

W przypadku stalowej rury o nominalnej średnicy 219 mm i grubości 10 mm do pomiarów odległości nadajnika od ściany basenu zastosowano fale nadawcze o pierwszej oraz drugiej częstotliwości rezonansowej. Pierwsza częstotliwość rezonansowa w zależności od grubości ścianki rury w różnych punktach zawierała się w przedziale 274 - 308 kHz, natomiast druga w przedziale 607 – 677 kHz. Otrzymane przebiegi sygnałów umożliwiły określenie czasu przyjscia echa odbitego od punktów na ścianie basenu. Przykładowy przebieg sygnału pierwszej częstotliwości rezonansowej jest podany na rysunku 6.64, a przebieg sygnału drugiej częstotliwości rezonansowej na rysunku 6.65.



Rysunek 6.64 Przebieg sygnału zarejestrowany przez głowicę pomiarową, która znajdowała się wewnątrz stalowej rury o nominalnej średnicy 219 mm i grubości 10 mm, dla kąta 203° (pozycja pomiarowa nr 19), dla pierwszej częstotliwości rezonansowej 277 kHz



Rysunek 6.65 Przebieg sygnału zarejestrowany przez głowicę pomiarową, która znajdowała się wewnątrz stalowej rury o nominalnej średnicy 219 mm i grubości 10 mm, dla kąta 203° (pozycja pomiarowa nr 19), dla drugiej częstotliwości rezonansowej 610 kHz

Dla rury stalowej o nominalnej średnicy 219 mm i grubości 10 mm przy zastosowaniu pierwszej częstotliwości rezonansowej otrzymano 32 przebiegi sygnału, z których wyodrębnione zostały 24 z echemi odbitymi od aluminiowej ściany nadających do obliczenia odległości. Wyniki pomiaru odległości wraz z czasem rejestracji sygnału echa odbitego dla pierwszej częstotliwości rezonansowej zostały przedstawione w tabeli 6.22. Odchylenie standardowe różnic pomiędzy zmierzonymi odległościami w przypadku obecności stalowej rury o nominalnych rozmiarach średnicy 219 mm i grubości ok. 10 mm w porównaniu z odległościami mierzonymi przy braku rury wyniosło 18,6 mm.

Tabela 6.22 Wyniki pomiaru odległości między głowicą pomiarową a aluminiową ścianą zbiornika w sytuacji, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz rury stalowej o rozmiarach nominalnych średnicy 219 mm i grubości 10 mm dla sygnału nadawczego odpowiadającego pierwszej częstotliwości rezonansowej f_1

Rura stalowa średnica 219 mm grubość 10 mm – f_1											
Lp.	Kąt	f_1	Czas	Odległość	Różnica	Lp.	Kąt	f_1	Czas	Odległość	Różnica
-	[°]	[kHz]	[μ s]	[mm]	[mm]	-	[°]	[kHz]	[μ s]	[mm]	[mm]
1	0	292	302	223	-4	17	180	277	1162	860	36
2	11	290	bd	bd	bd	18	191	283	1266	937	18
3	23	284	339	251	13	19	203	277	1253	927	-1
4	34	280	317	235	-21	20	214	274	1197	886	4
5	45	290	327	242	-33	21	225	289	1015	751	7
6	56	292	bd	bd	bd	22	236	297	970	718	-2
7	68	292	515	381	38	23	248	303	967	716	20
8	79	292	518	383	10	24	259	304	875	648	-8
9	90	294	bd	bd	bd	25	270	306	920	681	47
10	101	306	656	485	15	26	281	308	bd	bd	bd
11	113	284	656	485	15	27	293	304	bd	bd	bd
12	124	288	bd	bd	bd	28	304	301	442	327	-8
13	135	282	969	717	27	29	315	306	390	289	-5
14	146	285	1090	807	30	30	326	306	bd	bd	bd
15	158	284	1090	807	-2	31	338	306	bd	bd	bd
16	169	280	1125	833	15	32	349	298	302	223	-4

bd – brak danych

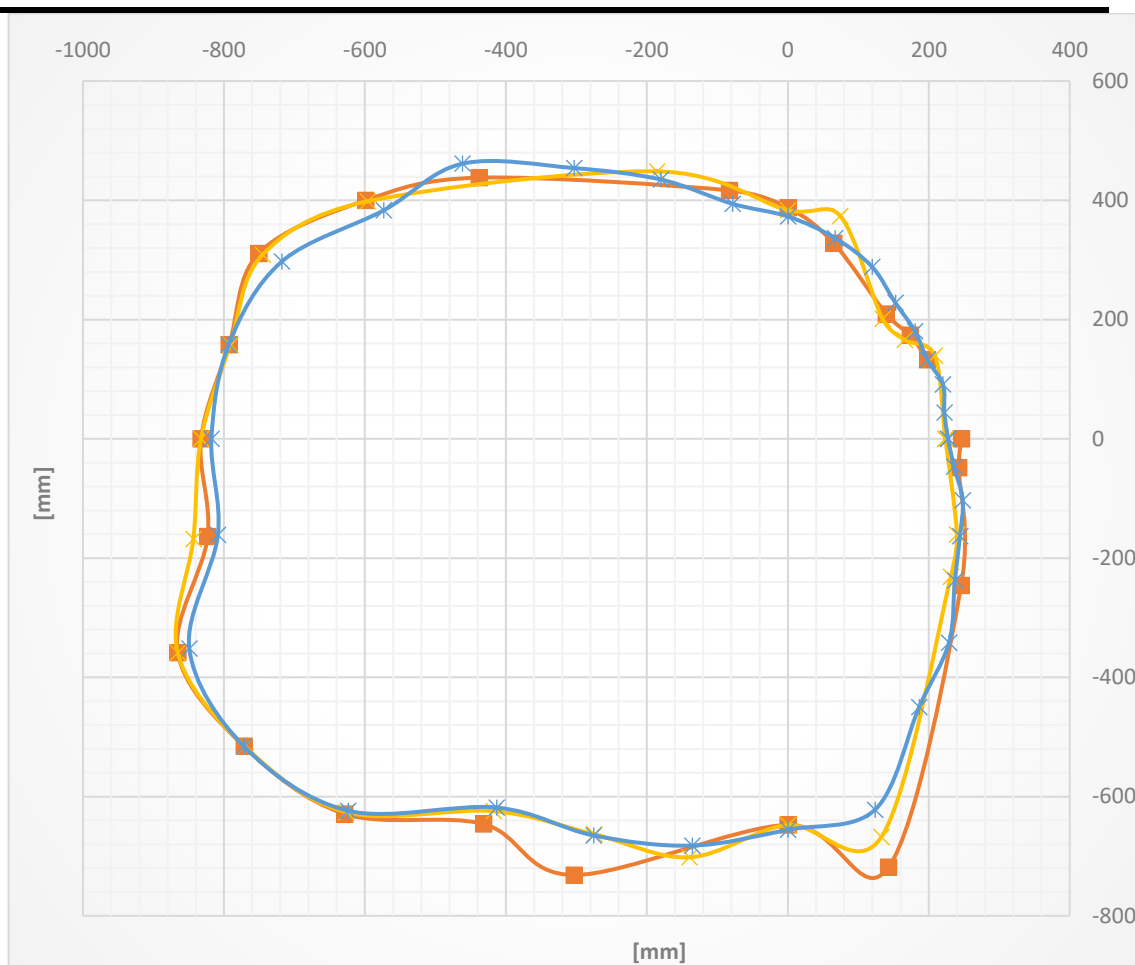
Przy zastosowaniu drugiej częstotliwości rezonansowej otrzymano 32 przebiegi sygnału, z których wyodrębnione zostały 22 z echami odbitymi od aluminiowej ściany pozwalającymi na obliczenie odległości. Wyniki pomiaru odległości wraz z czasem rejestracji sygnału echa odbitego dla drugiej częstotliwości rezonansowej zostały przedstawione w tabeli 6.23. Odchylenie standardowe różnic pomierzonych odległości ścian basenu w przypadku obecności stalowej rury 219 mm i grubości nominalnej 10 mm przy zastosowaniu drugiej częstotliwości rezonansowej w porównaniu z odległościami mierzonymi przy braku rury wyniosło 32 mm.

Tabela 6.23 Wyniki pomiaru odległości między głowicą pomiarową a aluminiową ścianą zbiornika w sytuacji, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz rury stalowej o rozmiarach nominalnych średnicy 219 mm i grubości 10 mm dla sygnału nadawczego odpowiadającego drugiej częstotliwości rezonansowej f_2

Rura stalowa średnica 219 mm grubość 10 mm – f_2											
Lp.	Kąt	f_2	Czas	Odległość	Różnica	Lp.	Kąt	f_2	Czas	Odległość	Różnica
-	[°]	[kHz]	[μs]	[cm]	[cm]	-	[°]	[kHz]	[μs]	[cm]	[cm]
1	0	642	bd	bd	bd	17	180	611	1134	839	15
2	11	635	bd	bd	bd	18	191	623	1266	937	18
3	23	627	322	238	0	19	203	610	1254	928	0
4	34	616	332	246	-10	20	214	607	1202	889	7
5	45	638	340	252	-23	21	225	634	1050	777	33
6	56	640	bd	bd	bd	22	236	643	1070	792	72
7	68	640	452	334	-9	23	248	653	bd	bd	bd
8	79	640	524	388	15	24	259	655	875	648	-8
9	90	640	574	425	23	25	270	657	990	733	98
10	101	652	bd	bd	bd	26	281	658	bd	bd	bd
11	113	622	bd	bd	bd	27	293	659	bd	bd	bd
12	124	633	837	619	-33	28	304	647	470	348	13
13	135	615	973	720	30	29	315	659	bd	bd	bd
14	146	623	1098	813	36	30	326	677	bd	bd	bd
15	158	621	1092	808	-1	31	338	694	334	247	7
16	169	615	1125	833	15	32	349	663	333	246	19

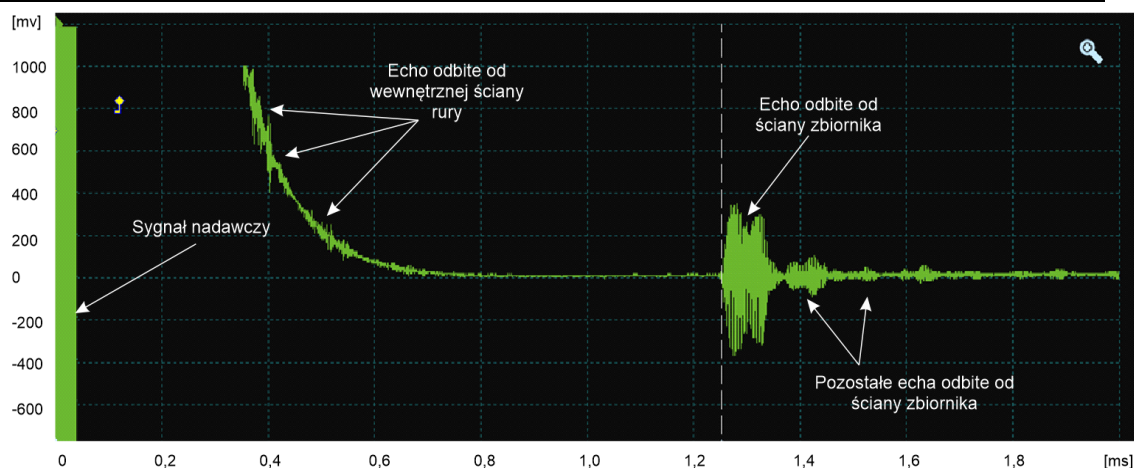
bd – brak danych

Na rysunku 6.66 przedstawiono kontury basenu wykreślone z odległości otrzymanych z pomiarów ultradźwiękowych przy użyciu sygnałów nadawczych o pierwszej i drugiej częstotliwościach rezonansowych, kiedy głowica pomiarowa umieszczona była w środku stalowej rury o nominalnej średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm. Na tym rysunku przedstawiono również kontur basenu sporządzony z danych otrzymanych z pomiarów, kiedy głowica pomiarowa nie była przesłonięta przez rurę (kolor niebieski).

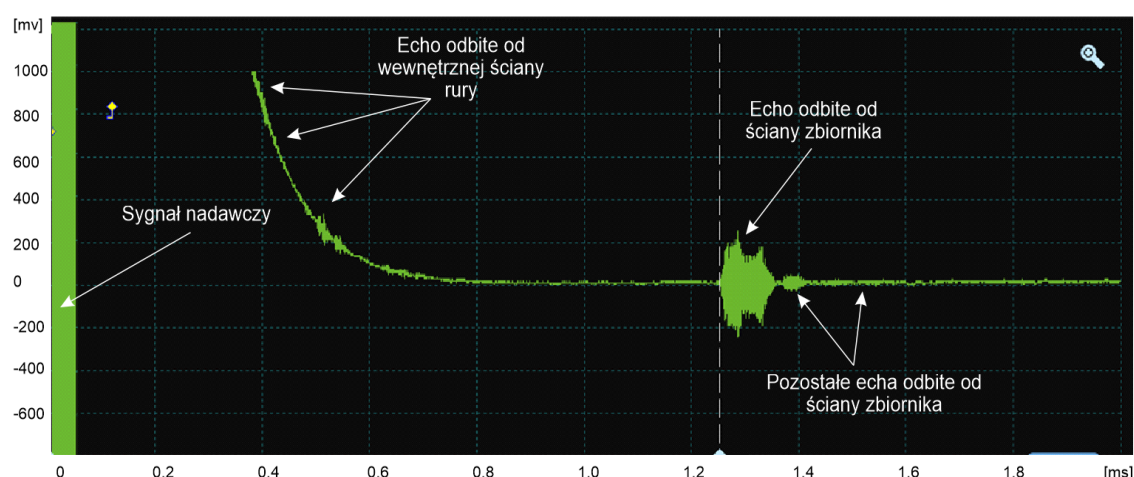


Rysunek 6.66 Kontur zbiornika wyznaczony na podstawie pomiaru bez obecności rury (linia niebieska) oraz w przypadku, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz nominalnej rury stalowej o średnicy 219 mm i grubości 10 mm z wykorzystaniem sygnału nadawczego o pierwszej (linia czerwona) i drugiej (linia żółta) częstotliwości rezonansowych

W celu wykonywania pomiarów odległości ściany zbiornika od głowicy pomiarowej, która znajdowała się w wewnętrznej przestrzeni rury z włókna szklanego o nominalnej średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm, zastosowano sygnały nadawcze o drugiej oraz trzeciej częstotliwości rezonansowej. Zakres drugiej częstotliwości rezonansowej, w zależności od grubości ścianki na danym punkcie pomiarowym, zawierał się w przedziale 312 - 365 kHz, natomiast zakres trzeciej częstotliwości określony był w przedziale 470 – 559 kHz. Przykładowe przebiegi sygnału zarejestrowanego przy użyciu sygnałów nadawczych o odpowiednich częstotliwościach rezonansowych są odpowiednio przedstawione na Rysunkach 6.67 oraz 6.68. Na tych rysunkach zaznaczony został sygnał nadawczy, echo sygnału odbitego od aluminiowej ściany, echa wielokrotnie odbite od wewnętrznej ściany rury oraz echa odbite od ścian zbiornika za aluminiową płytą.



Rysunek 6.67 Przebieg sygnału zarejestrowany przez głowicę pomiarową przy kącie 203° (punkt pomiarowy 19); głowica znajdowała się wewnątrz rury z włókna szklanego o nominalnych rozmiarach średnicy 219 mm i grubości 10 mm przy częstotliwości nadawania 363 kHz



Rysunek 6.68 Przebieg sygnału zarejestrowany przez głowicę pomiarową przy kącie 203° (punkt pomiarowy 19); głowica znajdowała się wewnątrz rury z włókna szklanego o nominalnych rozmiarach średnicy 219 mm i grubości 10 mm przy częstotliwości nadawania 553 kHz

Dla rury wykonanej z włókna szklanego o średnicy 219 mm przy zastosowaniu sygnału nadawczego o drugiej częstotliwości rezonansowej otrzymano 32 przebiegi sygnału, z których wyodrębnione zostało 31 ech odbitych od aluminiowej ściany nadających do obliczenia odległości. Czas rejestracji sygnału echa odbitego dla sygnału nadawczego o drugiej częstotliwości rezonansowej oraz wyliczone odległości zostały przedstawione w tabeli 6.24. Odchylenie standardowe różnic między odległościami od głowicy pomiarowej do ściany basenu otrzymane przy obecności rury z włókna szklanego o nominalnych rozmiarach średnicy 219 mm i grubości 10 mm w porównaniu z odległościami otrzymanymi w pomiarach przy braku rury wynosi 18 mm.

Tabela 6.24 Wyniki pomiaru odległości między głowicą pomiarową a aluminiową ścianą zbiornika w sytuacji, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz rury z włókna szklanego o rozmiarach nominalnych średnicy 219 mm i grubości 10 mm dla sygnału nadawczego odpowiadającego drugiej częstotliwości rezonansowej f_2

Rura włókno szklane średnica 219 mm grubość 10 mm – f_2											
Lp.	Kąt	f_1	Czas	Odległość	Różnica	Lp.	Kąt	f_1	Czas	Odległość	Różnica
-	[°]	[kHz]	[μs]	[mm]	[mm]	-	[°]	[kHz]	[μs]	[mm]	[mm]
1	0	360	297	220	-7	17	180	341	1111	822	4
2	11	356	295	218	-8	18	191	350	1133	838	14
3	23	343	319	236	-2	19	203	363	1258	931	12
4	34	345	344	255	16	20	214	364	1280	947	19
5	45	348	341	252	-3	21	225	348	1182	875	-7
6	56	335	339	251	-24	22	236	352	970	718	-26
7	68	331	bd	bd		23	248	348	956	707	-13
8	79	324	450	333	-10	24	259	354	931	689	-7
9	90	315	500	370	-3	25	270	329	875	648	-8
10	101	347	540	400	-2	26	281	317	927	686	52
11	113	330	630	466	-4	27	293	305	650	481	-6
12	124	359	798	591	44	28	304	312	551	407	-4
13	135	363	884	654	1	29	315	326	450	333	-2
14	146	365	931	689	-1	30	326	336	383	283	-10
15	158	361	1066	789	12	31	338	342	348	258	-11
16	169	348	1104	817	8	32	349	355	312	231	-10

bd – brak danych

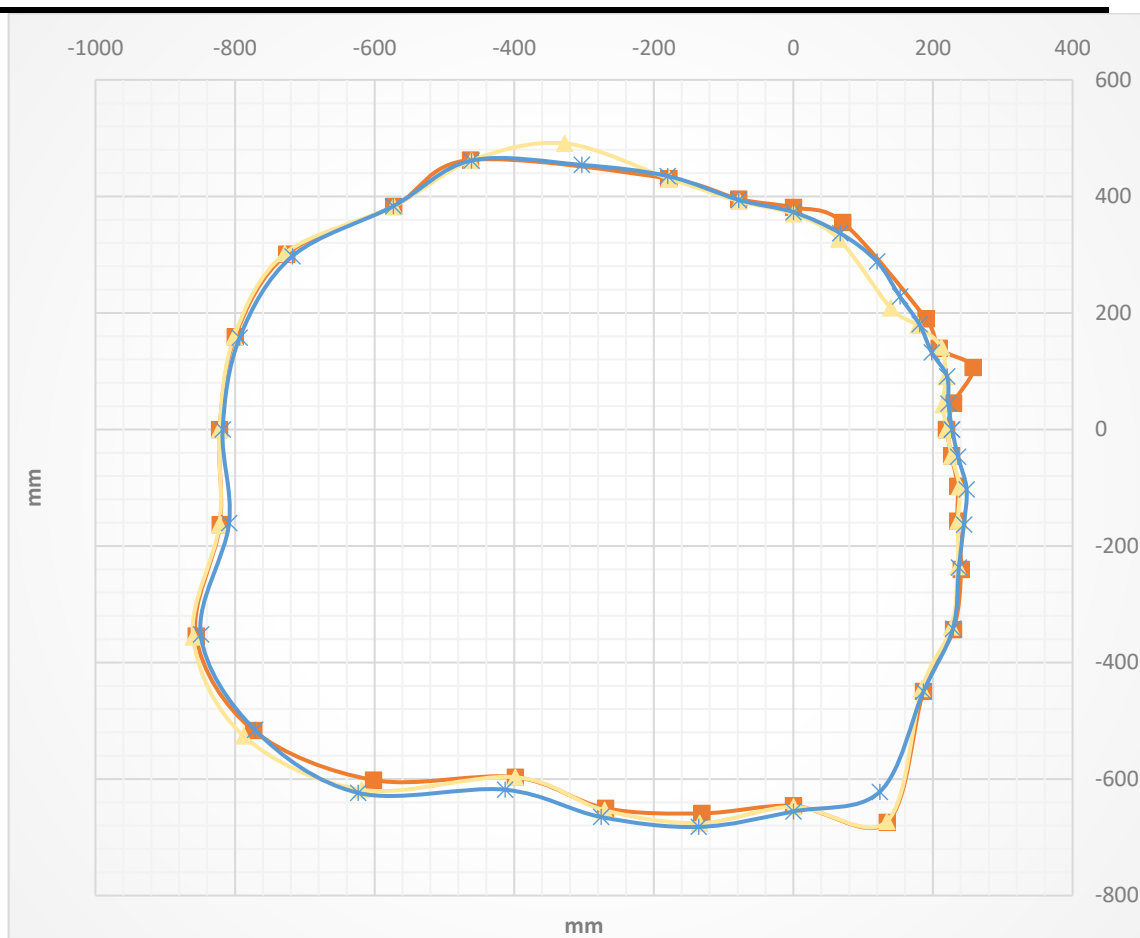
Dla trzeciej częstotliwości rezonansowej otrzymano 29 przebiegów ech odbitych od ściany wyodrębnionych, które umożliwiły obliczyć odległości od głowicy do ściany basenu. Czas rejestracji sygnału echa odbitego od aluminiowej ściany zbiornika oraz wyliczone odległości dla sygnału nadawczego o trzeciej częstotliwości rezonansowej zostały przedstawione w tabeli 6.25. Dla tego przypadku odchylenie standardowe różnic między odległościami od głowicy pomiarowej do ściany basenu otrzymane przy obecności rury z włókna szklanego o nominalnych rozmiarach średnicy 219 mm i grubości 10 mm w porównaniu z odległościami otrzymanymi w pomiarach przy braku rury wynosi 20 mm.

Tabela 6.25 Wyniki pomiaru odległości między głowicą pomiarową a aluminiową ścianą zbiornika w sytuacji, kiedy głowica pomiarowa znajduje się we wnętrzu rury z włókna szklanego o rozmiarach nominalnych średnicy 219 mm i grubości 10 mm dla sygnału nadawczego odpowiadającego trzeciej częstotliwości rezonansowej f_3

Rura włókno szklane średnica 219 mm grubość 10 mm – f_3											
Lp.	Kąt	f_2	Czas	Odległość	Różnica	Lp.	Kąt	f_2	Czas	Odległość	Różnica
-	[°]	[kHz]	[μs]	[mm]	[mm]	-	[°]	[kHz]	[μs]	[mm]	[cm]
1	0	530	296	219	-8	17	180	514	1111	822	4
2	11	539	316	234	7	18	191	531	1132	838	13
3	23	511	376	278	40	19	203	553	1252	926	7
4	34	510	339	251	13	20	214	548	1257	930	2
5	45	513	363	269	13	21	225	530	1150	851	-31
6	56	487	bd	bd	bd	22	236	526	970	718	-26
7	68	500	bd	bd	bd	23	248	515	951	704	-16
8	79	485	490	363	19	24	259	530	908	672	-24
9	90	494	515	381	8	25	270	499	873	646	-10
10	101	510	545	403	1	26	281	475	929	687	53
11	113	490	630	466	-4	27	293	470	658	487	0
12	124	551	bd	bd	bd	28	304	470	558	413	1
13	135	557	884	654	1	29	315	503	459	340	4
14	146	559	931	689	-1	30	326	508	382	283	-11
15	158	543	1062	786	9	31	338	513	344	255	-14
16	169	513	1102	815	7	32	349	526	312	231	-10

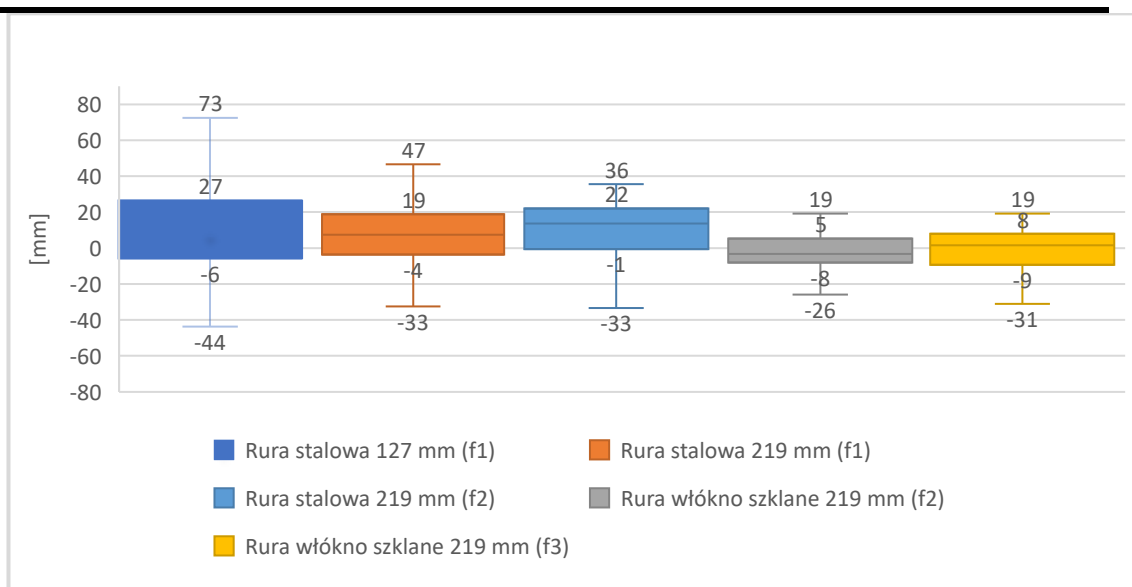
bd – brak danych

Na rysunku 6.69 przedstawiono kontury basenu sporządzone z danych otrzymanych z pomiarów wykonanych, kiedy głowica pomiarowa umieszczona była w środku rury z włókna szklanego o nominalnych wymiarach średnicy 219 mm i grubości ściany 10 mm przy sygnale o drugiej lub trzeciej częstotliwości rezonansowej. Na tym rysunku przedstawiony jest również kontur basenu sporządzony z danych pomiaru, kiedy głowica pomiarowa nie była przesłonięta przez rurę (kolor niebieski).



Rysunek 6.69 Kontur zbiornika wyznaczony na podstawie pomiaru bez obecności rury (linia niebieska) oraz w przypadku, kiedy głowica pomiarowa znajduje się we wnętrzu nominalnej rury wykonanej z włókna szklanego o średnicy 219 mm i grubości 10 mm z wykorzystaniem sygnału nadawczego o drugiej (linia czerwona) lub trzeciej (linia żółta) częstotliwości rezonansowych

Na rysunku 6.70 przedstawione zostały przedziały różnicy między odległościami otrzymanymi z pomiarów, gdzie głowica pomiarowa znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rury a odległościami otrzymanymi z pomiarów przy braku przeszkody. Największe różnice zauważalne są przy stalowej rurze o średnicy 127 mm i grubości ścianki 5,5 mm. Było to prawdopodobnie spowodowane umieszczeniem głowicy pomiarowej w rurze o małej średnicy, gdzie niewielkie przesunięcie głowicy od środka mogło skutkować ugięciem fali na granicy woda – stal, a co za tym idzie pozornym przesunięciem punktu pomiarowego. Większa średnica rur zmniejsza ten efekt, co potwierdzają pomiary dla rur 219 mm. Przy rurze z włókna szklanego – materiału o znacznie mniejszej impedancji akustycznej, zbliżonej do impedancji wody, co minimalizuje energię straconą przez odbicie fali na granicy woda - rura, wyniki pomiaru zdecydowanie się poprawiły.



Rysunek 6.70 Rozkład różnic w wynikach pomiaru odległości ściany zbiornika w przypadku umieszczenia głowicy pomiarowej w rurach dla sygnału nadawczego równego pierwszej (f_1), drugiej (f_2) lub trzeciej (f_3) częstotliwości rezonansowej w stosunku do pomiaru bez obecności rury. Przedziały wypełnione kolorem zawierają 50% wyników.

7 Pomiary grubości rur stalowych przy użyciu echosondy ultradźwiękowej

W przemyśle istnieje wiele przypadków, które wymagają pomiarów grubości przedmiotów z użyciem techniki ultradźwiękowej, na przykład pomiary grubości i stanu technicznego szyn kolejowych, czy też określenie grubości lub poszukiwanie pęknięć ścian rur przesyłowych cieczy lub gazu (Bernasconi i in., 2013; Zhou i in., 2019; Hernandez i in., 2020). Najczęściej stosowaną metodą pomiarową jest metoda puls-echo, która polega na wysyłaniu krótkiego impulsu wysokoczęstotliwościowego rzędu MHz i pomiarze czasu między wysłaniem fali ultradźwiękowej przez głowicę pomiarową a odbiorem sygnału echa od drugiej ściany badanego przedmiotu (El Kouche i Hassanein, 2012). W pomiarach takiego typu głowica pomiarowa najczęściej przylega do zewnętrznej powierzchni badanego elementu. Znane są również rozwiązania, w których przy badaniu grubości rur głowica pomiarowa umieszczona jest wewnątrz badanego przedmiotu (Birchall i in., 2007).

W poprzednich rozdziałach autor wykazał, że podczas pomiaru geometrii kawern, w sytuacji, kiedy echosonda znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rury zapuszczonej do komory, należy emitować fale ultradźwiękowe o częstotliwości rezonansowej odpowiadającej grubości ścianki rury. W ten sposób fale mają minimalne straty energetyczne przy przechodzeniu przez ścianę rury. Co oznacza, że badanie sygnałów o częstotliwościach rezonansowych umożliwia również określenie grubości ścianki rury w każdym jej punkcie. Wynika z tego, że określenie grubości ścianki rur znajdujących się w otworze, w celu oceny ich stanu technicznego, czyli stopnia korozji, zgnieceń czy też ewentualnych perforacji i odkształceń, jest możliwe do wykonania przy użyciu echosondy.

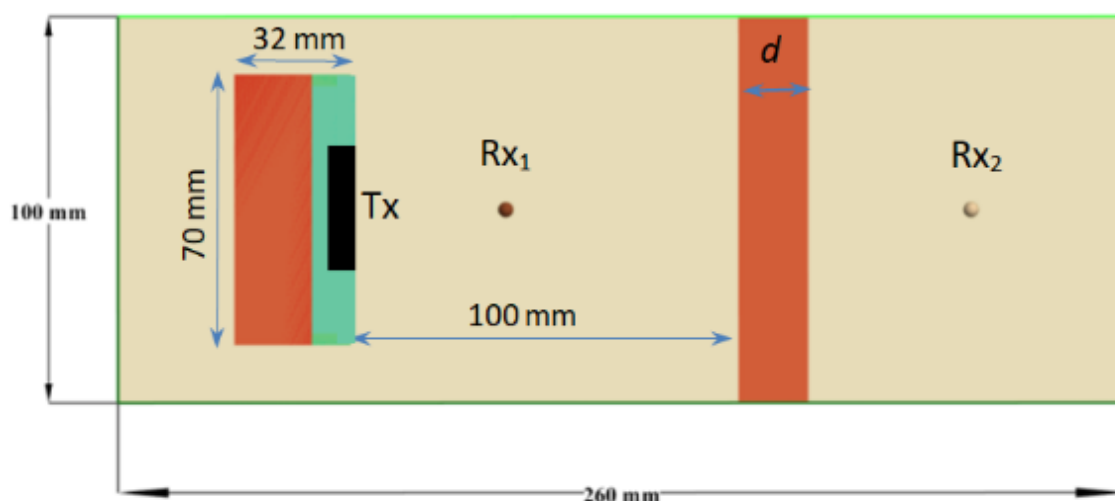
Badania przeprowadzone w niniejszym rozdziale pozwoliły na weryfikację możliwości, jak również określenie dokładności pomiarów grubości rur zapuszczonych do otworu podczas wykonywania pomiarów geometrii kawern echosondą znajdującą się w wewnętrznej przestrzeni rury.

7.1 Symulacyjne określenie częstotliwości rezonansowych sygnału przechodzącego przez płytę

W pierwszej kolejności przeprowadzone zostały badania symulacyjne przy wykorzystaniu programu OnScale™, które umożliwiły określenie częstotliwości rezonansowych dla stalowej płyty o różnych grubościach równoległej do głowicy pomiarowej.

W symulacji zaprojektowany został hipotetyczny dwuwymiarowy zbiornik wypełniony wodą, o wymiarach 260 x 100 mm. Wewnątrz zbiornika znajduje się głowica pomiarowa z nadajnikiem ultradźwiękowym Tx o wysokości 32 mm, umieszczonym w obudowie o wymiarach 70 x 32 mm wykonanej z epoksydu z domieszką wolframu w ilości 25%, mającej na celu wytłumienie fal wstecznych oraz obciążenie akustyczne nadajnika. W zbiorniku, w odległości 100 mm od czoła nadajnika umieszczono stalową płytę o zmiennej grubości 4, 6, 8, 10, 12, 15, 18 oraz 20 mm (Rysunek 7.1). W osi nadajnika w odległości 40 i 160 mm od głowicy pomiarowej umieszczono odbiorniki, którymi rejestrowano sygnał odbity od płyty

stalowej (Rx_1) oraz sygnał po przejściu przez płytę (Rx_2). Parametry materiałów wykorzystanych w modelu przedstawiono w tabeli 7.1.

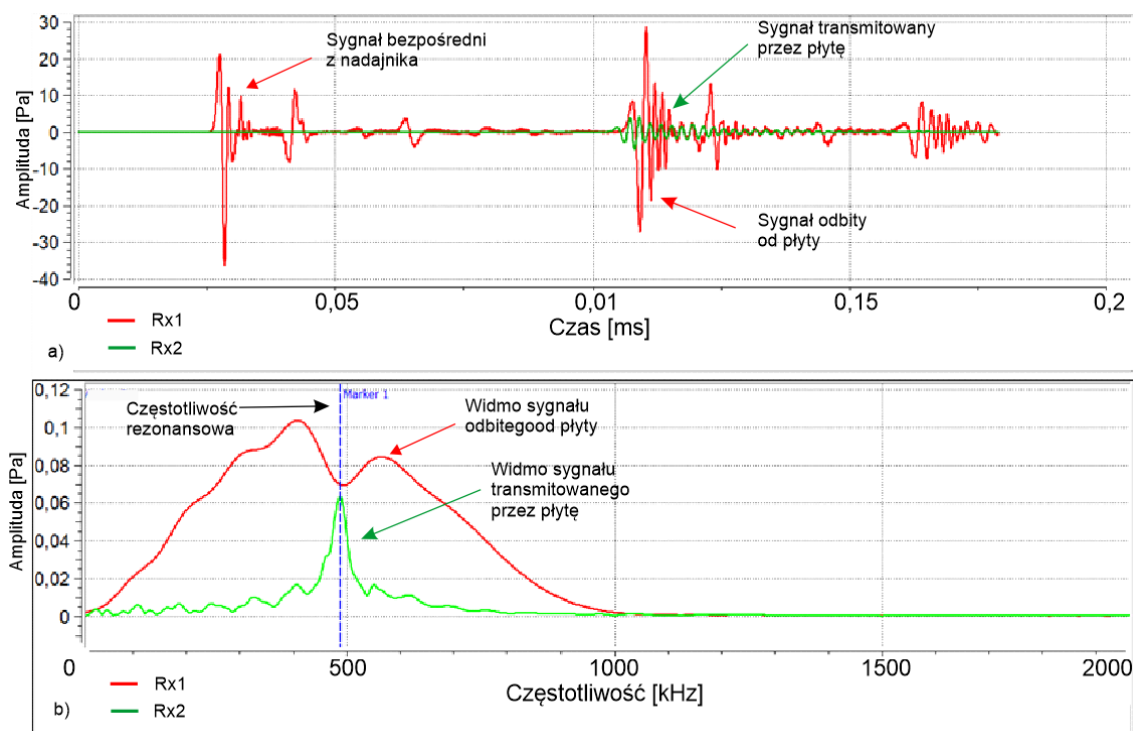


Rysunek 7.1 Model symulacyjny wykonany w programie OnScaleTM przedstawiający dwuwymiarowy zbiornik wypełniony wodą, w którym umieszczono głowicę pomiarową z nadajnikiem ultradźwiękowym Tx i stalową płytę o grubości d oraz Rx_1 – odbiornik sygnału odbitego od płyty stalowej i Rx_2 – odbiornik sygnału transmitowanego przez płytę

Tabela 7.1 Właściwości materiałów w badaniach symulacyjnych

Lp.	Materiał	Prędkość fali podłużnej	Gęstość	Tłumienie
		[m/s]	[kg/m ³]	[dB/MHz/cm]
1	Obudowa	1750	5710	290
2	Stal	5900	7900	0,3
3	Woda	1496	1000	0,002

Symulacje polegały na generowaniu krótkiego sygnału sinusoidalnego, trwającego 2 μ s, o częstotliwości 500 kHz. Następnie analizie częstotliwościowej poddany został sygnał odbity od metalowej płyty oraz sygnał przechodzący przez płytę. Charakterystyki częstotliwościowe zarejestrowanych sygnałów pozwoliły na wyznaczenie lokalnych ekstremów odpowiadających częstotliwościom rezonansowym płyty o zadanych grubościach (Rysunek 7.2.).



Rysunek 7.2 Przykładowy zarejestrowany sygnał odbity od metalowej płyty o grubości 6 mm (kolor czerwony) oraz sygnał transmitowany przez płytę (kolor zielony) – a) i jego widmo częstotliwościowe – b)

W wyniku przeprowadzonych symulacji otrzymano wartości trzech pierwszych częstotliwości rezonansowych dla badanych płyt, które zostały porównane z wartościami teoretycznymi obliczonymi na podstawie wzoru 4.3. Wartości te są zestawione w tabeli 7.2.

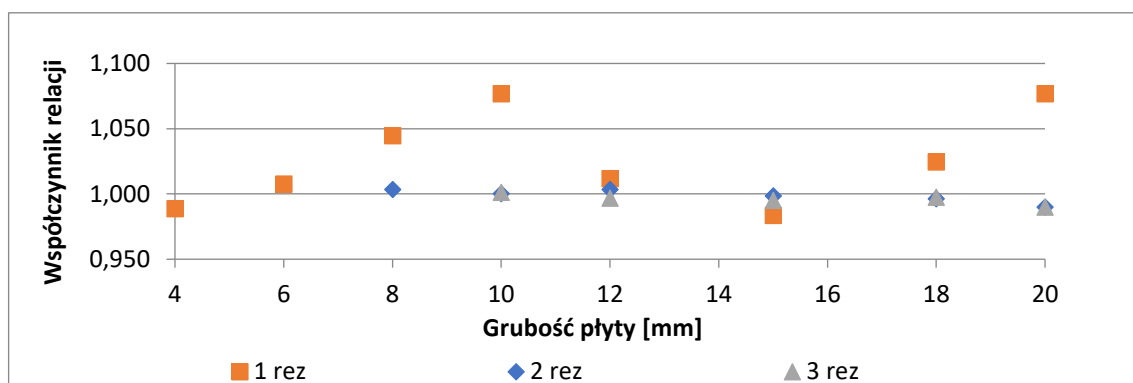
Tabela 7.2 Częstotliwości rezonansowe określone na podstawie przeprowadzonych symulacji oraz częstotliwości rezonansowe teoretycznie obliczone dla płyty stalowej o różnej grubości i współczynnik relacji między tymi wartościami (Kubacka i Nguyen, 2024)

Grubość płyty	Symulacyjne częstotliwość			Obliczona częstotliwość			Współczynnik relacji		
	1 rez	2 rez	3 rez	1 rez	2 rez	3 rez	1 rez	2 rez	3 rez
[mm]	[kHz]	[kHz]	[kHz]	[kHz]	[kHz]	[kHz]			
20	137	298	447	147,50	295,00	442,50	1,077	0,990	0,990
18	160	329	493	163,89	327,78	491,67	1,024	0,996	0,997
15	200	394	593	196,67	393,33	590,00	0,983	0,998	0,995
12	243	490	740	245,83	491,67	737,50	1,012	1,003	0,997
10	274	590	884	295,00	590,00	885,00	1,077	1,000	1,001
8	353	735	bd	368,75	737,50	bd	1,045	1,003	bd
6	488	bd	bd	491,67	bd	bd	1,008	bd	bd
4	746	bd	bd	737,50	bd	bd	0,989	bd	bd

bd – brak danych

Zaobserwowano, że istnieją różnice między poszczególnymi częstotliwościami rezonansowymi wyznaczonymi z symulacji a teoretycznie obliczonymi. W związku z tym określony został tzw. współczynnik relacji definiowany jako iloraz

częstotliwości rezonansowej obliczonej do częstotliwości rezonansowej otrzymanej z symulacji dla danej grubości płyty. Rysunek 7.3. przedstawia fluktuację wartości współczynnika relacji przy różnych częstotliwościach rezonansowych w zależności od grubości stalowej płyty. Fluktuacja ta jest największa przy pierwszych częstotliwościach rezonansowych, natomiast przy drugich i trzecich częstotliwościach rezonansowych współczynniki te są bardzo bliskie jedynki.

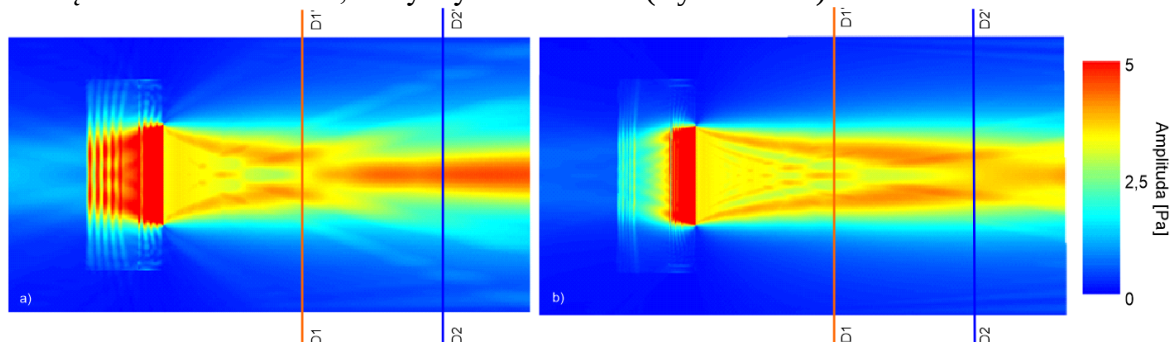


Rysunek 7.3 Wartości współczynnika relacji dla płyt stalowych o różnych grubościach dla pierwszej, drugiej i trzeciej częstotliwości rezonansowej

7.2 Badania symulacyjne szerokości wiązki ultradźwiękowej

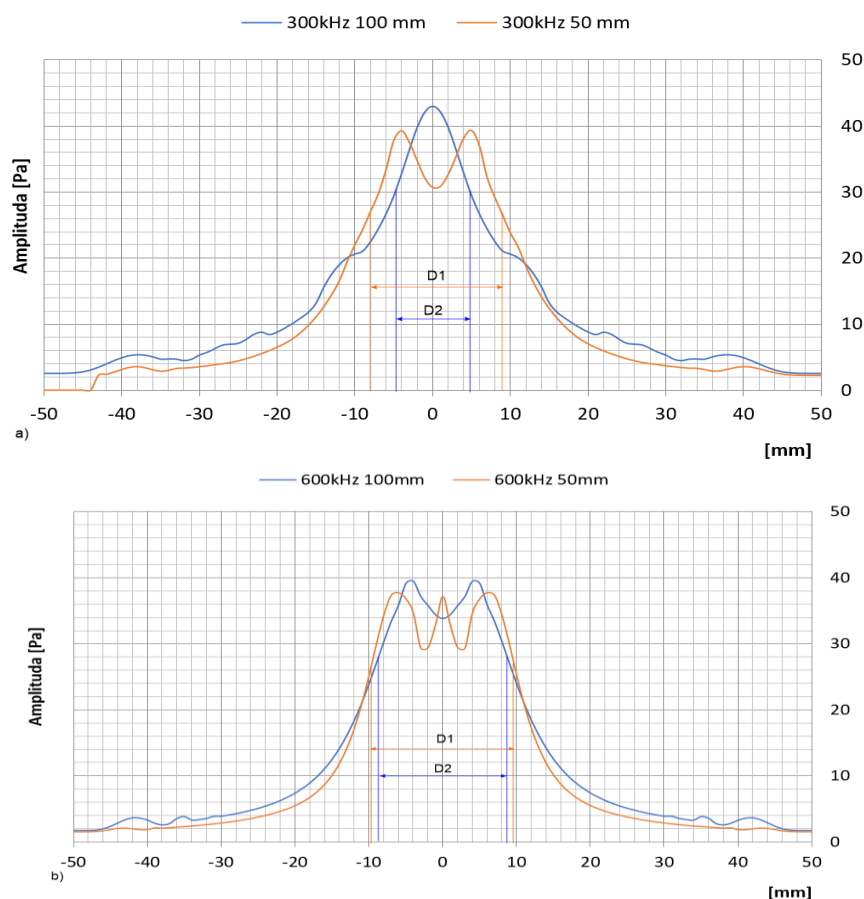
Umieszczenie urządzenia pomiarowego w wewnętrznej przestrzeni rury powoduje, że podczas wykonywania pomiarów odległość głowicy pomiarowej od wewnętrznej ściany rury może być różna. Położenia i rozmiary przetwornika ultradźwiękowego oraz generowana częstotliwość sygnału skutkują tym, że odbite sygnały od wewnętrznej ściany rury mogą się znajdować w polu bliskim lub w polu dalekim wiązki ultradźwiękowej, co wpływa na rozdzielczość poziomą przy pomiarach grubości płyty metodą ultradźwiękową.

Korzystając z modelu przedstawionego na rysunku 7.1. przy braku metalowej płyty - przeprowadzono symulacje sygnałów nadawczych o częstotliwości 300 i 600 kHz, w wyniku czego otrzymano rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego dla całego modelu (Rysunek 7.4). Dla przetwornika ultradźwiękowego o wysokości 32 mm przy częstotliwości sygnału nadawczego 300 kHz teoretyczny zasięg pola bliskiego wynosi 51 mm i jest on dwukrotnie mniejszy niż w przypadku sygnału nadawczego o częstotliwości 600 kHz, który wynosi 102 mm (Rysunek 7.4).



Rysunek 7.4 Rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego dla symulowanego modelu z zaznaczonymi przekrojami: D1-D1' odległość 50 mm od czoła głowicy pomiarowej; D2-D2' odległość 100 mm od czoła głowicy pomiarowej; a) sygnał o częstotliwości 300 kHz, b) sygnał o częstotliwości 600 kHz

W celu określenia szerokości wiązki ultradźwiękowej wykonano przekroje rozkładu ciśnienia akustycznego w dwóch płaszczyznach w odległości 50 mm i 100 mm od czoła głowicy pomiarowej dla każdej z generowanych częstotliwości. Szerokość wiązki określona została na poziomie 70% wartości amplitudy zarejestrowanego sygnału. Przekroje te są przedstawione na rysunku 7.5.



Rysunek 7.5 Rozkład ciśnienia względem osi wiązki fali ultradźwiękowej w odległości 50 mm (D1) i 100 mm (D2) od czoła głowicy pomiarowej dla częstotliwości nadajnika a) 300 kHz b) 600 kHz

Przy wysokości przetwornika ultradźwiękowego wynoszącej 32 mm dla sygnału nadawczego o częstotliwości 300 kHz szerokość wiązki w odległości 50 mm od nadajnika wynosi 16 mm, a w odległości 100 mm szerokość ta jest znacznie mniejsza i wynosi 10 mm. Dla sygnału nadawczego o częstotliwości 600 kHz kształt wiązki w odległości 50 mm od nadajnika jest zbliżony do kształtu sygnału o częstotliwości 300 kHz i jej szerokość wynosi 16,5 mm, natomiast w odległości 100 mm wynosi 20 mm. (Tabela 7.3.).

Tabela 7.3 Zasięg pola bliskiego i rozmiary szerokości wiązki ultradźwiękowej w odległości 50 mm i 100 mm od czoła głowicy pomiarowej dla częstotliwości nadajnika 300 kHz i 600 kHz.

Lp.	Częstotliwość nadawania	Zasięg pola bliskiego	Szerokość wiązki w odległości 50 mm	Szerokość wiązki w odległości 100 mm
	[kHz]	[mm]	[mm]	[mm]
1	300	51	16	10
2	600	102	16,5	20

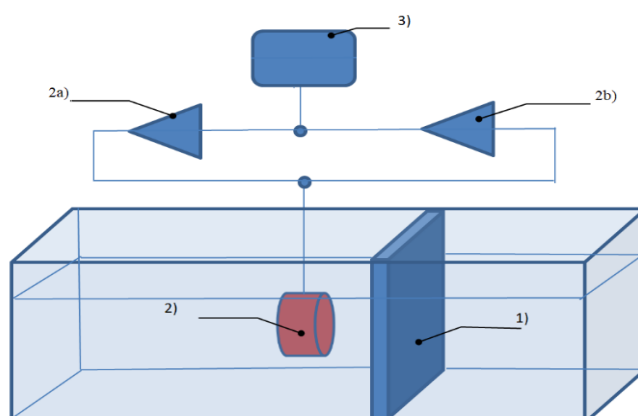
W praktyce nadajnik ultradźwiękowy zwykle ma powierzchnię kołową, w związku z tym generowana wiązka ultradźwiękowa również ma czoło kołowe, którego powierzchnia P może być obliczona na podstawie szerokości wiązki D ze wzoru $P = \pi D^2/4$.

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że dla zastosowanego przetwornika emitującego sygnał o częstotliwości 300 kHz generowana wiązka obejmuje powierzchnię 201 mm² w odległości 50 mm oraz 79 mm² w odległości 100 mm od czoła przetwornika. Dla częstotliwości nadawania 600 kHz wartości wynoszą odpowiednio 214 oraz 314 mm².

7.3 Laboratoryjne pomiary grubości płyt stalowych

Należy podkreślić, że grubość ściany rury, zapuszczona do otworu, nie jest taka sama we wszystkich miejscach. W związku z tym, w celu dobrania odpowiednich częstotliwości fali ultradźwiękowej do pomiaru geometrii kawerny niezbędna jest znajomość grubości ścianki rury.

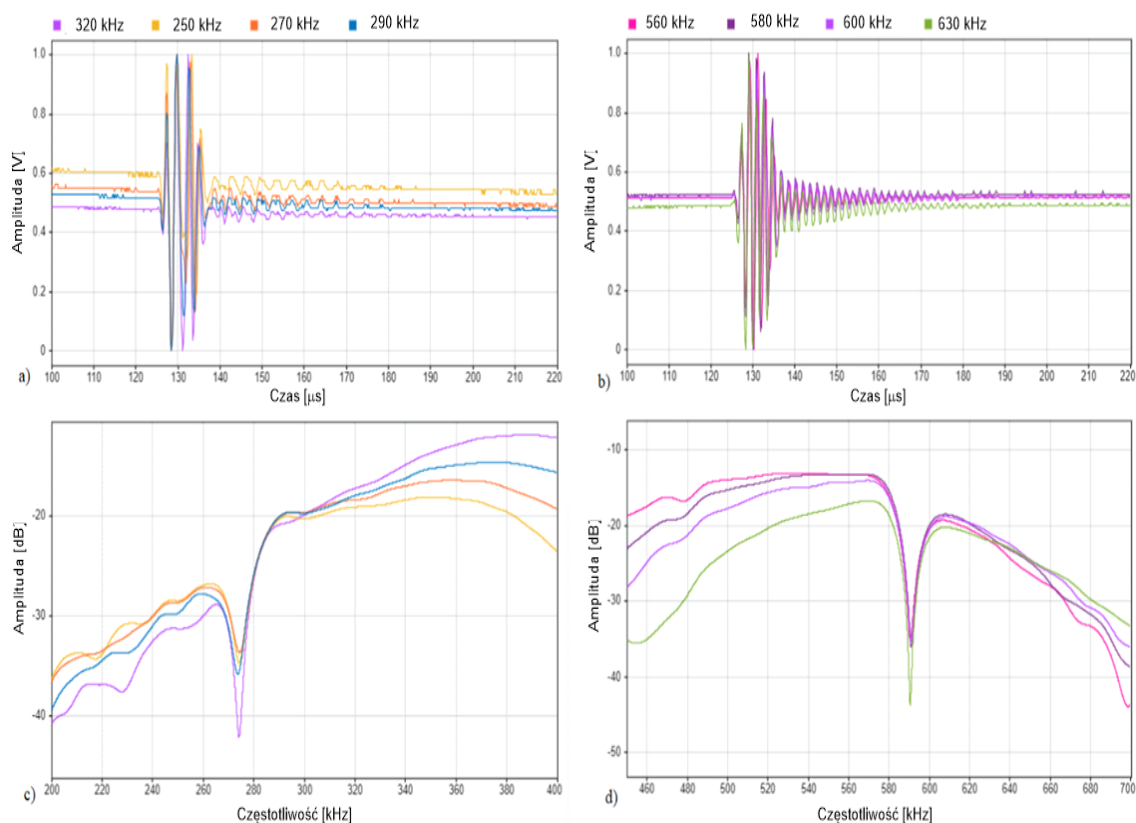
Pomiary grubości stalowych płyt z użyciem fal ultradźwiękowych o częstotliwościach rezonansowych przeprowadzono w specjalnie skonstruowanym zbiorniku wypełnionym wodą o wymiarach 800 x 600 x 500 mm. W centralnej części zbiornika umieszczono głowicę pomiarową o średnicy 32 i grubości 32 mm, składającą się z przetwornika ultradźwiękowego pełniącego rolę zarówno nadajnika i odbiornika fal ultradźwiękowych (Rysunek 7.6). W odległości 100 mm od głowicy pomiarowej umieszczono płytę stalową o szerokości 400 i wysokości 500 mm z kolejnymi grubościami: 6,2; 8,1; 10,1; 11,8 oraz 15,1 mm. Grubości płyt zostały zmierzone za pomocą grubościomierza cyfrowego Yato YT-72093, którego dokładność pomiarowa podana przez producenta wynosiła 0,03 mm, a pole powierzchni końcówki pomiarowej grubościomierza wynosiło ok. 3 mm². Z nadajnika generowano sygnał ultradźwiękowy z czasem trwania 5 μs, o częstotliwości zmiennej w przedziale od $f_r - 100$ kHz do $f_r + 100$ kHz z krokiem co 10 kHz, gdzie f_r to teoretyczna częstotliwość rezonansowa dla danej grubości płyty. Sygnał nadawany po odbiciu od płyty był rejestrowany przez odbiornik przy użyciu oscyloskopu PicoScope 2000™.



Rysunek 7.6 Stanowisko laboratoryjne do pomiaru grubości płyt stalowych metodą ultradźwiękową. Zbiornik wypełniony wodą, w której umieszczono: 1) płytę stalową oraz 2) głowicę pomiarową wraz ze wzmacniaczem sygnału nadawczego 2a) oraz wzmacniaczem sygnału odbiorczego 2b), podłączone do 3) oscyloskopu i generatora sygnału

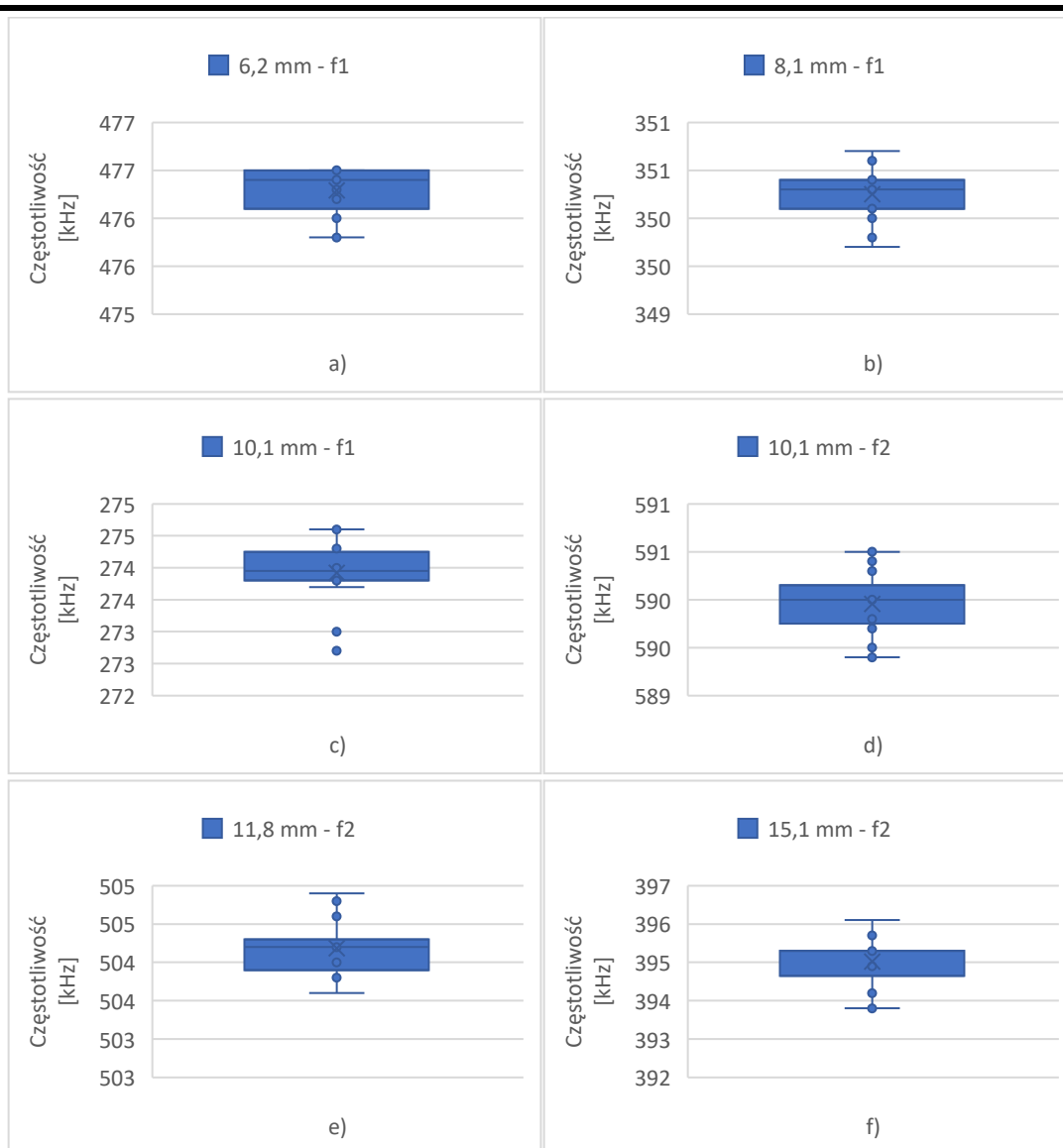
Dla każdej z badanych płyt zarejestrowano po 21 przebiegów, które poddane zostały analizie w programie Matlab™.

Częstotliwości rezonansowe w otrzymanych widmach częstotliwościowych sygnałów odbitych były określone w miejscach, gdzie występowały lokalne minima. Na rysunku 7.7 przedstawiono sygnały odbite od płyty stalowej o grubości 10,1 mm dla sygnałów nadawczych o różnych częstotliwościach oraz ich widma częstotliwościowe.



Rysunek 7.7 Rejestrowane przebiegi sygnałów odbitych od stalowej płyty o grubości 10,1 mm; a) dla sygnału nadawczego o częstotliwościach 270 - 320 kHz oraz b) dla sygnału nadawczego o częstotliwościach 560 - 630 kHz, c) widma częstotliwościowe sygnałów odbitych o częstotliwościach 270 - 320 kHz; d) widma częstotliwościowe sygnałów odbitych o częstotliwościach 560 - 630 kHz

Na wszystkich widmach częstotliwościowych przy płytach o grubościach 6,2 i 8,1 mm tylko pierwsza częstotliwość rezonansowa (f_1) była obserwowana, przy płytach o grubościach 11,8 mm oraz 15,1 mm tylko druga częstotliwość rezonansowa (f_2). Natomiast przy płycie o grubości 10,1 mm rejestrowano zarówno pierwszą jak i drugą częstotliwość rezonansową. Wartości częstotliwości rezonansowych z przedziałami zmienności dla płyt stalowych z różną grubością są przedstawione na rysunku 7.8.



Rysunek 7.8 Wartości dla pierwszych a) b) c) i drugich d) e) f) częstotliwości rezonansowych z przedziałami zmienności dla płyt stalowych o różnej grubości

Z analizy powyższych rysunków można stwierdzić, że różnice wyznaczonych częstotliwości rezonansowych dla płyty stalowej o danej grubości nie przekraczają kilku kHz. Wynika z tego, że stosowanie sygnałów nadawczych o częstotliwościach w przedziale $f_r - 100$ kHz do $f_r + 100$ kHz umożliwia wyznaczanie bardziej dokładnych wartości częstotliwości rezonansowej dla stalowej płyty o danej grubości niż stosując sygnały nadawcze o większym zakresie częstotliwości (Kubacka i Nguyen, 2024)

Na podstawie znanej prędkości fali ultradźwiękowej w stali 5960 m/s i wyznaczonych częstotliwości rezonansowych można obliczyć grubość płyt dwoma sposobami:

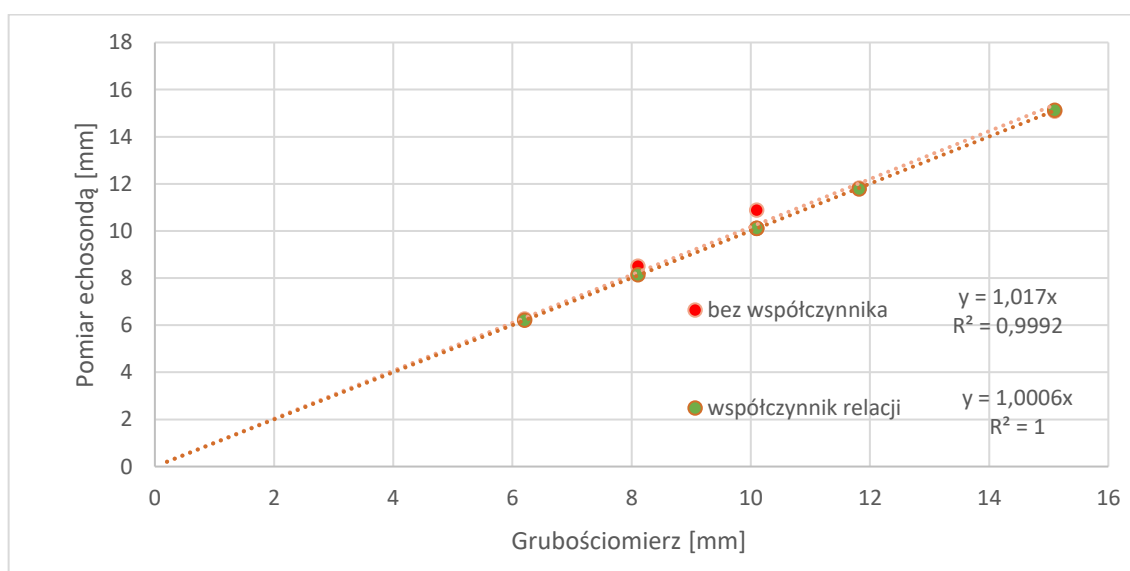
- przy zastosowaniu średniej częstotliwości rezonansowej,
- przy zastosowaniu średniej częstotliwości rezonansowej z wykorzystaniem odpowiedniego współczynnika relacji (Tabela 7.2).

Grubości stalowych płyt zmierzone cyfrowym mikrometrem oraz grubości obliczone w/w sposobami i ich różnice są zestawione w tabeli 7.4.

Tabela 7.4 Grubości płyt stalowych zmierzone grubościomierzem oraz metodą ultradźwiękową

Opis	Jednostka	Wartości					
Grubości płyty mierzone grubościomierzem	[mm]	6,20	8,10	10,10	10,10	11,81	15,10
		częstotliwość I rezonansu			częstotliwość II rezonansu		
Średnia częstotliwość rezonansowa	[kHz]	476,3	350,0	273,9	589,9	504,2	395,0
Grubość płyty obliczona wzorem	[mm]	6,26	8,51	10,88	10,10	11,82	15,09
Różnica od grubości płyt zmierzonych grubościomierzem	[mm]	0,06	0,41	0,77	0	0,01	-0,01
Grubość obliczona z wykorzystaniem współczynnika relacji	[mm]	6,21	8,14	10,10	10,10	11,79	15,12
Różnica od grubości płyt zmierzonych grubościomierzem	[mm]	0,01	0,04	0	0	-0,02	0,02

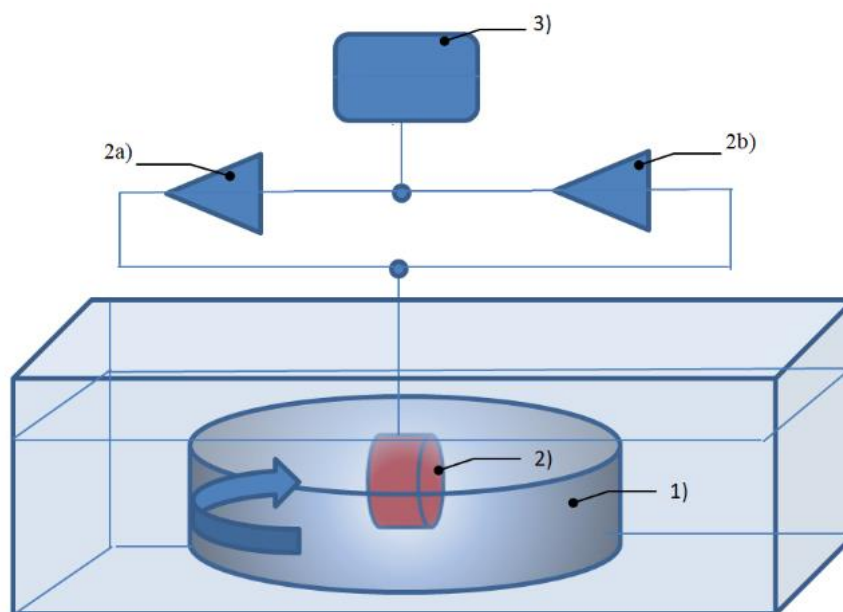
Na rysunku 7.9 przedstawiono relację między grubościami płyt zmierzonymi za pomocą grubościomierza cyfrowego a grubościami płyt obliczonymi z wykorzystaniem częstotliwości rezonansowych oraz z wykorzystaniem odpowiednich współczynników relacji. Wynika z tego, że grubości obliczone z wykorzystaniem częstotliwości rezonansowych i zastosowanie współczynników relacji są zgodne z grubościami płyt zmierzonymi cyfrowym grubościomierzem.



Rysunek 7.9 Relacja między grubościami płyt zmierzonymi za pomocą grubościomierza cyfrowego a grubościami płyt obliczonymi z wykorzystaniem częstotliwości rezonansowych oraz odpowiednich współczynników relacji

7.4. Pomiary laboratoryjne grubości rur

W pomiarach laboratoryjnych wykorzystano odcinek rury o wysokości 100 mm zanurzony w wodnym zbiorniku o wymiarach 800 x 600 x 500 mm (Rysunek 7.10). W środku rury umieszczono głowicę pomiarową, która składała się z nadajnika i odbiornika fal ultradźwiękowych. Odcinek rury umieszczony został na specjalnej płycie, która mogła wykonywać obrót rury wokół osi pionowej. Dzięki temu możliwy był pomiar grubości rury na całym obwodzie na zadanej wysokości przy nieruchomej głowicy.



Rysunek 7.10 Stanowisko laboratoryjne do pomiaru grubości rury stalowej, w skład którego wchodzi 1) badana rura, 2) głowica pomiarowa wraz ze wzmacniaczem sygnału nadawczego, 2a) oraz wzmacniaczem sygnału odbiorczego, 2b), podłączone do 3) oscyloskopu i generatora sygnału

Pomiary grubości ścianki rur przeprowadzono dla dwóch rur stalowych o średnicy nominalnej 219 mm i grubości 10 mm i rury stalowej o średnicy nominalnej 127 mm i grubości 5,5 mm oraz dla jednej rury z włókna szklanego o nominalnej średnicy 219 mm i grubości 10 mm.

W pierwszej kolejności określona została prędkość fal ultradźwiękowych w badanej rurze. Korzystając ze stanowiska pomiarowego z Rysunku 6.50 za pomocą nadajnika generowano sygnał nadawczy o częstotliwości zbliżonej do teoretycznej częstotliwości rezonansowej dla kilku losowo wybranych punktów dla badanej rury, dla których wcześniej określono grubość przy użyciu grubościomierza cyfrowego. Odbiornikiem umieszczonym za rurą rejestrowano sygnał transmitowany i określono częstotliwość tego sygnału. Przy użyciu częstotliwości sygnału transmitowanego i odpowiedniego współczynnika relacji określono średnią prędkość fali ultradźwiękowej w stali badanej rury. Dla rury stalowej oraz rury wykonanej z włókna szklanego o średnicy nominalnej 219 mm zastosowano częstotliwości w obrębie drugiej rezonansowej i współczynnik relacji równy 1. Dla stalowej rury 127 mm wykorzystano pierwszą rezonansową i współczynnik relacji równy 1,008.

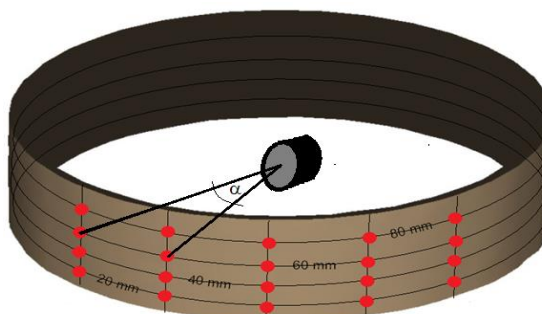
Tabela 7.5 Zmierzone grubości ścianki, częstotliwości rezonansowe, obliczone prędkości i średnia prędkość fali ultradźwiękowej badanych rur

Średnica nominalna rury/materiał	Zmierzona grubość ścianki	Częstotliwość	Obliczona prędkość	Średnia prędkość	Odchylenie standardowe	Odchylenie względne
[mm]	[mm]	[kHz]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]
219 / stal ²⁾	9,55	653,4	6240	6240	44,4	0,7
	9,79	637,5	6241			
	10,01	628,6	6292			
	9,85	635,1	6256			
	9,45	652,9	6170			
127 / stal ¹⁾	5,69	519	5953	5960	13,9	0,23
	5,93	499	5965			
	5,97	494,8	5955			
	5,93	500,3	5981			
	6,05	487,4	5945			
219 / włókno szklane ²⁾	9,17	341	3127	3100	30,6	0,99
	8,87	350	3105			
	8,59	363	3118			
	8,52	364	3101			
	8,76	348	3048			

¹⁾ pierwsza częstotliwość rezonansowa; ²⁾ druga częstotliwość rezonansowa

Dla rury stalowej o nominalnej średnicy 127 mm średnia prędkość fali ultradźwiękowej wynosiła $5960 \pm 13,9$ m/s, dla rury stalowej o nominalnej średnicy 219 mm prędkość fali ultradźwiękowej wynosiła $6240 \pm 44,4$ m/s, natomiast dla rury z włókna szklanego prędkość wyznaczono na poziomie $3100 \pm 30,6$ m/s (Tabela 7.5). Z analizy statystycznej różnicy w prędkościach rozchodzenia fali w dwóch rurach stalowych o średnicy 127 mm i 219 mm wynika, że te dwie stalowe rury mogły być wykonane z różnych gatunków stali. Względne odchylenie jest największe dla rury z włókna szklanego, co może wynikać z mniejszych wartości mierzonej prędkości rozchodzenia fali.

Pomiary grubości ścianki rury były wykonywane dla obwodu na jednej wysokości z krokiem kątowym $\alpha = 5,5^\circ \pm 1^\circ$ (Rysunek 7.11). Dodatkowo dla rury stalowej o średnicy 219 mm wykonano pomiary grubości ścianki rury dla czterech obwodów na różnych wysokościach.

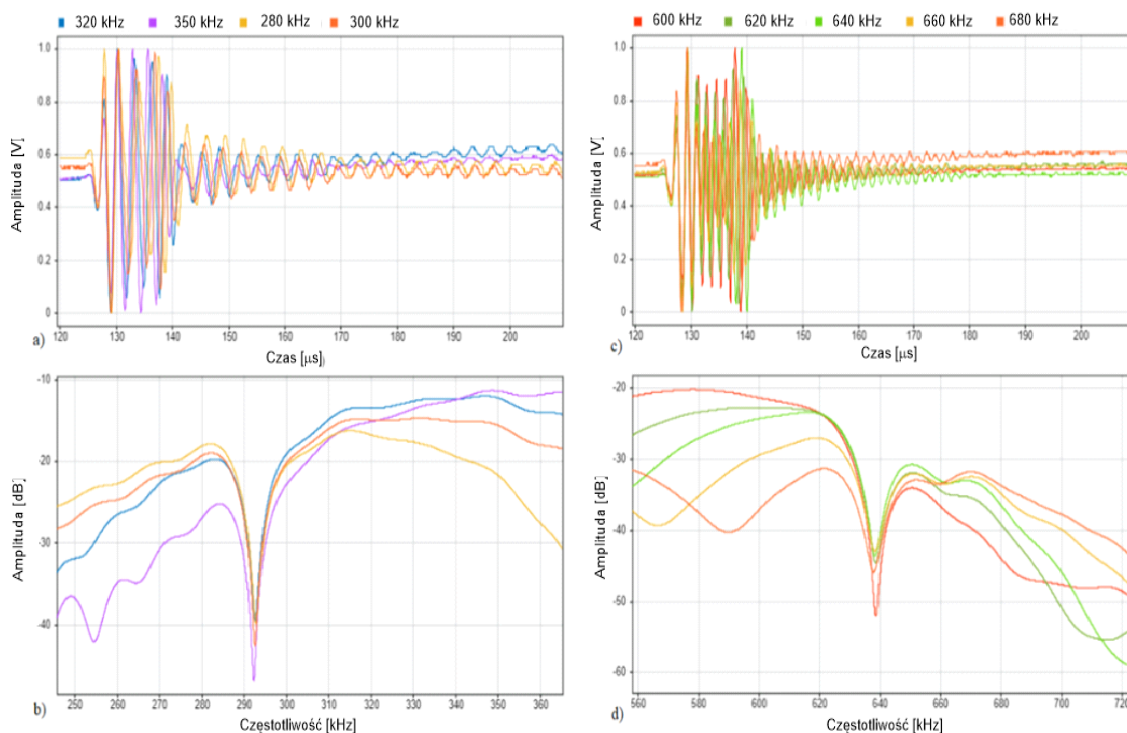


Rysunek 7.11 Pomiar grubości ścianki rury metodą ultradźwiękową

Na podstawie wyników pomiarów sporządzono wykresy grubości ścianki badanej rury na danym poziomie. Wyniki grubości ścianki rur otrzymanych ze wszystkich

pomiarów metodą ultradźwiękową zostały porównywane z grubościami rur zmierzonymi za pomocą grubościomierza cyfrowego Yato YT-72093™.

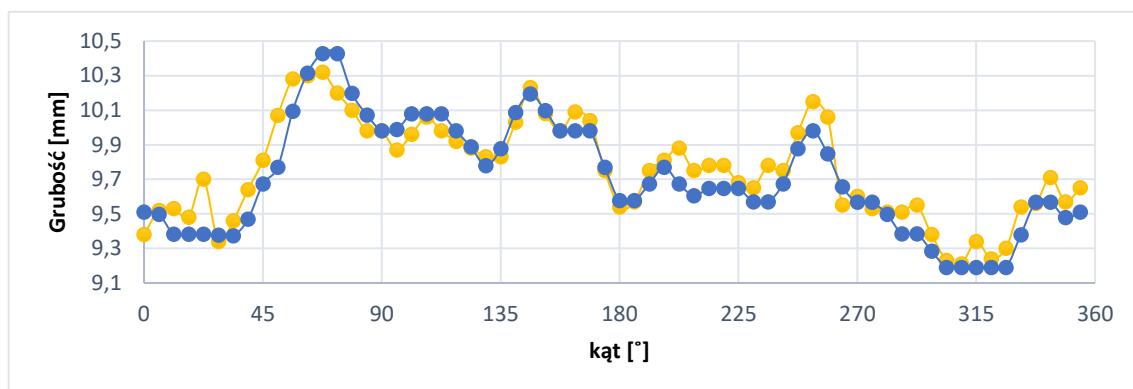
Pomiary grubości ścianki rur wykonywane były w oparciu o identyfikację częstotliwości rezonansowych sygnału odbitego od wewnętrznej ścianki rury według metodyki opisanej w Rozdziale 6.9. Z widma częstotliwościowego sygnału odbitego odczytywano częstotliwość rezonansową dla danego punktu pomiarowego, przy której występowało lokalne minimum (Rysunek 7.12). Wartości częstotliwości rezonansowej oraz współczynnika relacji służyły następnie do obliczenia grubości rury w danym punkcie pomiarowym.



Rysunek 7.12 Rejestrowane przebiegi sygnałów odbitych od ścianki rury stalowej o nominalnych rozmiarach 219 mm i grubości 10 mm a) dla sygnału nadawczego o częstotliwościach 280 - 350 kHz oraz b) dla sygnału nadawczego o częstotliwościach 600 - 680 kHz; c) widmami częstotliwościowymi sygnałów o częstotliwościach 280 - 350 kHz; d) widmami częstotliwościowymi sygnałów o częstotliwościach 600 - 680 kHz

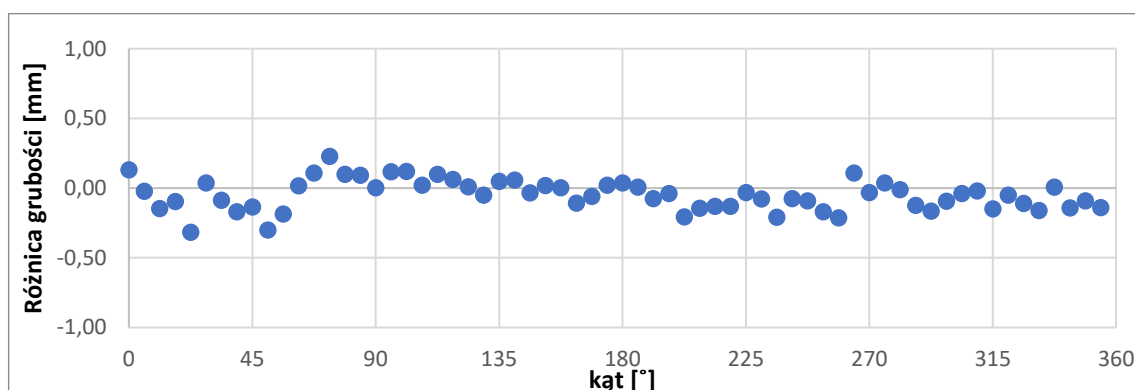
W pierwszej kolejności wykonano pomiary grubości ścianki rury stalowej o średnicy 219 mm. Pomiary były wykonane dla 65 punktów jednakowo oddalonych od siebie na obwodzie poziomym na wysokości 60 mm od podstawy rury (Rysunek 7.11). Pomiary były wykonane przy sygnale ultradźwiękowym nadawczym o częstotliwości 300 oraz 600 kHz. Częstotliwości te są zbliżone do pierwszej oraz drugiej częstotliwości rezonansowej dla grubości rury na punktach pomiarowych. Grubości ścianki rury na punktach pomiarowych zostały oszacowane w oparciu o prędkość fali ultradźwiękowej w badanej rurze i częstotliwości rezonansowe określone w widmie częstotliwościowym sygnałów odbitych. Dla pierwszej częstotliwości rezonansowej zastosowano współczynnik relacji wynoszący 1,077 natomiast dla drugiej częstotliwości rezonansowej przyjęto współczynnik relacji 1,0 (patrz Tabela 7.2). Rysunek 7.13 przedstawia grubości ścianki stalowej rury o nominalnej średnicy 219 mm i grubości 10 mm w punktach pomiarowych obliczone na bazie wartości pierwszej częstotliwości rezonansowej i współczynnika relacji (niebieskie punkty)

oraz grubości rury w tych samych punktach zmierzone grubościomierzem cyfrowym (żółte punkty)



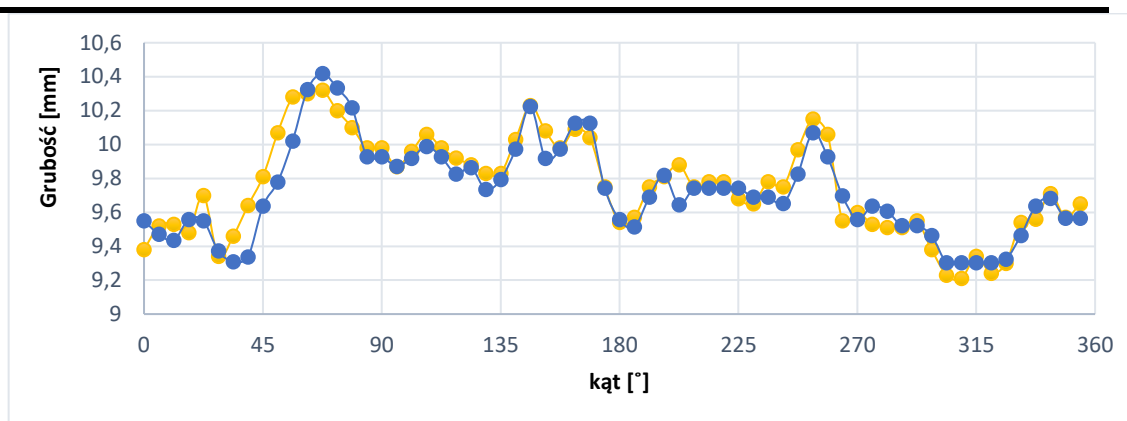
Rysunek 7.13 Grubości ścianki stalowej rury o średnicy 219 mm i nominalnej grubości 10 mm w punktach pomiarowych obliczone na bazie wartości pierwszej częstotliwości rezonansowej i odpowiedniego współczynnika relacji (niebieskie) oraz grubości rury w tych samych punktach zmierzone grubościomierzem cyfrowym (żółte)

Różnice między grubościami rury zmierzonymi za pomocą grubościomierza cyfrowego a grubościami rury określoną techniką ultradźwiękową przy pierwszej częstotliwości rezonansowej na wszystkich punktach przedstawiono na rysunku 7.14. Różnice te wahały się w przedziale od -0,32 do 0,23 mm ze średnią wartością - 0,05 mm.



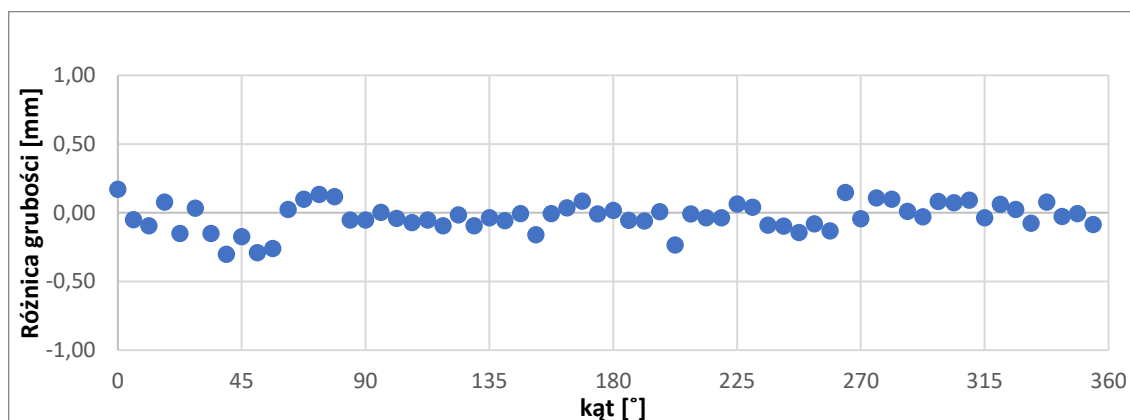
Rysunek 7.14 Różnice między grubościami rury zmierzonymi za pomocą grubościomierza cyfrowego a grubościami rury określoną techniką ultradźwiękową przy pierwszej częstotliwości rezonansowej dla wszystkich punktów pomiarowych

Na rysunku 7.15 przedstawiono grubości ścianki stalowej tej samej rury stalowej dla tych samych punktów pomiarowych obliczone na bazie wartości drugiej częstotliwości rezonansowej i współczynnika relacji (niebieskie punkty) oraz grubości rury w tych samych punktach zmierzone grubościomierzem cyfrowym (żółte punkty).



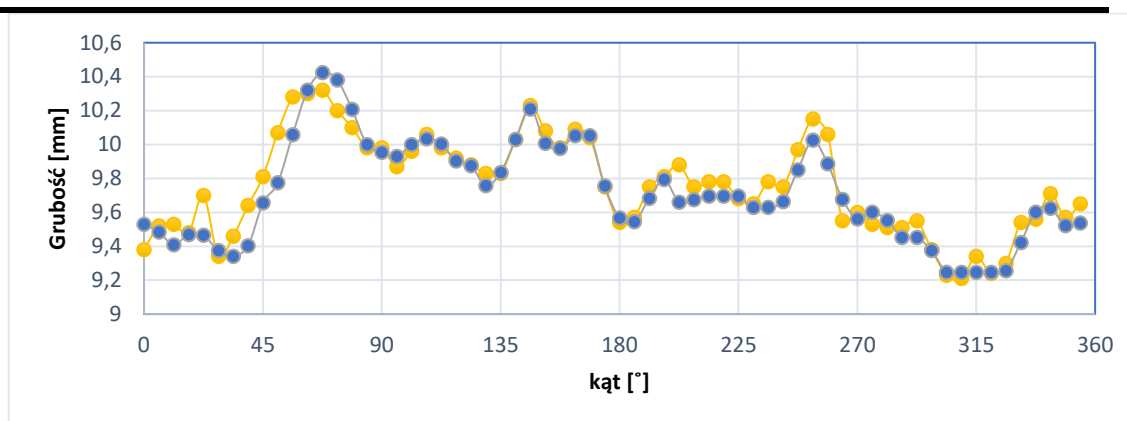
Rysunek 7.15 Grubości ścianki stalowej rury o średnicy 219 mm i nominalnej grubości 10 mm w punktach pomiarowych obliczone na bazie wartości drugiej częstotliwości rezonansowej i odpowiedniego współczynnika relacji (niebieskie) oraz grubości rury w tych samych punktach zmierzone grubościomierzem cyfrowym (żółte)

Różnice między grubościami tych samych punktów ścianki rury o średnicy 219 mm i nominalnej grubości 10 mm zmierzonymi grubościomierzem cyfrowym a grubościami rury określonymi metodą ultradźwiękową przy drugiej częstotliwości rezonansowej i odpowiedniego współczynnika relacji są pokazane na rysunku 7.16. Różnice te wahały się w przedziale od -0,30 do 0,17 mm ze średnią wartością -0,03 mm.



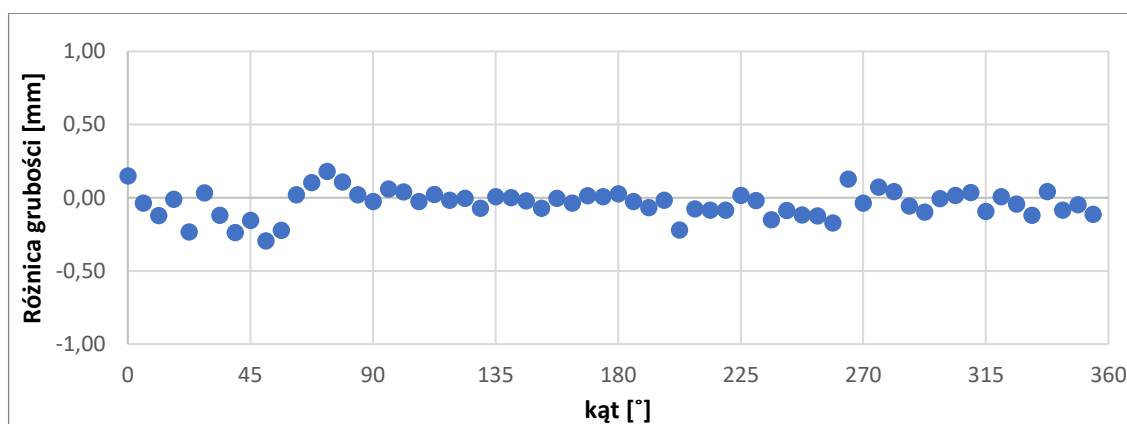
Rysunek 7.16 Różnice między grubościami rury zmierzonymi za pomocą grubościomierza cyfrowego a grubościami rury określoną techniką ultradźwiękową przy drugiej częstotliwości rezonansowej dla wszystkich punktów pomiarowych

Rysunek 7.17 prezentuje grubości ścianki rury stalowej w punktach pomiarowych uśrednionych z grubości otrzymanych przy pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej z uwzględnieniem współczynników relacji (punkty niebieskie) wraz z grubościami ścianki rury w tych samych punktach pomiarowych otrzymanymi za pomocą grubościomierza cyfrowego (punkty żółte).



Rysunek 7.17 Grubości na pomiarowych punktach ścianki stalowej rury o średnicy 219 mm i nominalnej grubości 10 mm uśrednionych z grubości otrzymanych przy pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej z ich współczynnikami relacji (niebieskie) wraz z grubościami ścianki rury w tych samych punktach pomiarowych otrzymanymi za pomocą grubościomierza cyfrowego (żółte)

Różnice między grubościami na pomiarowych punktach ścianki rury stalowej o rozmiarach nominalnych średnicy 219 mm i grubości 10 mm zmierzonymi grubościomierzem cyfrowym a grubościami rury uśrednionymi z wyników otrzymanych dla pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej przedstawione zostały na rysunku 7.18. Różnice te wahały się w przedziale od -0,30 do 0,18 mm ze średnią wartością -0,04 mm.

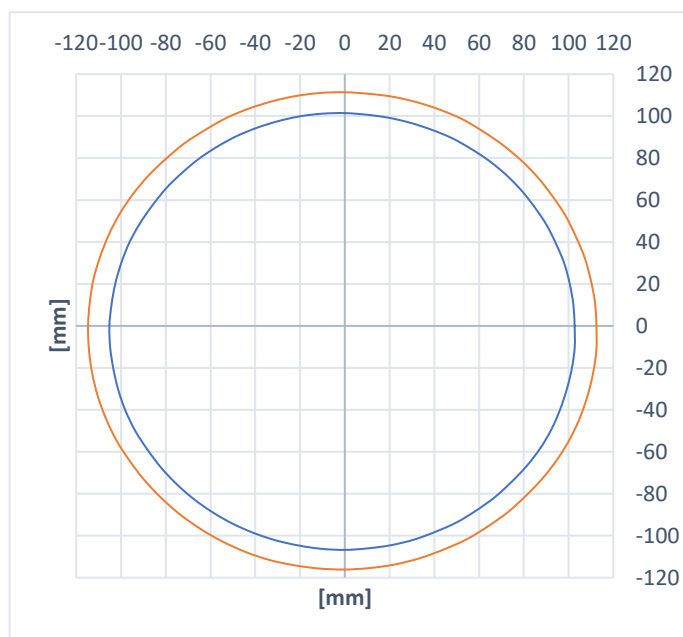


Rysunek 7.18 Różnice między grubościami rury zmierzonymi za pomocą grubościomierza cyfrowego a grubościami rury określoną techniką ultradźwiękową dla uśrednionych wyników otrzymanych przy pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej dla wszystkich punktów pomiarowych

Ogólnie można stwierdzić, że grubości ściany rury stalowej określone metodą częstotliwości rezonansowej są zgodne z grubościami zmierzonymi elektronicznym grubościomierzem cyfrowym. Jednak grubości ścianki rury otrzymane przy drugiej częstotliwości rezonansowej są bliższe grubości mierzonych elektronicznym grubościomierzem niż te otrzymane przy pierwszej częstotliwości rezonansowej. Różnice grubości w 50% wyników pomiarów zawierają się w przedziale od -0,08 mm do 0,04 mm przy drugiej częstotliwości rezonansowej, a przy pierwszej częstotliwości te różnice wynoszą od -0,14 mm do 0,02 mm. Natomiast różnice między grubościami uśrednionymi z otrzymanych grubości przy pierwszej i drugiej częstotliwości

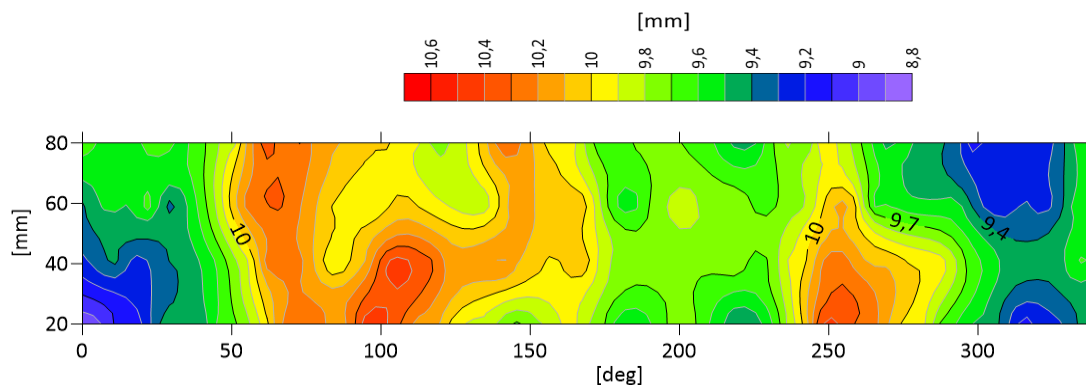
rezonansowej z grubościami mierzonymi elektronicznym mikromierzem cyfrowym są najmniejsze i wynoszą od - 0,09 mm do 0,02 mm.

Na podstawie czasów przyścia echa odbitego od wewnętrznej ściany badanej rury, które były jednocześnie rejestrowane przy pomiarze grubości rury stalowej metodą ultradźwiękową oraz znanej prędkości fali ultradźwiękowej w wodzie zostały również obliczone odległości głowicy ultradźwiękowej od wewnętrznej ścianki rury. Z otrzymanych danych oraz pomiarów grubości średnich dla pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej wykreślono przekrój rury stalowej na wysokości 60 mm od jej podstawy (Rysunek 7.19). Linia niebieska wyznacza wewnętrzną krawędź rury, natomiast linia pomarańczowa krawędź zewnętrzną.

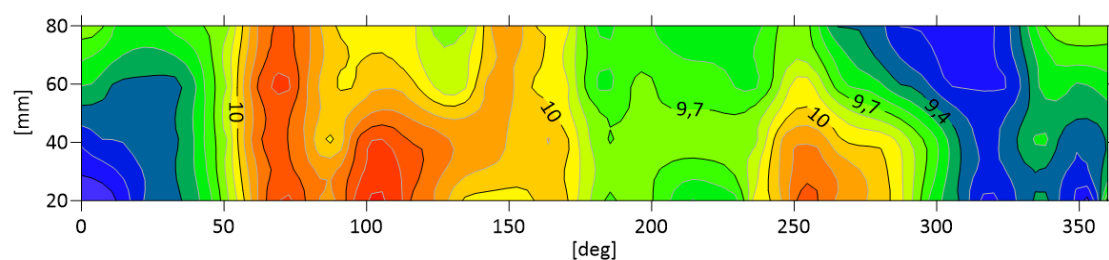


Rysunek 7.19 Przekrój stalowej rury o średnicy 219 mm na wysokości 60 mm od jej podstawy sporządzony na podstawie rejestracji czasów sygnałów odbitych od wewnętrznej ściany rury i uśrednionych grubości dla pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej

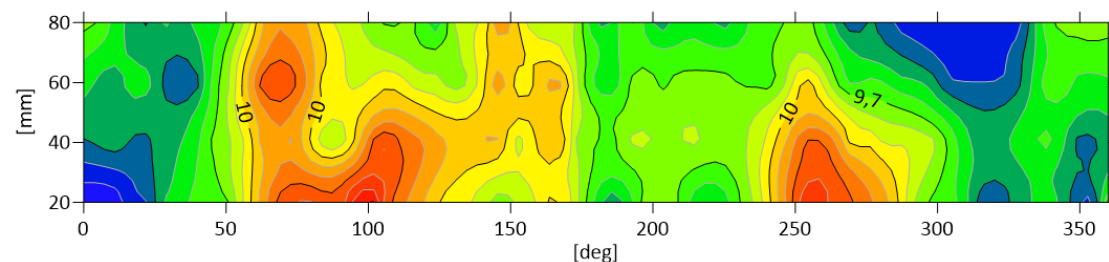
Następnie wykonano pomiary grubości rury stalowej (219 mm) dla punktów położonych na obwodach na wysokości 20, 40, 60 oraz 80 mm od podstawy rury z wykorzystaniem osobno pierwszej, drugiej częstotliwości rezonansowej oraz elektronicznego grubomierza. Dla każdego sposobu pomiaru określono w sumie 260 wartości grubości ścianki rury na czterech wyżej wymienionych obwodach. Na podstawie danych grubości otrzymanych z użyciem częstotliwości pierwszego i drugiego rezonansu sporządzono odpowiednie mapy grubości rury, które zostały przedstawione na rysunkach 7.20 i 7.21. Podobną mapę sporządzono również na podstawie danych uśrednionych z grubości otrzymanych z pomiaru z wykorzystaniem pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej (Rysunek 7.22). Natomiast rysunek 7.23 przedstawia mapę grubości badanego odcinka rury otrzymaną z wykorzystaniem danych z pomiaru elektronicznym grubomierzem cyfrowym. Na podstawie otrzymanych map grubości wynika, że ścianka rury stalowej w badanym odcinku cechuje się dużą zmiennością i zawiera się w przedziale od 8,8 mm do 10,7 mm.



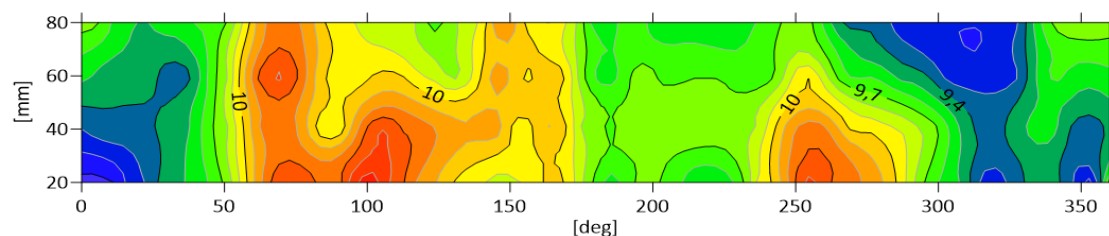
Rysunek 7.20 Mapa grubości ścianki rury stalowej o średnicy nominalnej 219 mm i grubości 10 mm na wysokości od 20 mm do 80 mm sporządzona z danych otrzymanych z pomiaru metodą ultradźwiękową z użyciem pierwszej częstotliwości rezonansowej i odpowiadającego współczynnika relacji



Rysunek 7.21 Mapa grubości ścianki rury stalowej o średnicy nominalnej 219 mm i grubości 10 mm na wysokości od 20 mm do 80 mm sporządzona z danych otrzymanych z pomiaru metodą ultradźwiękową z użyciem drugiej częstotliwości rezonansowej i współczynnika relacji



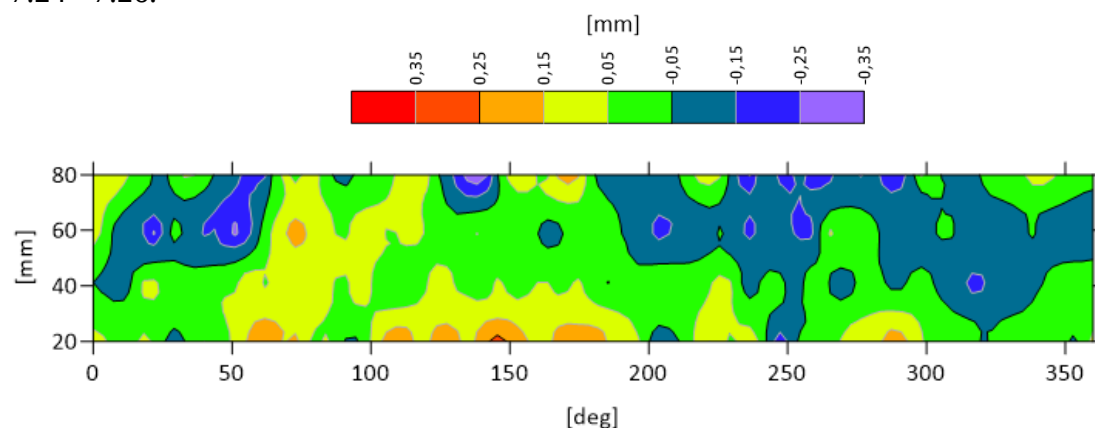
Rysunek 7.22 Mapa grubości ścianki rury stalowej o rozmiarach nominalnych średnicy 219 mm i grubości 10 mm na wysokościach 20 - 80 mm sporządzona z uśrednionych danych otrzymanych z pomiaru metodą ultradźwiękową z użyciem pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej i współczynnika relacji



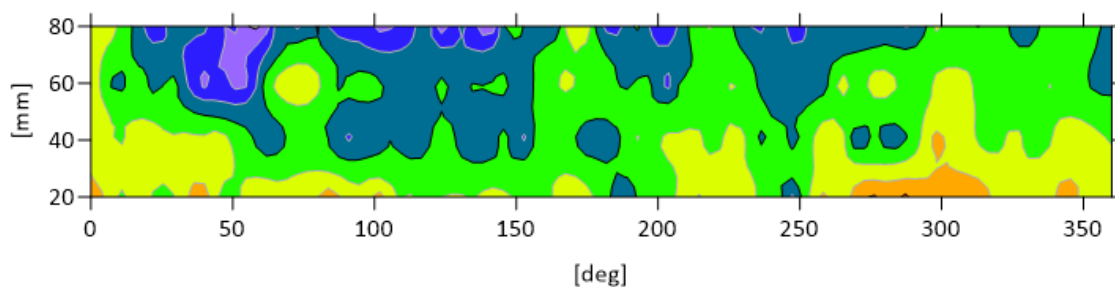
Rysunek 7.23 Mapa grubości ścianki rury stalowej o średnicy nominalnej 219 mm i grubości 10 mm na wysokościach 20 - 80 mm sporządzona na podstawie danych otrzymanych z pomiaru elektronicznym grubomierzem cyfrowym

Następnie obliczono różnice pomiędzy grubościami rury stalowej dla wszystkich punktów pomiarowych na odcinku wysokości 20 - 80 mm zmierzonymi z użyciem grubomierza cyfrowego a grubościami mierzonymi metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej oraz grubościami

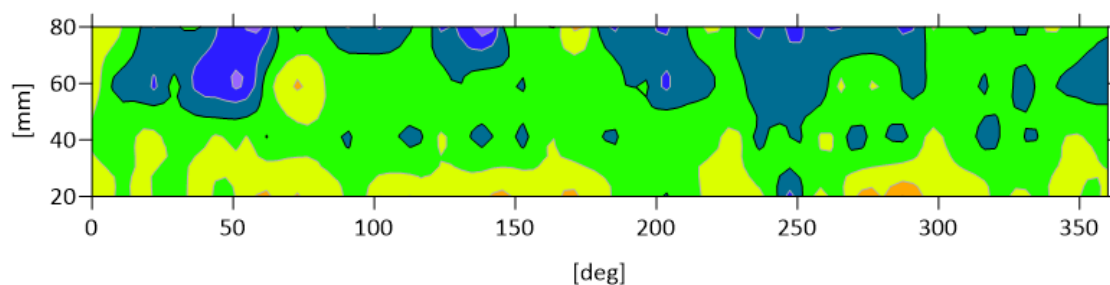
uśrednionymi otrzymanymi z pomiarów tych dwóch częstotliwości. Wyniki posłużyły do sporządzenia kolejnych map różnic, które przedstawiono na Rysunkach 7.24 - 7.26.



Rysunek 7.24 Mapa rozkładu różnicy między grubościami ścianki rury stalowej o średnicy 219 mm na odcinku wysokości 20 - 80 mm zmierzonych grubościomierzem elektronicznym a grubościami zmierzonymi metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem pierwszej częstotliwości rezonansowej



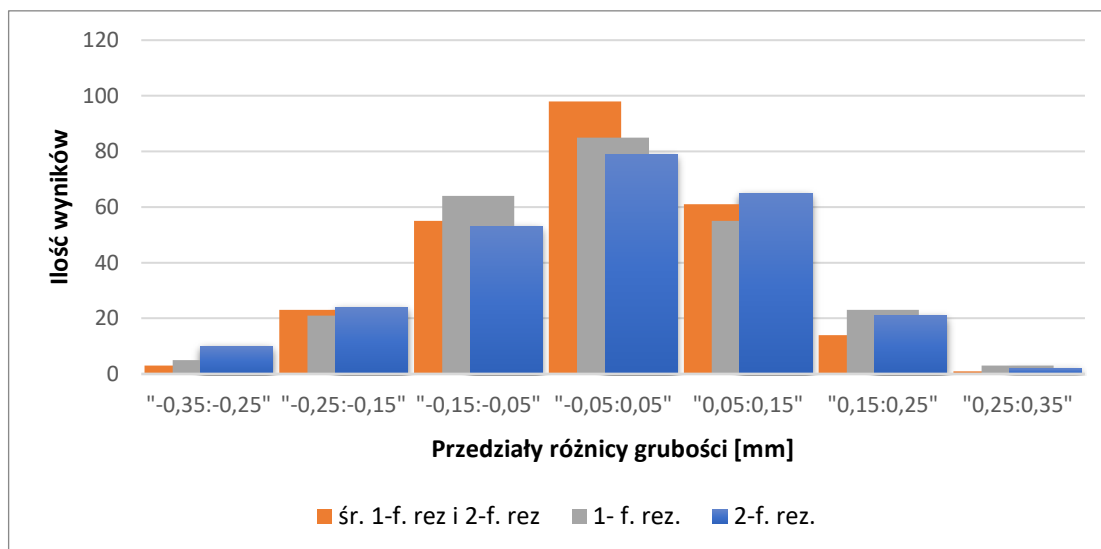
Rysunek 7.25 Mapa rozkładu różnicy między grubościami ścianki rury stalowej o średnicy 219 mm na odcinku wysokości 20 - 80 mm zmierzonych grubościomierzem elektronicznym a grubościami zmierzonymi metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem drugiej częstotliwości rezonansowej



Rysunek 7.26 Mapa rozkładu różnicy między grubościami ścianki rury stalowej o średnicy 219 mm na odcinku wysokości 20 - 80 mm zmierzonych grubościomierzem elektronicznym a grubościami uśrednionymi zmierzonymi metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej

Z powyższych analiz można stwierdzić, że grubości ścianki odcinka rury stalowej o nominalnej średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm otrzymane metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem częstotliwości rezonansowych i z zastosowaniem odpowiednich współczynników relacji są zgodne z grubościami ścianki rury zmierzonymi za pomocą elektronicznego grubościomierza cyfrowego. Rozkłady różnic pomiędzy grubościami zmierzonymi elektronicznym grubościomierzem cyfrowym a grubościami otrzymanymi z wykorzystaniem pierwszej oraz drugiej

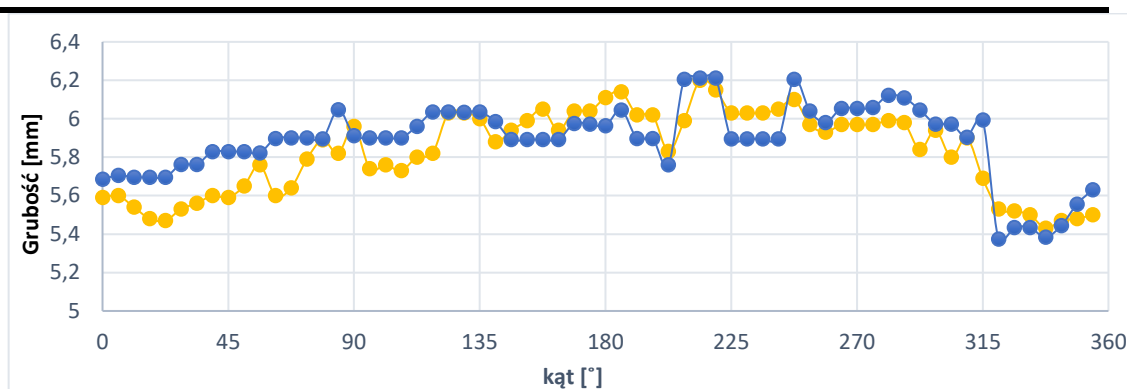
częstotliwości rezonansowej i z uśrednienia wyników otrzymanych z pomiarów z powyższymi częstotliwościami rezonansowymi zostały przedstawione na rysunku 7.27. Z jego analizy wynika, że różnice między grubościami mierzonymi manualnie przyrządem pomiarowym a grubościami otrzymanymi przy wykorzystaniu pierwszej częstotliwości rezonansowej, zawarte w przedziale $-0,15 - 0,15$ mm stanowią 78,8% wszystkich pomiarów, różnice w takim samym przedziale ma 75,7% wyników przy drugiej częstotliwości rezonansowej. Natomiast dla grubości uśrednionych z wyników otrzymanych z pierwszej jak i drugiej częstotliwości rezonansowej różnice w wyżej wymienionym przedziale przyjmuje 82,3% wyników.



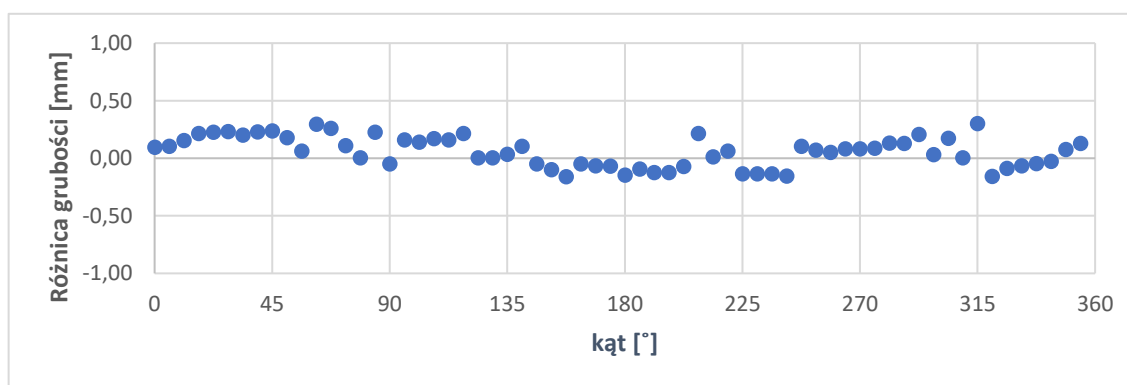
Rysunek 7.27 Rozkłady różnic pomiędzy grubościami zmierzonymi elektronicznym grubościomierzem cyfrowym a grubościami otrzymanymi z wykorzystaniem pierwszej oraz drugiej częstotliwości rezonansowej i z uśrednienia wyników z otrzymanych pomiarów z powyższymi częstotliwościami rezonansowymi

W następnej kolejności wykonano pomiary grubości ścianki odcinka innej rury stalowej o nominalnej średnicy 127 mm i grubości 5,5 mm. Pomiary były wykonane dla 65 punktów równomiernie oddalonych od siebie, położonych na obwodzie na wysokości 80 mm od podstawy odcinka rury. Częstotliwość nadawanego sygnału ultradźwiękowego wynosiła 500 kHz. Przy takiej częstotliwości istniała możliwość występowania jedynie częstotliwości pierwszego rezonansu dla rury z ścianką o grubości nominalnej 5,5 mm. Grubości ścianki rury na poszczególnych punktach pomiarowych zostały obliczone z użyciem prędkości fali ultradźwiękowej dla tej rury i częstotliwości rezonansowych określonych na punktach pomiarowych oraz współczynnika relacji wynoszącego 1,008.

Na rysunku 7.28 przedstawiono grubości ścianki rury o średnicy 129 mm dla punktów pomiarowych zmierzone przy użyciu pierwszej częstotliwości rezonansowej (niebieskie punkty) wraz z grubościami ścianki tej rury w tych samych punktach zmierzonymi elektroniczną suwmiarką cyfrową (żółte punkty). Natomiast różnice między grubościami mierzonymi wyżej wymienionymi metodami są przedstawione na rysunku 7.29. Różnice te wahały się w przedziale od $-0,16$ do $0,30$ mm ze średnią wartością $0,06$ mm.



Rysunek 7.28 Grubości ścianki rury o nominalnej średnicy 129 mm i grubości ścianki 5,5 mm na punktach pomiarowych mierzone przy użyciu pierwszej częstotliwości rezonansowej (niebieski) wraz z grubościami ścianki tej rury w tych samych punktach zmierzonymi elektroniczną suwmiarką cyfrową (żółty)

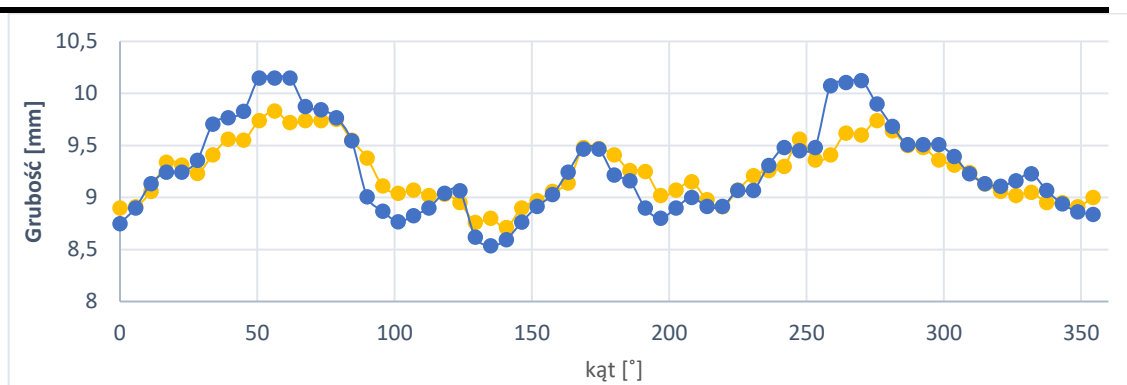


Rysunek 7.29 Różnice między grubościami ścianki odcinka rury stalowej nominalnej średnicy 129 mm i grubości ścianki 5,5 mm mierzonymi suwmiarką cyfrową a grubościami tego odcinka określonymi metodą ultradźwiękową z użyciem pierwszej częstotliwości rezonansowej

Dla rury stalowej o nominalnej średnicy 127 mm i grubości 5,5 mm pomiar grubości ścianki z wykorzystaniem pierwszej częstotliwości rezonansowej i współczynnika relacji pozwala na uzyskanie wyników, gdzie różnice grubości w porównaniu z grubościami otrzymanymi za pomocą grubościomierza cyfrowego zawierają się w przedziale od - 0,05 mm do 0,16 mm i stanowią 50% wszystkich otrzymanych wyników.

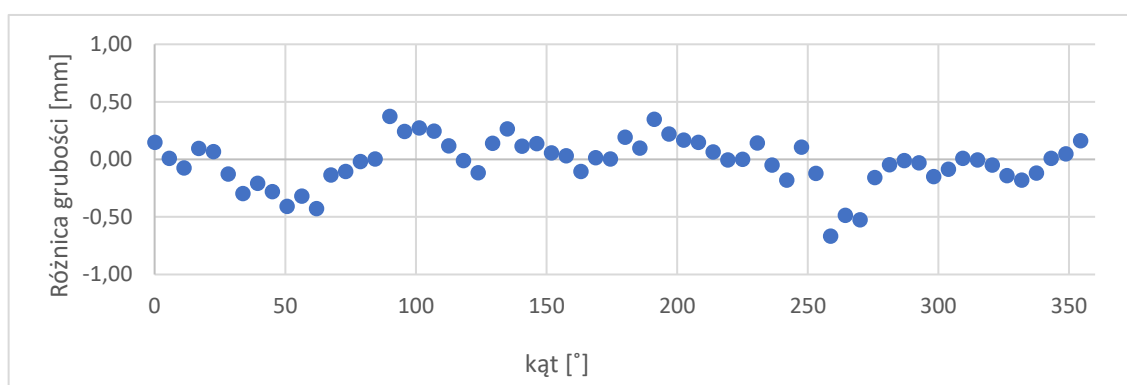
Pomiar grubości rury o nominalnej średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm wykonanej z włókna szklanego również został przeprowadzony. Badanie wykonano dla jednego obwodu na wysokości 50 mm od podstawy rury, otrzymując 65 punktów pomiarowych równo rozłożonych na obwodzie pomiarowym. Badanie wykonano dla częstotliwości nadawanego sygnału ultradźwiękowego 300 kHz. Pomiary polegały na określeniu drugiej częstotliwości rezonansowej, za pomocą której określono grubość ściany rury dla poszczególnych punktów pomiarowych. Dla przypadku rury z włókna szklanego współczynnik relacji został przyjęty na poziomie 1,0.

Na rysunku 7.30 przedstawiono pomiar grubości ścianki rury wykonanej z włókna szklanego dla drugiej częstotliwości rezonansowej wraz z pomiarem grubości w tych samych punktach pomiarowych wykonanych za pomocą grubościomierza cyfrowego (żółty).



Rysunek 7.30 Grubości ścianki rury z włókna szklanego o nominalnej średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm na punktach pomiarowych mierzone przy użyciu drugiej częstotliwości rezonansowej (niebieski) wraz z grubościami ścianki tej rury w tych samych punktach zmierzonymi elektroniczną suwmiarką cyfrową (żółty)

Różnicę między grubością rury z włókna szklanego określoną za pomocą grubościomierza cyfrowego a grubością rury pomierzoną za pomocą głowicy ultradźwiękowej umieszczonej wewnątrz rury dla zastosowanej częstotliwości rezonansowej przedstawiono na rysunku 7.31. Różnice te wahały się w przedziale od -0,66 do 0,37 mm ze średnią wartością -0,02 mm.



Rysunek 7.31 Różnice między grubościami ścianki odcinka rury wykonanej z włókna szklanego o nominalnej średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm mierzonymi suwmiarką cyfrową a grubościami tego samego obwodu określonymi metodą ultradźwiękową z użyciem drugiej częstotliwości rezonansowej

Dla rury o nominalnej średnicy 219 mm i grubości 10 mm wykonanej z włókna szklanego pomiar grubości ścianki z wykorzystaniem zastosowanej częstotliwości rezonansowej i współczynnika relacji wynoszącego 1, pozwala na uzyskanie danych, gdzie różnice grubości w porównaniu do pomiaru za pomocą grubościomierza cyfrowego zawarte są w przedziale od -0,12 do 0,12 mm i stanowią 50% wszystkich wyników.

9 Podsumowanie

Wykorzystanie kavern wyługowanych w złożach soli kamiennej do magazynowania substancji energetycznych takich jak węglowodory ciekłe czy gazowe jest obecnie jednym z najlepszych sposobów na zapewnienie ciągłości dostaw węglowodorów zarówno dla potrzeb gospodarstw domowych jak również dla przemysłu oraz zapewnia rezerw strategicznych dla gospodarki krajowej. Wykorzystanie kavern do magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza w instalacjach CAES, czy też rosnące zainteresowanie magazynowaniem w nich wodoru jako paliwa przyszłości powoduje, że kaverny solne mają coraz większe znaczenie w procesie transformacji energetycznej i mogą przyczynić się do ograniczenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery. W związku z tym niezbędny jest ciągły rozwój technologii stosowanej do kontrolowania kavern podczas ich budowy jak również późniejszej ich eksploatacji. Pozwala to na optymalne wykorzystanie zasobów złoża, a przede wszystkim na zapewnienie bezpiecznej i długookresowej pracy powstałych kavern. Obecnie najlepszą znaną metodą pomiaru geometrii kavern jest metoda ultradźwiękowa. Na dokładne odwzorowanie kształtu i rozmiarów mierzonej kaverny wpływ ma zastosowanie odpowiedniej metodyki pomiarowej, a przede wszystkim znaczenie mają parametry techniczne samego zestawu pomiarowego. Zastosowanie przetworników ultradźwiękowych o odpowiednich częstotliwościach, wyposażenie zestawu pomiarowego w czujniki pomiarowe parametrów fizycznych medium wypełniającego kavernę wpływa zarówno na jakość otrzymanych danych, jak również na czas wykonywania kompleksowego pomiaru. W niektórych przypadkach wymagane jest również wykonywanie pomiarów echometrycznych, gdzie echosonda znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rur stalowych. Niestety ze względu na to, że obecnie na rynku krajowym nie ma urządzeń umożliwiających takiego typu pomiary, prace te wykonują jedynie specjalistyczne podmioty zagraniczne.

W ramach przeprowadzonych prac badawczych rozprawy doktorskiej wykonano zatem badania symulacyjne i pomiary laboratoryjne, które wskazują pozytywne rozwiązania w pomiarach echometrycznych kavern, w sytuacji kiedy echosonda znajduje się wewnątrz rur stalowych lub rur wykonanych z włókna szklanego. Przeprowadzone badania pozwoliły również na opracowanie metodyki i rozwiązań technologicznych umożliwiających użycie echosondy stosowanej do standardowych pomiarów kształtu i rozmiarów kavern, jako narzędzia do pomiaru grubości ścianki rur. Umożliwia to zwiększenie zakresu świadczonych usług pomiarowych z użyciem jednego urządzenia pomiarowego o badanie stanu technicznego rur znajdujących się w otworach wiertniczych.

W pierwszej kolejności podjęto problematykę związaną z transmisją sygnałów ultradźwiękowych przez pojedynczą płytę prostopadłą do kierunku rozchodzenia fali. Przeprowadzono badania symulacyjne transmisji fal o częstotliwościach 200 i 450 kHz przez płyty stalowe o grubościach 1 - 20 mm. Symulacje wykazały, że przy częstotliwości 200 kHz, największa amplituda sygnału transmitowanego rejestrowana jest przez płytę stalową o grubości 1 mm i wynosi 47% mocy sygnału bezpośrednio przychodzącego do odbiornika. Badania odbicia i transmisji fali ultradźwiękowej przez płytę stalową czy przez ściankę rury przeprowadzono w relacji do poziomu odniesienia, który został zdefiniowany jako moc sygnału transmitowanego przez płytę albo odbitego od ściany dla przypadku braku płyty czy rury stalowej w modelu

symulacyjnym lub laboratoryjnym. Dla płyt o grubościach 13 – 16 mm amplitudy sygnałów transmitowanych zawarte są w przedziale 23 - 26% poziomu odniesienia. Dla sygnału nadawczego o częstotliwości 450 kHz największa wartość amplitudy sygnałów transmitowanych przez płyty o grubościach 6 i 7 mm wynosi około 30% poziomu odniesienia. Dla płyty o grubości 8 mm oraz dla płyt o grubościach 12 – 15 mm amplituda sygnałów transmitowanych przez nie wynosi ok. 20% poziomu odniesienia. Dla płyty, gdzie rejestrowany był sygnał transmisyjny o największej amplitudzie, amplituda sygnału odbitego była najmniejsza, co wynika z zasady zachowania energii. Badania laboratoryjne transmisji sygnałów przez płyty stalowe o grubościach 2 - 15 mm potwierdziły, że największe amplitudy sygnału transmitowanego zachodzą w sytuacji, kiedy grubość płyty jest zbliżona do połowy długości fali lub jej wielokrotności. Częstotliwości odpowiadające takim długościom fali są zwane częstotliwościami rezonansowymi. Wysokie amplitudy sygnału transmitowanego występują również, kiedy grubość płyty jest mniejsza od piętnastu tysięcznych długości fali rozchodzącej się w materiale płyty. Stwierdzono, że wpływ odległości między nadajnikiem a płytą stalową na wielkość amplitudy sygnału transmitowanego jest pomijalny.

Wykonane badania symulacyjne wykazały, że płyta stalowa umieszczona między przetwornikiem ultradźwiękowym a ścianą zbiornika ma wpływ na czas przychodzenia sygnału echa odbitego od ściany zbiornika do odbiornika, co ma znaczenie dla dokładności pomiaru odległości. Przykładowo, przy częstotliwości sygnału nadawczego 450 kHz największe różnice w czasie przyścia echa odbitego od ściany zbiornika do odbiornika były obserwowane dla płyt stalowych o grubościach zbliżonych do połowy i całej długości fali w stali w porównaniu z echem przychodzącym do odbiornika przy braku płyty. Maksymalne zarejestrowane różnice w pomiarach czasu echa odbitego dla tych grubości płyt wynosiły odpowiednio 26 oraz 20 μ s, co pozornie zwiększa mierzone odległości o 32 i 28 mm w stosunku do odległości modelowej wynoszącej 820 mm. Pozorne wydłużenie czasu rejestracji echa odbitego od ściany do odbiornika przy obecności stalowej przeszkody było zaobserwowane zarówno dla symulacji z wykorzystaniem sygnałów nadawczych o częstotliwościach rezonansowych odpowiadających grubościom płyt jak i przy zastosowaniu sygnałów nadawczych z liniowo modulowaną częstotliwością.

W przypadku, kiedy głowica ultradźwiękowa z nadajnikiem i odbiornikiem umieszczona została między dwoma równoległymi płytami zaobserwowano liczne echa wielokrotnie odbite. Sygnały te są oddalone od siebie w równych odległościach odpowiadających odległości czoła głowicy od przedniej ściany płyty. Analiza częstotliwościowa sygnałów wielokrotnie odbitych wykazała występowanie minimum lokalnego w okolicy częstotliwości rezonansowej płyt. Sygnał odbity od ściany zbiornika wyróżnia się natomiast częstotliwością rezonansową odpowiadającą grubości płyty, co umożliwia jego identyfikację w rejestrowanym przebiegu sygnału. Przeprowadzone zostały również symulacje emisji wiązki fali ultradźwiękowej w celu określenia wpływu krzywizny rury na geometrię wiązki fali ultradźwiękowej w przestrzeni za wycinkiem rury stalowej o grubości ścianki 10 mm. Badania te wykazały, że wraz ze zmniejszeniem promienia krzywizny następuje ogniskowanie wiązki ultradźwiękowej a następnie znaczne rozpraszanie fali i spadek amplitudy w linii osiowej wiązki ultradźwiękowej. Dla przetwornika ultradźwiękowego o średnicy 50 mm wygenerowana wiązka ultradźwiękowa zachowuje swoją

geometrię po przejściu przez rurę, której promień jest większy od średnicy nadajnika. Dla rury o średnicy zewnętrznej 194 mm, szerokość wiązki w odległości 400 mm od nadajnika jest o 18% większa niż w przypadku braku rury i wartość ta zmniejsza się wraz ze wzrostem promienia rury. Wykazano też, że odległość nadajnika od wewnętrznej ściany rury nie ma znaczącego wpływu na kształt wiązki fali ultradźwiękowej za rurą stalową. Stwierdzenie to jest prawidłowe jedynie w sytuacji, kiedy nadajnik znajduje się na osi wiązki fali. W przypadku, kiedy nadajnik jest przesunięty od osi rury, wiązka generowanej fali ultradźwiękowej za rurą zostaje odchyłona od głównego kierunku propagacji. Przykładowo, dla rury o średnicy 219 mm przesunięcie nadajnika o 20 mm od osi, powoduje odchylenie czoła fali o $3,4^\circ$ i spadek amplitudy o 18% w stosunku do osiowego ustawienia nadajnika. Wyniki badań wskazują, że przesunięcie głowicy pomiarowej od osi wewnątrz rury, skutkuje nie tylko zmniejszeniem zasięgu pomiarowego, ale również zmianą kierunku propagacji fali, co wpływa na dokładność wyznaczenia odległości ściany kawerny od głowicy. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na wymóg stosowania centralizatorów echosondy podczas prac pomiarowych w rurach.

Symulacje komputerowe potwierdziły również możliwość wykonywania pomiarów geometrii w sytuacji, kiedy głowica pomiarowa znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rury stalowej o nominalnej średnicy 219 mm i grubości 10 mm, czyli o wymiarach zbliżonych do przemysłowych rur 8 5/8" używanych podczas ługowania kawern. Nadawanie sygnału ultradźwiękowego o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości rezonansowych, odpowiadających grubości ścianki rury, umożliwia otrzymanie echa odbitego od ściany modelu z odległości ok. 50 cm na poziomie około 12 - 15% w stosunku do sygnału przy braku rury stalowej. Zarejestrowane przebiegi sygnału ze względu na obecność licznych ech wielokrotnie odbitych wewnątrz rury wymagały zastosowania podstawowych zabiegów polegających na usuwaniu zbędnych sygnałów oraz filtracji, aby uzyskać przebieg, gdzie możliwe jest wyróżnienie sygnału odbitego od ściany modelu.

Wykonano pomiary laboratoryjne kształtu i rozmiarów zbiornika ze ścianą aluminiową, wypełnionego wodą. Pomiary wykonane zostały w sytuacji, kiedy głowica ultradźwiękowa znajdowała się wewnątrz stalowej rury lub rury wykonanej z włókna szklanego. W pierwszej kolejności generowano krótki sygnał o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości rezonansowej odpowiadającej długości fali dla nominalnej grubości rury. Analizując charakterystykę częstotliwościową sygnału odbitego od wewnętrznej ściany rury każdorazowo określano częstotliwości rezonansowe dla grubości ścianki na danym punkcie pomiarowym. Następnie, w celu pomiaru odległości ściany zbiornika za rurą, generowano sygnał nadawczy z wyznaczoną częstotliwością rezonansową w czasie kilkudziesięciu μs . Impuls ten po odbiciu od ściany zbiornika był rejestrowany przez odbiornik.

Pomiary kształtu i rozmiarów ścian zbiornika o odległościach wynoszących od 226 do 928 mm od głowicy pomiarowej wykonano, kiedy pomiarowa głowica ultradźwiękowa znajdowała się w przestrzeni wewnętrznej stalowej rury o nominalnych wymiarach 127 mm średnicy i grubości 5,5 mm z użyciem pierwszej częstotliwości rezonansowej. Podobne pomiary były wykonane dla stalowej rury o nominalnej średnicy 219 mm i grubości 10 mm z użyciem zarówno pierwszej jak i drugiej częstotliwości rezonansowej. Dla rury wykonanej z włókna szklanego zastosowano natomiast drugą i trzecią częstotliwość rezonansową. Różnice w wynikach otrzymanych z pomiarów odległości przy rurach w porównaniu do

wyników pomiaru przy braku rur na modelowym stanowisku laboratoryjnym wynosiły kilkadziesiąt milimetrów. Stanowiło to średnio ok. 9% w stosunku do średnicy 219 mm rury stalowej, 7% w stosunku do średnicy 219 mm rury wykonanej z włókna szklanego oraz 14 % w stosunku do średnicy 127 mm rury stalowej. Najmniejsze różnice w wynikach pomiaru odległości, jednocześnie największe amplitudy sygnału echa odbitego od ściany zbiornika, rejestrowano przy pomiarach, kiedy głowica znajduje się w rurze z włókna szklanego. Wynika to z mniejszej impedancji akustycznej tego materiału, zbliżonej do wody w zbiorniku.

Metodyka ultradźwiękowa umożliwia nie tylko pomiar geometrii zbiornika przy obecności rury zasłaniającej głowicę, ale również wykonanie pomiaru grubości rury stalowej bądź rury z włókna szklanego. Dzięki zastosowaniu współczynników relacji między teoretycznie obliczoną częstotliwością rezonansową a częstotliwością rezonansową otrzymaną z symulacji, maksymalna względna różnica między grubościami płyt stalowych mierzonymi zarówno z użyciem pierwszej jak i drugiej częstotliwości rezonansowej a grubościami mierzonymi grubomierzem cyfrowym nie przewyższała 1%. Natomiast dla pomiaru grubości ściany rur stalowych o nominalnej średnicy 128 mm i grubości 5,5 mm z użyciem zarówno pierwszej jak i drugiej częstotliwości rezonansowej błąd pomiarowy nie przekraczał 5,5%, dla rur stalowych o nominalnych wymiarach 219 mm średnicy i grubości 10 mm błąd pomiarowy nie przekraczał 3,5%. W przypadku rur wykonanych z włókna szklanego o grubości nominalnej ścianki rury 10mm i średnicy 219 mm błąd pomiaru grubości rury nie był większy niż 5%.

Wszystkie przeprowadzone badania w ramach rozprawy doktorskiej przyczyniły się do opracowania unowocześnionego zestawu pomiarowego służącego do pomiarów echometrycznych kształtu i rozmiarów podziemnych kawern wypełnionych medium ciekłym lub gazowym. Zestaw ten cechuje się nowymi rozwiązaniami technicznymi pozwalającymi m.in. na równoczesne pomiary geometryczne kawerny oraz innych parametrów takich jak temperatura, ciśnienie, prędkość fali ultradźwiękowej w medium czy też pomiar trajektorii otworu udostępniającego kawernę. Pozwala to na skrócenie czasu wykonywania badań przy jednoczesnym zwiększeniu dokładności i rozdzielczości pomiarowej. Wykorzystanie modułowej budowy urządzenia pomiarowego umożliwia zastosowanie głowic ultradźwiękowych dopasowanych do konkretnych warunków pomiarowych. Dla kawern wypełnionych solanką lub ciekłymi węglowodorami zastosowano przetworniki ultradźwiękowe o częstotliwościach 200 lub 450 kHz. Dla kawern gazowych istnieje możliwość zastosowania testowego przetwornika ultradźwiękowego o częstotliwości 30 kHz. Nowy zestaw pomiarowy pozwala również na zainstalowanie głowicy pomiarowej opracowywanej na bazie przetestowanego prototypu, który będzie wykorzystany w pomiarach echometrycznych kawern, gdzie strefa przesłonięta jest rurą ługowniczą. Opracowana metodyka pozwoli również na okresową kontrolę stanu technicznego uzbrojenia otworu. Wykonana aparatura pomiarowa wykazuje również bardzo duży potencjał rozwojowy. Dzięki wydajnej komunikacji cyfrowej i opracowanej architekturze połączenia poszczególnych elementów echosondy możliwe jest uzupełnianie urządzenia o dodatkowe czujniki i moduły pomiarowe. W najbliższym czasie planowane jest dołączenie do modułu pomiarowego dodatkowego czujnika punktu rosy, który będzie wykorzystany podczas pomiarów geometrii kawern magazynujących substancje gazowe. Nowa sonda pozwoli również na podłączenie głowicy pomiarowej opartej o laserowy czujnik odległości pracujący

w bliskiej podczerwieni pozwalający na wykonywanie pomiarów geometrii jaskiń lub kawern wypełnionych gazem o małym ciśnieniu. Dodatkowo w najbliższej przyszłości opracowany zestaw pomiarowy będzie wykorzystywany do pomiarów echometrycznych kawern wypełnionych wodorem.

Bibliografia

- Ban, F. i in. (2021) 'The optimum interwell distance analysis of two-well-horizontal salt cavern construction', *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 43(23), pp. 3082–3100.
- Bayram, F. i Bektasoglu, I. (2020) 'Determination of actual dissolution rates from some rock properties in construction of deep salt cavern for natural gas storage', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 126(July 2019).
- Bernasconi, G. i in. (2013) 'Advanced pipeline monitoring using multipoint acoustic data', *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition 2013, OMC 2013*, (March).
- Birchall, M., Sevcic, N. i Madureira, C. (2007) 'Internal Ultrasonic Pipe & Tube Inspection – IRIS', *IV Conferencia Panamericana de END*, pp. 1–11.
- Bras, Y. Le i Greneche, J.-M. (2017) 'Magneto-Elastic Resonance: Principles, Modeling and Applications', *Resonance*, (November 2017).
- Caglayan, D. G. i in. (2020) 'Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe', *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11), pp. 6793–6805.
- Chromik, M. (2016) 'Koncepcja magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w postaci wodoru w kavernach w złożach soli kamiennej w Polsce – wstępne informacje', *Przegląd Solny*, 12, pp. 11–18.
- Chromik, M. i Korzeniowski, W. (2021) 'A Method to Increase the Leaching Progress of Salt Caverns with the Use of the Hydro-Jet Technique'.
- Costa, A. M. i in. (2011) 'Underground storage of natural gas and CO₂ in salt caverns in deep and ultra-deep water offshore Brazil', *Harmonising Rock Engineering and the Environment*, pp. 629–630.
- Crotogino, F. i in. (2010) 'Large-Scale Hydrogen Underground Storage for Securing Future Energy Supplies', *18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010 Parallel Sessions Book 4: Storage Systems / Policy Perspectives, Initiatives and Co-operations*, 78(January), p. 10. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/34994534.pdf>.
- Crotogino, F., Mohmeyer, K.-U. i Scharf, R. (2001) 'Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation', *Solution Mining Research Institute (SMRI) Spring Meeting*, (April), pp. 351–357.
- Curie L.A. (1968) – Limit for quantitative detection and quantitative detection. *Analytical Chemistry*, 40: 586–593.
- Czapowski, G. i Bukowski, K. (2009) 'Złoża soli w Polsce - Stan aktualny i perspektywy zagospodarowania', *Przegląd Geologiczny*, 57(9), pp. 798–811.
- Czapowski, G. i Tarkowski, R. (2018) 'Geology of selected salt domes in Poland and their usefulness in constructing hydrogen storage caverns', *Biuletyn - Państwowego Instytutu Geologicznego*, 472, pp. 53–82.
- Dris, E. A. (2014) 'Contribution à la caractérisation non destructive des roches terrestres et extraterrestres par des techniques ultrasonores', *CENTRE DES ETUDES DOCTORALES IBN ZOHR*, (June 2014).
- Dz.U. 2014 poz. 812 (no date) *Rozporządzenie Ministra Gospodarki*. Dziennik Ustaw RP.
- Figarski, M. i Kubacka, T. (2017) 'Pomiary echometryczne kavern solnych wypełnionych gazem przy użyciu echosondy CHEMKOP', *Przegląd Solny / Salt review*, pp. 130–134.
- Filipiak, J. i in. (2015) 'Podzespoły z akustyczną falą powierzchniową', *Przegląd Elektrotechniczny*, 91(1), pp. 140–143.

- Ghassemi, J. (2019) 'Ultrasound Transducers', *Atlas of Ultrasound-Guided Regional Anesthesia*, pp.303-353
- Gruszczyk, H. (1984) *Nauka o złożach*. Wydawnictwo Geologiczne Warszawa.
- Habibi, R. (2019) 'An investigation into design concepts, design methods and stability criteria of salt caverns', *Oil and Gas Science and Technology*, 74.
- Han, Z. i in. (2021) 'Ultrasonic attenuation characteristics of glass-fiber-reinforced polymer hull structure', *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14).
- Hasselkus, F. i in. (2015) 'Sonar surveys under challenging conditions in gas at very low pressure and in crude oil', pp. 109–115.
- He, W. i in. (2017) 'Exergy storage of compressed air in cavern and cavern volume estimation of the large-scale compressed air energy storage system', *Applied Energy*. Elsevier, 208(September), pp. 745–757.
- Hernandez Delgadillo, H. i in. (2020) 'Ultrasonic inline inspection of a cement-based drinking water pipeline', *Engineering Structures*. Elsevier, 210(February), p. 110413.
- Hévin, G. (2019) 'Underground Storage of Hydrogen: In Situ', *European Workshop on Underground Energy Storage*, pp. 841–865.
- Hodobod, M. i Czapowski, G. (2020) 'Sól Kamienna', *Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy*.
- Jagodziński, Z. (1997) *Przetworniki ultradźwiękowe* -. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.
- Johnson, D. H. (2006) 'Signal-to-noise ratio', *Scholarpedia*, 1(12), p. 2088.
- Kilian, L. (2002) 'Ultradźwięki w medycynie', pp. 1–65.
- Kim, Y. Y. i Kwon, Y. E. (2015) 'Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides', *Ultrasonics*. Elsevier B.V., 62, pp. 3–19.
- Kościszko, M. i Rałowicz, B. (2010) 'Automatyczna interpretacja kawern mierzonych Echosondą Chemkop', *Geologia*, 36(3), pp. 439–449.
- El Kouche, A. i Hassanein, H. S. (2012) 'Ultrasonic non-destructive testing (NDT) using wireless sensor networks', *Procedia Computer Science*, 10, pp. 136–143.
- Kubacka, T. i Nguyen, D. C. (2022) 'Monitorowanie kawern solnych wykorzystywanych jako magazyny węglowodorów ciekłych i gazowych za pomocą echosondy ultradźwiękowej', W: *GEOPETROL 2022: wyzwania dla sektora naftowego i gazowniczego w dobie transformacji energetycznej: międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna: [19-21 września 2022, Zakopane] : materiały konferencyjne*, pp. 235–245.
- Kubacka, T. i Nguyen Dinh, C. (2021) 'Preliminary Determination of the Optimal Parameters When Using an Ultrasonic Probe to Measure Cavern Geometry Where a Metal Borehole Pipe Is Present', *Acoustics*, 3(2), pp. 425–441.
- Kubacka, T. i Nguyen Dinh, C. (2024) 'Measurements of thickness of a steel operation pipe occurring in a salt cavern and its geometry: simulations and experiments', *Acta Geophysica*. 72, pp. 1-15.
- Kuc Witold (2016) 'Złoża Soli W Polsce W Ujęciu Przeglądowym', *Studia i materiały do dziejów Żup Solnych w Polsce*, XXXI, pp. 151-205.
- Kukiałka, P. (2015) 'Kawerny solne w prowincji Alberta , Zachodnia Kanada', pp. 83–90.
- Kunstman, A., Poborska-Młynarska, K. and Urbańczyk, K. (2002) *Zarys otworowego ługownictwa solnego. Aktualne kierunki rozwoju*.

- Kunstman, A., Poborska-Młynarska, K. i Urbańczyk, K. (2009) 'Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych', *Przegląd Geologiczny*, 57(9), pp. 819–828.
- Lankof, L. i in. (2022) 'Potential for Underground Storage of Liquid Fuels in Bedded Rock Salt Formations in Poland', *Energies*, 15(19).
- Lankof, L. i Tarkowski, R. (2022) 'Potencjał magazynowy wodoru w permskich złożach soli kamiennej w Polsce Hydrogen storage potential in Permian rock salts in Poland', *Przegląd Solny / Salt review*, 2021/2022(16), pp. 29–42.
- Li, J. i in. (2020) 'Construction modeling and shape prediction of horizontal salt caverns for gas/oil storage in bedded salt', *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 190(February).
- Maia da Costa, A. i in. (2019) 'Experimental salt cavern in offshore ultra-deep water and well design evaluation for CO₂ abatement', *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(5), pp. 641–656.
- Martinsson, P. E. i Delsing, J. (2002) 'Ultrasonic measurements of molecular relaxation in ethane and carbon monoxide', *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 1(November 2002), pp. 511–516.
- Medwin, H. (1975) 'The Speed of sound in water: a sample equation for realistic parameters"', *Journal of the Acoustical Society of America*, 8 (6), pp. 1318–1319.
- Michaud, M. i in. (2015) 'Design parameters of stainless steel plates for maximizing high frequency ultrasound wave transmission', *Ultrasonics Sonochemistry*, 26, pp. 56–63.
- Milewski, J., Badyda, K. i Szablowski, Ł. (2016) 'Compressed Air Energy Storage Systems', 96(4), pp. 245–260.
- Mishra, S. i in. (2019) 'Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Energy Harvesting Applications: A Systematic Review', *Macromolecular Materials and Engineering*, 304(1), pp.1-25
- Nguyen Dinh, C., Kubacka, T. i Figarski, M. (2019) 'Możliwości zastosowania echosondy „Chemkop” i kawernomierza wielkośrednicowego do badania kawern podziemnych', *Przegląd Górniczy*, 04, pp. 1–9.
- Nikolić, B. D. i in. (2013) 'Determining the speed of sound, density, and bulk modulus of rapeseed oil, biodiesel, and diesel fuel', *Thermal Science*, 16(SUPPL.2), pp.505-515.
- Niu, C. kai i in. (2015) 'Model validation and stability analysis for operation projects in Jintan Salt Cavern for strategic oil storage of China', *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 127, pp. 44–52.
- Obraz, J. (1983) *Ultradźwięki w technice pomiarowej*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne Warszawa.
- Poborska-Młynarska, K. (2015) 'Współczesne techniki eksploatacji soli kamiennej w kopalniach podziemnych', *Przegląd Górniczy*, pp. 140–146.
- Rafał, K. i Grabowski, P. (2023) 'Magazynowanie energii', *ACADEMIA - magazyn Polskiej Akademii Nauk*, pp. 34–40.
- Reitze, A., Krieter, M. i Von Tryller, H. (2009) 'Importance of sonar cavern surveying in the monitoring and operation of natural gas caverns', *Przegląd Geologiczny*, 57(9), pp. 769–770.
- Ren, Y. i in. (2014) 'A measuring system for well logging attitude and a method of sensor calibration', *Sensors (Switzerland)*, 14(5), pp. 9256–9270.
- Schulz, J. (2008) 'Calculating the speed of sound in seawater', (10), pp. 5–9.

Shi, X. *i in.* (2021) 'Geomechanical investigation for abandoned salt caverns used for solid waste disposal', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(2), pp. 1205–1218.

Śliwiński, A. (2001) *Ultradźwięki i ich zastosowania*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne Warszawa.

Ślizowski, J., Serbin, K. i Wiśniewska, M. (2010) 'Efektywna pojemność komór magazynowych gazu w pokładowych złożach soli kamiennej Effective capacity of gas storage caverns in rock salt deposits', *Geologia*, 36(2), pp. 407–417.

Such, P. (2020) 'Storage of hydrogen in geological structures', *Nafta - Gaz*, 2020(11), pp. 794–798.

Tarkowski, R. (2017) 'Wybrane aspekty podziemnego magazynowania wodoru', *Przegląd Geologiczny*, 65(5), pp. 282–291.

Urbańczyk, K. (2021) 'Ługowanie w złożach małej miąższości (Proces ługowania kawern solnych cz. V) Leaching in thin-bedded deposits. (Salt cavern leaching process p. V)', *Przegląd Solny / Salt review*, 16, pp.67-91.

Wang, H. *i in.* (2017) '3D Geomechanical Modeling of Salt-Creep Behavior on Wellbore Casing for Presalt Reservoirs. SPE Drilling and Completion, Society of Petroleum Engineers, 2016, 31 (04), pp.261 - 272.

Wang, T. *i in.* (2014) 'Dynamic response of underground gas storage salt cavern under seismic loads', *Tunnelling and Underground Space Technology*. Elsevier Ltd, 43, pp. 241–252.

Wang, T. *i in.* (2017) 'Failure Analysis of Overhanging Blocks in the Walls of a Gas Storage Salt Cavern: A Case Study', *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Springer Vienna, 50(1), pp. 125–137.

Warren, J. K. (2016) *Solution Mining and Salt Cavern Usage, Evaporites*. Springer International Publishing Switzerland, pp.1303-1374

Wojciechowski, H. (2017) 'Technologie magazynowania energii. Cz. I', *Źródła Ciepła I Energii Elektrycznej*, pp. 20–26.

Wołowicz, M., Krawczyk, P. i Gruszecka, M. (2017) 'Wykorzystanie kawernowych magazynów gazu ziemnego jako wysokopojemnościowych magazynów energii elektrycznej'. *Rynek Energii*.

Zhou, L., Brunskill, H. P. i Lewis, R. (2019) 'Real-time non-invasive measurement and monitoring of wheel–rail contact using ultrasonic reflectometry', *Structural Health Monitoring*, 18(5–6), pp. 1953–1965.

Spis rysunków

Rysunek 2.1	Rozmieszczenie złóż soli kamiennej z różnych epok na świecie (Hévin, 2019) .	14
Rysunek 2.2.	Mapa występowania soli kamiennej w Polsce (Czapowski i in., 2017)	15
Rysunek 2.3	Schemat ługowania kawerny a) w obiegu prawym oraz b) w obiegu lewym (Warren, 2016).....	17
Rysunek 2.4	Prawidłowy rozwój kawerny podczas ługowania techniką stropowo-boczną (Kunstman i in.,2002)	18
Rysunek 2.5	Ługowanie w systemie komór połączonych (Warren, 2016).....	19
Rysunek 3.1	Głębokości posadowienia oraz kształty kawern magazynujących gaz na świecie (Wang i in., 2014)	21
Rysunek 3.2	Zakres ciśnień roboczych kawerny magazynowej w zależności od głębokości posadowienia kawerny (Caglayan i in., 2020).....	22
Rysunek 3.3.	Przykładowy przebieg ługowania i końcowy kształt komory wynikający z wpływu budowy geologicznej złoża a) pokładowego, b) wysadowego	23
Rysunek 3.4	Proces budowy kawerny magazynowej w złożu pokładowym.....	24
Rysunek 3.5	Optymalne rozmieszczenie kawern magazynowych paliw płynnych w złożu pokładowym (Lankof i in., 2022)	24
Rysunek 3.6	Kawerna używana jako magazyn gazu (Kunstman i in., 2002).....	25
Rysunek 3.7	Kawerny magazynujące substancje ciekłych udostępnione a) jednym otworem, b) dwoma otworami (Kunstman i in., 2009).....	26
Rysunek 4.1	Parametry charakteryzujące fale a) w funkcji czasu, b) w funkcji odległości (Obraz, 1983)	29
Rysunek 4.2	Przykład przedstawiający a) fale płaskie oraz b) fale kuliste (Śliwiński, 2001)..	29
Rysunek 4.3	Prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w oleju napędowym jako funkcja zależna od ciśnienia (Nikolić i in., 2013).....	32
Rysunek 4.4	Zależność prędkości ultradźwięków od temperatury roztworu soli o stężeniu od 0‰ do 200‰ dla ciśnienia 100 atm.....	33
Rysunek 4.5	Prędkość rozchodzenia fali ultradźwiękowej w metanie jako funkcja zależna od temperatury i ciśnienia (Nguyen i in., 2019)	33
Rysunek 4.6	Prędkość rozchodzenia fali ultradźwiękowej w metanie jako funkcja zależna od ciśnienia dla stałej temperatury (Nguyen i in., 2019)	34
Rysunek 4.7	Fale odbite i załamane powstałe przy granicy dwóch ośrodków o różnych twardościach akustycznych.....	35
Rysunek 4.8	Rozkład energii fali padającej na falę pochłoniętą i odbitą od granicy ośrodków o różnej impedancji akustycznej	35
Rysunek 4.9	Wpływ powierzchni zakrzywionej na falę przechodzącą a) b) rozpraszanie, c) d) skupianie.....	36
Rysunek 4.10	Fala ultradźwiękowa padająca na cienką warstwę o grubości g prostopadłą do padającej fali (Kubacka i Nguyen, 2021).....	37
Rysunek 4.11	Zależności współczynników przenikania i odbicia fali ultradźwiękowej od względnej długości fali w stosunku do grubości płyty (Kubacka i Nguyen, 2021)	37
Rysunek 4.12	Graficzne przedstawienie zmiany amplitudy ciśnienia akustycznego dla pola bliskiego i pola dalekiego fali ultradźwiękowej (Dris, 2014)	39
Rysunek 4.13	Wiązki fali ultradźwiękowej jako listki boczne i listek główny (wiązka główna)40	

Rysunek 4.14	Zależność współczynnika osłabienia fal ultradźwiękowych dla etanu w funkcji częstotliwości przy ciśnieniu od 3 do 8 bar na dystansie 72 mm (Martinsson i Delsing, 2002).....	41
Rysunek 4.15	Zmiana długości materiału magnetostrykcyjnego $\Delta L/L$ pod wpływem pola magnetycznego H (Kim i Kwon, 2015).....	43
Rysunek 4.16	Zmiana długości pręta magnetostrykcyjnego w wyniku przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego (Kim i Kwon, 2015).....	43
Rysunek 4.17.	Przebiegi zmian długości materiału magnetostrykcyjnego a) bez wstępnego namagnesowania, b) z namagnesowaniem wstępnym (Kim i Kwon, 2015)	43
Rysunek 4.18	Efekt piezoelektryczny występujący pod wpływem ściskania lub rozciągania materiału piezoelektrycznego oraz odwrotny efekt piezoelektryczny	44
Rysunek 4.19	Przekrój poprzeczny głowicy ultradźwiękowej opartej o przetwornik piezoelektryczny	45
Rysunek 5.1	Zasada pomiaru odległości R echosondy od ściany kawerny	46
Rysunek 5.2	Przebieg sygnału zarejestrowany przez odbiornik ultradźwiękowy, gdzie: t - czas między emisją sygnału nadawczego a rejestracją echa odbitego od ściany kawerny, t_0 – czas emisji sygnału nadawczego rejestrowany przez odbiornik.....	47
Rysunek 5.3	Elementy dotyczące pomiaru echometrycznego odległości przetwornika od powierzchni odbijającej 1) przetwornik ultradźwiękowy, 2) powierzchnia odbijająca, 3) wiązka ultradźwiękowa, 4) zarejestrowany sygnał nadawczy, 5) echo elementarne, α – kąt obrotu przetwornika ultradźwiękowego, φ – kąt generowanej głównej wiązki ultradźwiękowej, φ_e - szerokość echa elementarnego, R – rejestrowana odległość między przetwornikiem a powierzchnią odbijającą, R_e – długość echa elementarnego, R_0 - długość sygnału nadawczego.....	48
Rysunek 5.4	a) Echogram powstały podczas obrotu głowicy ultradźwiękowej wokół osi pionowej, b) kształt obrysu powstałego w wyniku interpretacji echogramu. 1) echa elementarne, 2) linia interpretacyjna, 3) azymut położenia głowicy pomiarowej, 4) głowica pomiarowa, 5) wiązka fali ultradźwiękowej	49
Rysunek 5.5	Składowe profilowania echometryczne w pomiarze geometrii kawerny. 1) Profilowanie pionowe w płaszczyźnie poziomej, 2) profilowanie poziome wokół osi echosondy, 3) profilowanie komory pod kątem przy wychyle głowicy pomiarowej (Figarski i Kubacka, 2017)	50
Rysunek 5.6	a) Przestrzenne rozmieszczenie punktów uzyskanych z interpretacji profilowań echometrycznych wykonanych w kawernie, b) obraz trójwymiarowy mierzonej kawerny.....	51
Rysunek 5.7	Zmiana kształtu i rozmiarów kawerny magazynowej gazu w latach 2011 i 2015 (Wang i in., 2017)	52
Rysunek 5.8	Pomiar echometryczny kawern magazynowych ropy i paliw a) w przypadku komory magazynowej posiadającej dwa uzbrojone otwory; b) w przypadku kawerny udostępnionej jednym otworem 1) rura, 2) wiązka fali, 3) rura manewrowa (Kubacka i Nguyen, 2022).	54
Rysunek 5.9	Strefy kawerny echometrycznie niewidoczne a) podczas wykonywania profilowania poziomego, b) podczas wykonywania profilowania przy wychylonej głowicy pomiarowej.....	55
Rysunek 6.1	Model symulacyjny 2D służący do badania sygnałów odbitych i przechodzących przez stalową warstwę równoległą do płaszczyzny przetwornika.....	57

Rysunek 6.2	Sygnał zarejestrowany przez odbiornik R1 (a) oraz R2 (b) przy braku płyty stalowej w modelu (zielona linia dla fali o częstotliwości 200 kHz, czerwona linia dla fali o częstotliwości 450 kHz).....	57
Rysunek 6.3	Sygnał odbity od płyty stalowej o grubości 10 mm zarejestrowany przez odbiornik R1 (a) oraz sygnał przechodzący przez płytę i zarejestrowany przez odbiornik R2 (b).....	58
Rysunek 6.4	Procentowy iloraz sygnału odbitego od stalowej płyty o różnych grubościach do sygnału przy braku płyty dla fali ultradźwiękowej o częstotliwości 200 i 450 kHz	59
Rysunek 6.5	Procentowy iloraz sygnału transmitowanego przez stalową płytę o różnej grubości do sygnału przy braku płyty dla fali ultradźwiękowej o częstotliwości 200 i 450 kHz.....	59
Rysunek 6.6	Stosunek sygnału przechodzącego do sygnału odbitego, dla fali o częstotliwości 200 i 450 kHz, od stalowej płyty jako funkcja λ/g	60
Rysunek 6.7	Stanowisko laboratoryjne w badaniu przechodzenia fal ultradźwiękowych przez płyty stalowe	61
Rysunek 6.8	Stosunek procentowy rejestrowanych sygnałów fal przechodzących przez płyty o różnej grubości do sygnału rejestrowanego przy braku płyty	62
Rysunek 6.9	Zależność współczynnika transmisji sygnału przez płytę stalową o grubościach wyrazowych w jednostce długości fali.	63
Rysunek 6.10	Zależność współczynnika transmisji sygnału przez płytę stalową o różnej grubości	63
Rysunek 6.11	Zależność współczynnika transmisji sygnału przy płycie stalowej o grubościach wyrazowych w jednostce długości fali	64
Rysunek 6.12	Zmiany amplitudy sygnału transmitowanego w zależności od odległości pomiędzy przetwornikiem a płytą stalową o różnej grubości dla fali o częstotliwości 200 kHz	65
Rysunek 6.13	Zmiany amplitudy sygnału transmitowanego w zależności od odległości pomiędzy przetwornikiem a płytą stalową o różnej grubości dla fali o częstotliwości 450 kHz	65
Rysunek 6.14	Model do badania sygnału odbitego od ściany kawerny z obecnością płyty stalowej	66
Rysunek 6.15	Różnice w czasie i w odległości odbiornika R1 od odbijającej krawędzi zbiornika dla sygnału echa odbitego z sygnału nadawczego o częstotliwości 450 kHz przy płycie stalowej o grubości od 1 mm do 20 mm	68
Rysunek 6.16	Sygnały rejestrowane przez odbiornik R2 przy braku płyty (czarny), po przejściu przez płytę o grubości 8 mm i po odbiciu od ściany (czerwony) oraz po przejściu przez płytę o grubości 6 mm i po odbiciu od ściany (zielony)	68
Rysunek 6.17	Przebieg sygnału o częstotliwości 450 kHz rejestrowany przez odbiornik R1 i echa odbite od ściany modelowego zbiornika przechodzącego przez płytę stalową o grubościach 6 i 8 mm oraz echo dla sygnału o tej samej częstotliwości odbitego od ściany modelowego zbiornika przy braku stalowej przeszkody	69
Rysunek 6.18	Procentowy stosunek amplitudy sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1, po odbiciu od ściany modelu i przejściu przez stalową przeszkodę o grubości od 1 mm do 20 mm do amplitudy sygnału odbitego od ściany modelu przy braku płyty stalowej. Częstotliwość sygnału nadawczego 450 kHz	70

Rysunek 6.19 Sygnał nadawczy; a) sygnał sinusoidalny (burst), b) sygnał z liniową modulacją częstotliwości (LFM).....	70
Rysunek 6.20 Wyniki symulacji dla sygnału nadawczego modulowanego częstotliwościowo w zakresie 100 – 800 kHz i płyty stalowej o grubości 10 mm, a) przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1, b) rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego w modelu, c) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od płyty, d) widmo sygnału odbitego od ściany modelu.....	71
Rysunek 6.21 Wyniki symulacji dla sygnału nadawczego modulowanego częstotliwościowo w zakresie 250 – 350 kHz i płyty stalowej o grubości 10 mm, a) przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1, b) rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego w modelu, c) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od płyty, d) widmo sygnału odbitego od ściany modelu.....	73
Rysunek 6.22 Wyniki symulacji dla sygnału nadawczego typu burst o częstotliwości 290 kHz i płyty stalowej o grubości 10 mm, a) przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1, b) rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego w modelu, c) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od płyty, d) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od ściany modelu	74
Rysunek 6.23 Wyniki symulacji dla sygnału nadawczego modulowanego częstotliwościowo w zakresie 450 - 550 kHz i płyty stalowej o grubości 10 mm, a) przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1, b) rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego w modelu, c) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od płyty, d) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od ściany modelu.....	75
Rysunek 6.24 Wyniki symulacji dla sygnału nadawczego typu burst o częstotliwości 290 kHz i płyty stalowej o grubości 10 mm, a) przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik R1, b) rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego w modelu, c) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od płyty, d) widmo częstotliwościowe sygnału odbitego od ściany modelu	76
Rysunek 6.25 Przebiegi sygnałów zarejestrowanych przez odbiornik R1 dla sygnałów nadawczych o częstotliwościach 30, 47, 100 i 200 kHz przechodzących przez płytę stalową o grubości 10 mm i odbitych od ściany modelu. Linia czarna – sygnał odbity od ściany modelu dla częstotliwości nadawczej 290 kHz	77
Rysunek 6.26 Model do badania rejestracji sygnałów odbitych od ściany kawerny, kiedy sonda pomiarowa znajduje się między stalowymi płytami o grubości 5 mm odległymi od siebie o 127 mm.....	79
Rysunek 6.27 Model do badania rejestracji sygnałów odbitych od ściany kawerny, kiedy sonda pomiarowa znajduje się między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm	80
Rysunek 6.28 Rozkład ciśnienia akustycznego dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a częstotliwość sygnału nadawczego wynosiła 590 kHz.....	80
Rysunek 6.29 Sygnały zarejestrowane przez odbiornik R1 (a) dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a sygnał nadawczy nadawany był z częstotliwością 590 kHz, b) widma częstotliwościowe sygnałów odbitych od płyty, c) widma sygnału ech odbitych od ściany modelu, SR1, SR2 i SR3 – pierwszy, drugi i trzeci sygnał odbity między głowicą a płytą; SRB1, SRB2 i SRB3 – pierwszy, drugi i trzeci sygnał odbity od ściany modelu	81

Rysunek 6.30	Rozkład ciśnienia akustycznego dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a częstotliwość sygnału nadawczego wynosiła 290 kHz	82
Rysunek 6.31	Sygnały zarejestrowane przez odbiornik R1 (a) dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a częstotliwość sygnału nadawczego wynosiła 290 kHz, b) widmo częstotliwościowe sygnałów odbitych od płyty, c) widmo sygnału ech odbitych od ściany modelu	82
Rysunek 6.32	Rozkład ciśnienia akustycznego dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a sygnał nadawczy nadawany był z częstotliwością 590 kHz	83
Rysunek 6.33	Sygnał zarejestrowany przez odbiornik R1 (a) dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona została między płytami o grubości 10 mm odległymi od siebie o 219 mm, a częstotliwość sygnału nadawczego wynosiła 590 kHz, b) widmo częstotliwościowe sygnałów odbitych od płyty, c) widmo sygnału ech odbitych od ściany modelu	84
Rysunek 6.34	Model symulacyjny do badania wpływu promienia rury na kształt wiązki fali. Tx - nadajnik sygnału o częstotliwości 290 kHz, r-promień zewnętrzny wycinka rury odpowiadający połowie jej średnicy	85
Rysunek 6.35	Wizualizacja zmiany kształtu strumienia fali ultradźwiękowej dla rur stalowych o grubości 10 mm i o różnych średnicach: a) bez rury, b) dla rury o średnicy 127 mm, c) dla rury o średnicy 219 mm, d) dla rury o średnicy 273 mm.....	86
Rysunek 6.36	Rozkład kątowy ciśnienia akustycznego wiązki fali ultradźwiękowej w przypadku braku wycinka rury stalowej	87
Rysunek 6.37	Rozkład kątowy ciśnienia akustycznego wiązki fali ultradźwiękowej dla wycinków rury stalowej o grubości 10 mm, ale o różnych średnicach	87
Rysunek 6.38	Model do badania wpływu położenia transmitera Tx w wewnętrznej przestrzeni rury o średnicy zewnętrznej 219 mm i grubości ścianki 10 mm (rzut poziomy).	88
Rysunek 6.39	Przekroje wiązki fali ultradźwiękowej uzyskane z symulacji, kiedy transponder znajduje się w różnej odległości od wewnętrznej ściany rury w jej wnętrzu	88
Rysunek 6.40	Wizualizacja rozkładu ciśnienia fali akustycznej, kiedy transponder Tx znajdował się w odległości 100 mm od wewnętrznej ściany i przesunięciu od osi rury o: a) $\Delta y=0$ mm b) $\Delta y=20$ mm i c) $\Delta y=40$ mm	89
Rysunek 6.41	Rozkład ciśnienia wiązki fali akustycznej dla przypadku, kiedy nadajnik jest przesunięty w osi y w odległości 0, 20 i 40 mm od środka	90
Rysunek 6.42	Dwuwymiarowy model do badania symulacyjnego pomiaru dystansu między głowicą echosondy a ścianą kawerny. Głowica pomiarowa umieszczona wewnątrz rury o średnicy zewnętrznej 219 mm i grubości 10 mm	91
Rysunek 6.43	Rozkład ciśnienia akustycznego dla modelu, w którym głowica ultradźwiękowa umieszczona jest w wewnętrznej przestrzeni rury stalowej o średnicy 219 mm i grubości 10 mm; a) dla częstotliwości nadawania 290 kHz oraz b) częstotliwości nadawania 590 kHz.....	92
Rysunek 6.44	Przebieg sygnału o częstotliwościach 290 oraz 590 kHz rejestrowanego odbiornikiem Rx ₂ umieszczonym za metalową rurą o średnicy 219 mm i grubości 10 mm wraz z przebiegiem sygnału odniesienia	92

- Rysunek 6.45 Przebieg sygnału o częstotliwościach 290 oraz 590 kHz rejestrowanego odbiornikiem Rx₁ umieszczonym wewnątrz stalowej rury o średnicy 219 mm i grubości 10 mm wraz z przebiegiem sygnału odniesienia..... 93
- Rysunek 6.46 Przebieg rejestrowanego sygnału dla częstotliwość sygnału nadawczego wynoszącego 290 kHz zarejestrowanego przez odbiornik Rx₁ przed (linia niebieska) i po filtracji (linia czerwona). 1) sygnał nadawczy, 2) pierwsze echo odbite od ściany rury, 3) kolejne echa wielokrotnie odbite od ściany rury, 4) echo odbite od krawędzi modelu..... 93
- Rysunek 6.47 Przebieg rejestrowanego sygnału o częstotliwości 590 kHz zarejestrowanego przez odbiornik Rx₁ przed (linia niebieska) i po filtracji (linia czerwona). 1) sygnał nadawczy, 2) pierwsze echo odbite od ściany rury, 3) kolejne echa wielokrotnie odbite od ściany rury, 4) echo odbite od krawędzi modelu 94
- Rysunek 6.48 a) Przebieg sygnału echa odbitego wewnątrz przestrzeni rurowej i b) jego widmo częstotliwościowe dla sygnału nadawczego o częstotliwości 590 kHz 94
- Rysunek 6.49 a) Przebieg sygnału echa odbitego od prawej krawędzi modelu, b) jego widmo częstotliwościowe od sygnału nadawczego o częstotliwości 590 kHz 95
- Rysunek 6.50 Stanowisko laboratoryjne do pomiaru odległości od transmittera do ściany zbiornika, kiedy transmittor znajduje się we wewnętrznej przestrzeni stalowej rury; 1) rura z zaznaczonymi punktami pomiarowymi, 2) głowica pomiarowa z nadajnikiem Tx i odbiornikiem Rx, 2a) wzmacniacz sygnału nadawczego, 2b) wzmacniacz sygnału odbiorczego, 3) komputer 4) odbiornik R2, 5) ściana zbiornika 96
- Rysunek 6.51 Zarejestrowane sygnały odbiornikiem R2 przy braku rury – sygnał odniesienia 96
- Rysunek 6.52 Stosunek amplitud sygnałów rejestrowanych przez odbiornik R2 umieszczony poza rurą stalową o nominalnej średnicy 127 mm i grubości ścianki 5,5 mm do sygnału odniesienia w zależności od częstotliwości w przedziale 250 – 700kHz dla trzech różnych punktów pomiarowych 97
- Rysunek 6.53 Stosunek amplitudy sygnałów rejestrowanych przez odbiornik R2 umieszczony poza rurą stalową o nominalnej średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm do sygnału odniesienia w zależności od częstotliwości w przedziale 250 – 700 kHz dla trzech różnych punktów na obwodzie ściany rury na wysokości 60 mm od jej podstawy 98
- Rysunek 6.54 Stosunek amplitudy sygnałów rejestrowanych przez odbiornik R2 umieszczony poza dwoma rurami stalowymi o nominalnych rozmiarach średnicy 127 mm i grubości ścianki 5,5 mm oraz rury o średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm do sygnału odniesienia w zależności od częstotliwości w przedziale 250 – 700kHz dla trzech różnych punktów na ścianie rury zewnętrznej na obwodzie o wysokości 60 mm od jej podstawy 98
- Rysunek 6.55 Stosunek amplitudy sygnałów rejestrowanych przez odbiornik R2 umieszczony poza rurą wykonaną z włókna szklanego o nominalnych rozmiarach średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm do sygnału odniesienia w zależności od częstotliwości w przedziale 250 – 700 kHz dla trzech różnych punktów pomiarowych..... 99
- Rysunek 6.56 Przebieg sygnału zarejestrowany przez odbiornik znajdujący się wewnątrz stalowej rury o nominalnych rozmiarach średnicy 127 mm i grubości 5,5 mm 100

Rysunek 6.57 Stanowisko pomiarowe do pomiaru geometrii zbiornika wypełnionego wodą. 1) basen, 2) zbiornik wypełniony wodą, 3) aluminiowa ściana zbiornika, 4) głowica pomiarowa, 5) rura.....	101
Rysunek 6.58 Przebieg sygnału zarejestrowanego przez odbiornik na punkcie z blachy aluminiowej dla promienia wodzącego o azymucie 203° (punkt nr 19 Tabela 6.21) przy braku rur.....	102
Rysunek 6.59 Kształt zbiornika na wysokości 70 mm określony na podstawie pomiaru ultradźwiękowego przy braku rur	103
Rysunek 6.60 Echo sygnału odbitego od wewnętrznej ściany rury stalowej o średnicy 219 mm i grubości 10 mm otrzymane dla sygnału nadawczego o częstotliwości 300 kHz, o czasie trwania 5 μ s.....	104
Rysunek 6.61 Widmo częstotliwościowe sygnału echa odbitego od wewnętrznej ściany rury stalowej o średnicy 219 mm i nominalnej grubości 10 mm otrzymane dla sygnału nadawczego o częstotliwości 300 kHz, o czasie trwania 5 μ s, z zaznaczoną częstotliwością rezonansową 293,4 kHz.....	104
Rysunek 6.62 Przebieg sygnału zarejestrowany przez głowicę pomiarową, która znajdowała się wewnątrz stalowej rury 5", dla częstotliwości 512 kHz, dla kąta 203° (pozycja pomiarowa nr 19).....	105
Rysunek 6.63 Kontur zbiornika wyznaczony na podstawie pomiaru bez obecności rury (linia niebieska) oraz w przypadku, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz nominalnej rury stalowej o średnicy 127 mm i grubości 5,5 mm (linia czerwona). Częstotliwość sygnału nadawczego odpowiadała pierwszej częstotliwości rezonansowej.....	106
Rysunek 6.64 Przebieg sygnału zarejestrowany przez głowicę pomiarową, która znajdowała się wewnątrz stalowej rury o nominalnej średnicy 219 mm i grubości 10 mm, dla kąta 203° (pozycja pomiarowa nr 19), dla pierwszej częstotliwości rezonansowej 277 kHz.....	107
Rysunek 6.65 Przebieg sygnału zarejestrowany przez głowicę pomiarową, która znajdowała się wewnątrz stalowej rury o nominalnej średnicy 219 mm i grubości 10 mm, dla kąta 203° (pozycja pomiarowa nr 19), dla drugiej częstotliwości rezonansowej 610 kHz	107
Rysunek 6.66 Kontur zbiornika wyznaczony na podstawie pomiaru bez obecności rury (linia niebieska) oraz w przypadku, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz nominalnej rury stalowej o średnicy 219 mm i grubości 10 mm z wykorzystaniem sygnału nadawczego o pierwszej (linia czerwona) i drugiej (linia żółta) częstotliwościach rezonansowych.....	110
Rysunek 6.67 Przebieg sygnału zarejestrowany przez głowicę pomiarową przy kącie 203° (punkt pomiarowy 19); głowica znajdowała się wewnątrz rury z włókna szklanego o nominalnych rozmiarach średnicy 219 mm i grubości 10 mm przy częstotliwości nadawania 363 kHz.....	111
Rysunek 6.68 Przebieg sygnału zarejestrowany przez głowicę pomiarową przy kącie 203° (punkt pomiarowy 19); głowica znajdowała się wewnątrz rury z włókna szklanego o nominalnych rozmiarach średnicy 219 mm i grubości 10 mm przy częstotliwości nadawania 553 kHz.....	111
Rysunek 6.69 Kontur zbiornika wyznaczony na podstawie pomiaru bez obecności rury (linia niebieska) oraz w przypadku, kiedy głowica pomiarowa znajduje się we wnętrzu nominalnej rury wykonanej z włókna szklanego o średnicy 219 mm i grubości	

	10 mm z wykorzystaniem sygnału nadawczego o drugiej (linia czerwona) lub trzeciej (linia żółta) częstotliwościach rezonansowych	114
Rysunek 6.70	Rozkład różnic w wynikach pomiaru odległości ściany zbiornika w przypadku umieszczenia głowicy pomiarowej w rurach dla sygnału nadawczego równego pierwszej (f_1), drugiej (f_2) lub trzeciej (f_3) częstotliwości rezonansowej w stosunku do pomiaru bez obecności rury. Przedziały wypełnione kolorem zawierają 50% wyników.	115
Rysunek 7.1	Model symulacyjny wykonany w programie OnScale™ przedstawiający dwuwymiarowy zbiornik wypełniony wodą, w którym umieszczono głowicę pomiarową z nadajnikiem ultradźwiękowym Tx i stalową płytę o grubości d oraz R_{x1} – odbiornik sygnału odbitego od płyty stalowej i R_{x2} – odbiornik sygnału transmitowanego przez płytę	117
Rysunek 7.2	Przykładowy zarejestrowany sygnał odbity od metalowej płyty o grubości 6 mm (kolor czerwony) oraz sygnał transmitowany przez płytę (kolor zielony) – a) i jego widmo częstotliwościowe – b).....	118
Rysunek 7.3	Wartości współczynnika relacji dla płyt stalowych o różnych grubościach dla pierwszej, drugiej i trzeciej częstotliwości rezonansowej.....	119
Rysunek 7.4	Rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego dla symulowanego modelu z zaznaczonymi przekrojami: D1-D1' odległość 50 mm od czoła głowicy pomiarowej; D2-D2' odległość 100 mm od czoła głowicy pomiarowej; a) sygnał o częstotliwości 300 kHz, b) sygnał o częstotliwości 600 kHz	119
Rysunek 7.5	Rozkład ciśnienia względem osi wiązki fali ultradźwiękowej w odległości 50 mm (D1) i 100 mm (D2) od czoła głowicy pomiarowej dla częstotliwości nadajnika a) 300 kHz b) 600 kHz.....	120
Rysunek 7.6	Stanowisko laboratoryjne do pomiaru grubości płyt stalowych metodą ultradźwiękową. Zbiornik wypełniony wodą, w której umieszczono: 1) płytę stalową oraz 2) głowicę pomiarową wraz ze wzmacniaczem sygnału nadawczego 2a) oraz wzmacniaczem sygnału odbiorczego 2b), podłączone do 3) oscyloskopu i generatora sygnału	121
Rysunek 7.7	Rejestrowane przebiegi sygnałów odbitych od stalowej płyty o grubości 10,1 mm; a) dla sygnału nadawczego o częstotliwościach 270 - 320 kHz oraz b) dla sygnału nadawczego o częstotliwościach 560 - 630 kHz, c) widma częstotliwościowe sygnałów odbitych o częstotliwościach 270 - 320 kHz; d) widma częstotliwościowe sygnałów odbitych o częstotliwościach 560 - 630 kHz.....	122
Rysunek 7.8	Wartości dla pierwszych a) b) c) i drugich d) e) f) częstotliwości rezonansowych z przedziałami zmienności dla płyt stalowych o różnej grubości	123
Rysunek 7.9	Relacja między grubościami płyt zmierzonymi za pomocą grubościomierza cyfrowego a grubościami płyt obliczonymi z wykorzystaniem częstotliwości rezonansowych oraz odpowiednich współczynników relacji	124
Rysunek 7.10	Stanowisko laboratoryjne do pomiaru grubości rury stalowej, w skład którego wchodzi 1) badana rura, 2) głowica pomiarowa wraz ze wzmacniaczem sygnału nadawczego, 2a) oraz wzmacniaczem sygnału odbiorczego, 2b), podłączone do 3) oscyloskopu i generatora sygnału.....	125
Rysunek 7.11	Pomiar grubości ścianki rury metodą ultradźwiękową	126
Rysunek 7.12	Rejestrowane przebiegi sygnałów odbitych od ścianki rury stalowej o nominalnych rozmiarach 219 mm i grubości 10 mm a) dla sygnału nadawczego o częstotliwościach 280 - 350 kHz oraz b) dla sygnału nadawczego	

	o częstotliwościach 600 - 680 kHz; c) widmami częstotliwościowymi sygnałów o częstotliwościach 280 - 350 kHz; d) widmami częstotliwościowymi sygnałów o częstotliwościach 600 - 680 kHz	127
Rysunek 7.13	Grubości ścianki stalowej rury o średnicy 219 mm i nominalnej grubości 10 mm w punktach pomiarowych obliczone na bazie wartości pierwszej częstotliwości rezonansowej i odpowiedniego współczynnika relacji (niebieskie) oraz grubości rury w tych samych punktach zmierzone grubościomierzem cyfrowym (żółte)	128
Rysunek 7.14	Różnice między grubościami rury zmierzonymi za pomocą grubościomierza cyfrowego a grubościami rury określoną techniką ultradźwiękową przy pierwszej częstotliwości rezonansowej dla wszystkich punktów pomiarowych.....	128
Rysunek 7.15	Grubości ścianki stalowej rury o średnicy 219 mm i nominalnej grubości 10 mm w punktach pomiarowych obliczone na bazie wartości drugiej częstotliwości rezonansowej i odpowiedniego współczynnika relacji (niebieskie) oraz grubości rury w tych samych punktach zmierzone grubościomierzem cyfrowym (żółte)	129
Rysunek 7.16	Różnice między grubościami rury zmierzonymi za pomocą grubościomierza cyfrowego a grubościami rury określoną techniką ultradźwiękową przy drugiej częstotliwości rezonansowej dla wszystkich punktów pomiarowych.....	129
Rysunek 7.17	Grubości na pomiarowych punktach ścianki stalowej rury o średnicy 219 mm i nominalnej grubości 10 mm uśrednionych z grubości otrzymanych przy pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej z ich współczynnikami relacji (niebieskie) wraz z grubościami ścianki rury w tych samych punktach pomiarowych otrzymanymi za pomocą grubościomierza cyfrowego (żółte)	130
Rysunek 7.18	Różnice między grubościami rury zmierzonymi za pomocą grubościomierza cyfrowego a grubościami rury określoną techniką ultradźwiękową dla uśrednionych wyników otrzymanych przy pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej dla wszystkich punktów pomiarowych.....	130
Rysunek 7.19	Przekrój stalowej rury o średnicy 219 mm na wysokości 60 mm od jej podstawy sporządzony na podstawie rejestracji czasów sygnałów odbitych od wewnętrznej ściany rury i uśrednionych grubości dla pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej.....	131
Rysunek 7.20	Mapa grubości ścianki rury stalowej o średnicy nominalnej 219 mm i grubości 10 mm na wysokości od 20 mm do 80 mm sporządzona z danych otrzymanych z pomiaru metodą ultradźwiękową z użyciem pierwszej częstotliwości rezonansowej i odpowiadającego współczynnika relacji.....	132
Rysunek 7.21	Mapa grubości ścianki rury stalowej o średnicy nominalnej 219 mm i grubości 10 mm na wysokości od 20 mm do 80 mm sporządzona z danych otrzymanych z pomiaru metodą ultradźwiękową z użyciem drugiej częstotliwości rezonansowej i współczynnika relacji	132
Rysunek 7.22	Mapa grubości ścianki rury stalowej o rozmiarach nominalnych średnicy 219 mm i grubości 10 mm na wysokościach 20 - 80 mm sporządzona z uśrednionych danych otrzymanych z pomiaru metodą ultradźwiękową z użyciem pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej i współczynnika relacji.....	132
Rysunek 7.23	Mapa grubości ścianki rury stalowej o średnicy nominalnej 219 mm i grubości 10 mm na wysokościach 20 - 80 mm sporządzona na podstawie danych otrzymanych z pomiaru elektronicznym grubościomierzem cyfrowym	132
Rysunek 7.24	Mapa rozkładu różnicy między grubościami ścianki rury stalowej o średnicy 219 mm na odcinku wysokości 20 - 80 mm zmierzonych grubościomierzem	

	elektronicznym a grubościami zmierzonymi metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem pierwszej częstotliwości rezonansowej.....	133
Rysunek 7.25	Mapa rozkładu różnicy między grubościami ścianki rury stalowej o średnicy 219 mm na odcinku wysokości 20 - 80 mm zmierzonych grubościomierzem elektronicznym a grubościami zmierzonymi metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem drugiej częstotliwości rezonansowej.....	133
Rysunek 7.26	Mapa rozkładu różnicy między grubościami ścianki rury stalowej o średnicy 219 mm na odcinku wysokości 20 - 80 mm zmierzonych grubościomierzem elektronicznym a grubościami uśrednionymi zmierzonymi metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem pierwszej i drugiej częstotliwości rezonansowej.....	133
Rysunek 7.27	Rozkłady różnic pomiędzy grubościami zmierzonymi elektronicznym grubościomierzem cyfrowym a grubościami otrzymanymi z wykorzystaniem pierwszej oraz drugiej częstotliwości rezonansowej i z uśrednienia wyników z otrzymanych pomiarów z powyższymi częstotliwościami rezonansowymi ...	134
Rysunek 7.28	Grubości ścianki rury o nominalnej średnicy 129 mm i grubości ścianki 5,5 mm na punktach pomiarowych mierzone przy użyciu pierwszej częstotliwości rezonansowej (niebieski) wraz z grubościami ścianki tej rury w tych samych punktach zmierzonymi elektroniczną suwmiarką cyfrową (żółty)	135
Rysunek 7.29	Różnice między grubościami ścianki odcinka rury stalowej nominalnej średnicy 129 mm i grubości ścianki 5,5 mm mierzonymi suwmiarką cyfrową a grubościami tego odcinka określonymi metodą ultradźwiękową z użyciem pierwszej częstotliwości rezonansowej.....	135
Rysunek 7.30	Grubości ścianki rury z włókna szklanego o nominalnej średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm na punktach pomiarowych mierzone przy użyciu drugiej częstotliwości rezonansowej (niebieski) wraz z grubościami ścianki tej rury w tych samych punktach zmierzonymi elektroniczną suwmiarką cyfrową (żółty)	136
Rysunek 7.31	Różnice między grubościami ścianki odcinka rury wykonanej z włókna szklanego o nominalnej średnicy 219 mm i grubości ścianki 10 mm mierzonymi suwmiarką cyfrową a grubościami tego samego obwodu określonymi metodą ultradźwiękową z użyciem drugiej częstotliwości rezonansowej	136
Rysunek 8.1	Schemat blokowy aparatury naziemnej i echosondy do geometryzacji podziemnych kawern solnych.....	138
Rysunek 8.2	Schemat blokowy komunikacji między poszczególnymi elementami zestawu pomiarowego.....	139
Rysunek 8.3	Schemat budowy echosondy ultradźwiękowej	141
Rysunek 8.4	Wymiary echosondy ultradźwiękowej oraz lokalizacja punktów zapisu danych pomiarowych.....	142
Rysunek 8.5	Schemat blokowy układu pomiarowego do testowania przesyłania danych przez kabel geofizyczny	145
Rysunek 8.6	Numeracja żył kabla geofizycznego	145
Rysunek 8.7.	Stanowisko do testowania przetworników ultradźwiękowych; 1) zbiornik wypełniony wodą, 2) głowica ultradźwiękowa, 3) metalowe ściany o grubości 10 mm	147
Rysunek 8.8	Echogram - pomiar najmniejszej mierzalnej odległości przetwornika ultradźwiękowego dla częstotliwości 200kHz	147

Rysunek 8.9	Przebieg sygnału – pomiar odległości na podstawie ech wielokrotnych dla częstotliwości 200 kHz	148
Rysunek 8.10	Przebieg sygnału w pomiarze odległości na podstawie ech wielokrotnych dla częstotliwości 450 kHz	148
Rysunek 8.11	Przebieg sygnału w pomiarze odległości w powietrzu o ciśnieniu atmosferycznym i temperaturze 20°C przy emisji sygnału ultradźwiękowego o częstotliwości 30 kHz.....	150
Rysunek 8.12	Schemat pokazujący zasadę działania czujnika do pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej w danym medium. 1) przetwornik ultradźwiękowy z nadajnikiem i odbiornikiem, 2) powierzchnia odbijająca sygnał	151
Rysunek 8.13	Przebieg napięcia podczas testów czujnika CCL.....	152
Rysunek 8.14	Krzywe profilowania a) temperatury i b) prędkości fali ultradźwiękowej w wybranym odcinku głębokości 200 – 460 m p.p.t.	154
Rysunek 8.15	Krzywe profilowania a) lokalizacji miejsc połączenia i końca rur za pomocą CCL oraz b) ciśnienia w wybranym odcinku głębokości 200 – 460 m p.p.t.	155
Rysunek 8.16	Echogramy profilowań pionowych z wykorzystaniem częstotliwości nadawania a) 200kHz oraz b) 450kHz w interwale pomiarowym 401,0 - 411,0 m p.p.t., pozioma linia żółta zaznacza granicę między górnym odcinkiem zarurowanym od dolnego bosego odcinka w otworze	156
Rysunek 8.17	Echogramy profilowań pionowych z wykorzystaniem częstotliwości nadawania a) 200kHz oraz b) 450kHz w interwale pomiarowym 409,0 - 419,0 m p.p.t. Linia żółtą zaznaczono głębokość stropu kawerny	157
Rysunek 8.18	Profil poziomy komory wykonany na głębokości 460 m p.p.t dla częstotliwości nadawania a) 200 kHz i b) 450 kHz. L- odległość echosondy od ściany kawerny na dla jednego azymutu.	158
Rysunek 8.19	Echogramy profilowań poziomych AutoInter-Chemkop™ na głębokości 470 m p.p.t. w doświadczalnej kawernie a) otrzymany z użyciem dotychczas używanej echosondy; b) otrzymany z użyciem nowej echosondy.....	159
Rysunek 8.20	a) Przekrój pionowy sporządzony dla kątów 90° i 270° na odcinku 412,5 – 480,0 m p.p.t oraz b) przekrój poziomy na głębokości 430 m p.p.t. kawerny doświadczalnej (linia czarna z pomiarów nową sondą; linia czerwona z pomiaru dotychczasową sondą.....	160
Rysunek 8.21	a) Przekrój pionowy sporządzony dla kątów 180° i 0° na odcinku 840,0 - 871,52 m p.p.t oraz b) przekrój poziomy na głębokości 845 m p.p.t. kawerny doświadczalnej (linia czarna z pomiarów nową sondą; linia czerwona z pomiaru dotychczasową sondą).....	160

Spis tabel

Tabela 2.1.	Własności fizyczne głównych minerałów występujących w złożu solnym. (Kunstman i in., 2002).....	12
Tabela 2.2	Struktura i tekstura głównych skał w złożach solnych (Gruszczyk, 1984).....	13
Tabela 4.1	Wartości parametrów sprężystości i prędkości rozchodzenia ultradźwięków w niektórych wybranych materiałach (Obraz, 1983)	31
Tabela 4.2	Prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w wybranych cieczach o temperaturze 20°C i 0°C pod ciśnieniem normalnym (Śliwiński, 2001).....	31
Tabela 4.3	Wybrane wartości kąta ϕ	39
Tabela 4.4	Współczynniki tłumienia fal ultradźwiękowych powietrza, wody destylowanej i wybranych materiałów stałych (Obraz, 1983; Han i in., 2021).....	41
Tabela 4.5	Odkształcenia liniowe wybranych materiałów magnetostrykcyjnych (Bras i Greneche, 2017)	42
Tabela 6.1	Amplitudy sygnałów zarejestrowanych bezpośrednio przez odbiorniki R1 i R2 przy braku płyty stalowej w modelu.....	57
Tabela 6.2	Amplitudy sygnałów rejestrowanych przez odbiorniki R1 i R2 w zbiorniku wodnym z płytą stalową o różnej grubości	58
Tabela 6.3	Własności sprężyste materiałów używanych w badaniach laboratoryjnych	61
Tabela 6.4.	Amplitudy rejestrowanego sygnału fali z różną częstotliwością przechodzącej przez stalową płytę o różnej grubości	62
Tabela 6.5	Zmierzone sygnały fal ultradźwiękowych po przechodzeniu przez stalowe płyty.	64
Tabela 6.6	Zestawienie czasu odbioru echa, amplitudy oraz mierzonej odległości odbiornika R1 od ściany modelu dla częstotliwości nadajnika 450 kHz dla płyt o grubości od 1 mm do 20 mm.....	67
Tabela 6.7	Czas przyjscia ech sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału nadawczego modulowanego częstotliwościowo w zakresie 100 – 800 kHz	72
Tabela 6.8	Odległości pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczone w oparciu o czasy przyjscia sygnałów pierwszego (290 kHz) i drugiego (590 kHz) odbitych od ściany do odbiornika R1 przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnice w odległościach w odniesieniu do odległości obliczonej w przypadku braku stalowej przeszkody	72
Tabela 6.9	Czas przyjscia echa sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału modulowanego częstotliwościowo w zakresie 250 – 350 kHz.....	73
Tabela 6.10	Odległość pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczona w oparciu o czas przyjscia sygnału do R1 odbitego od ściany przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnica odległości obliczonej przy braku stalowej przeszkody	74
Tabela 6.11	Czas przyjscia echa sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału typu burst o częstotliwości 290 kHz.	74
Tabela 6.12	Odległość pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczona w oparciu o czas przyjscia sygnału do R1 odbitego od ściany przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnica odległości obliczonej przy braku stalowej przeszkody	75

Tabela 6.13	Czas przyścia echa sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału modulowanego częstotliwościowo w zakresie 550 - 650 kHz.....	76
Tabela 6.14	Odległość pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczona w oparciu o czas przyścia sygnału do R1 odbitego od ściany przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnica odległości obliczonej przy braku stalowej przeszkody	76
Tabela 6.15	Czas przyścia echa sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału typu burst o częstotliwości 590 kHz.	77
Tabela 6.16	Odległość pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczona w oparciu o czas przyścia sygnału do R1 odbitego od ściany przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnica odległości obliczonej przy braku stalowej przeszkody	77
Tabela 6.17	Czas przyścia echa sygnałów odbitych od ściany modelu zarejestrowane przez odbiornik R1 dla płyty o grubości 10 mm i sygnału typu burst o częstotliwości 30, 47, 100 oraz 200 kHz.....	78
Tabela 6.18	Odległość pomiędzy odbiornikiem R1 a ścianą modelu obliczona w oparciu o czas przyścia sygnału do R1 odbitego od ściany przy obecności stalowej płyty o grubości 10 mm i różnica odległości obliczonej przy braku stalowej przeszkody	78
Tabela 6.19	Zestawienie zmierzonych czasów i obliczonych odległości od głowicy umieszczonej wewnątrz rur od ściany zbiornika.....	100
Tabela 6.20	Zarejestrowane czasy ech odbitych przy braku rury i obliczone odległości sondy od blachy aluminiowej na punktach pomiarowych	102
Tabela 6.21	Rejestrowane czasy sygnału echa odbitego i obliczone odległości wraz z dobranymi częstotliwościami dla przypadku, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz rury stalowej o rozmiarach nominalnych średnicy 127 mm i grubości 5,5 mm przy użyciu sygnału nadawczego odpowiadającego pierwszej częstotliwości rezonansowej	105
Tabela 6.22	Wyniki pomiaru odległości między głowicą pomiarową a aluminiową ścianą zbiornika w sytuacji, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz rury stalowej o rozmiarach nominalnych średnicy 219 mm i grubości 10 mm dla sygnału nadawczego odpowiadającego pierwszej częstotliwości rezonansowej f1	108
Tabela 6.23	Wyniki pomiaru odległości między głowicą pomiarową a aluminiową ścianą zbiornika w sytuacji, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz rury stalowej o rozmiarach nominalnych średnicy 219 mm i grubości 10 mm dla sygnału nadawczego odpowiadającego drugiej częstotliwości rezonansowej f2	109
Tabela 6.24	Wyniki pomiaru odległości między głowicą pomiarową a aluminiową ścianą zbiornika w sytuacji, kiedy głowica pomiarowa znajduje się wewnątrz rury z włókna szklanego o rozmiarach nominalnych średnicy 219 mm i grubości 10 mm dla sygnału nadawczego odpowiadającego drugiej częstotliwości rezonansowej f2 .	112
Tabela 6.25	Wyniki pomiaru odległości między głowicą pomiarową a aluminiową ścianą zbiornika w sytuacji, kiedy głowica pomiarowa znajduje się we wnętrzu rury z włókna szklanego o rozmiarach nominalnych średnicy 219 mm i grubości 10 mm dla sygnału nadawczego odpowiadającego trzeciej częstotliwości rezonansowej f3	113
Tabela 7.1	Właściwości materiałów w badaniach symulacyjnych.....	117
Tabela 7.2	Częstotliwości rezonansowe określone na podstawie przeprowadzonych symulacji oraz częstotliwości rezonansowe teoretycznie obliczone dla płyty stalowej o różnej	

	grubości i współczynnik relacji między tymi wartościami (Kubacka i Nguyen, 2024)	118
Tabela 7.3	Zasięg pola bliskiego i rozmiary szerokości wiązki ultradźwiękowej w odległości 50 mm i 100 mm od czoła głowicy pomiarowej dla częstotliwości nadajnika 300kHz i 600kHz.	120
Tabela 7.4	Grubości płyt stalowych zmierzone grubościomierzem oraz metodą ultradźwiękową	124
Tabela 7.5	Zmierzone grubości ścianki, częstotliwości rezonansowe, obliczone prędkości i średnia prędkość fali ultradźwiękowej badanych rur	126
Tabela 8.1	Parametry pomiarowe echosondy ultradźwiękowej	143
Tabela 8.2	Parametry pulpitu sterującego	143
Tabela 8.3	Parametry elektryczne kabla Camesa 7H42RP	144
Tabela 8.4	Ocena jakości przesyłania danych oparta na stosunku sygnału do szumu	146
Tabela 8.5	Wyniki pomiaru odległości ech wielokrotnych w zbiorniku testowym dla częstotliwości 200 i 450 kHz	149
Tabela 8.6	Pomiar temperatury wykonany czujnikiem temperatury w porównaniu oraz wskazania termometru wzorcowego	150
Tabela 8.7	Ciśnienia pokazane na czujniku ciśnienia umieszczonym w echosondzie oraz wskazania manometru wzorcowego	150
Tabela 8.8	Prędkości rozchodzenia fali ultradźwiękowej w roztworze NaCl o natężeniu 25% i temperaturze 23 °C zmierzone przyrządem pomiarowym i obliczone wg Medwina (1975).	151

Spis treści

Podziękowania.....	3
Streszczenie.....	4
Abstract.....	7
1 Wprowadzenie.....	10
2 Sole kamienne.....	12
2.1 Występowanie złóż soli kamiennej.....	13
2.2 Metody eksploatacyjne złóż soli	16
3 Kawerny magazynowe.....	21
3.1 Podział magazynów w złożach soli.....	25
3.1.1 Kawerny magazynowe gazu.....	25
3.1.2 Kawerny magazynowe substancji ciekłych.....	26
4 Ultradźwięki	28
4.1 Rozchodzenie się fal ultradźwiękowych	28
4.2 Prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych.....	30
4.3 Współczynniki odbicia i przenikania	34
4.4 Przenikanie fal przez przegrodę warstwową	36
4.5 Geometria fali ultradźwiękowej	37
4.6 Tłumienie fal ultradźwiękowych.....	40
4.7 Przetworniki ultradźwiękowe.....	41
4.7.1 Przetworniki magnetostrykcyjne.....	42
4.7.2 Przetworniki piezoelektryczne	43
4.8 Głowice ultradźwiękowe.....	44
5 Metody pomiarowe parametrów geometrycznych kawern solnych.....	46
5.1 Pomiary echometryczne	46
5.1.1 Pomiary echometryczne w kawernach magazynowych.....	51
5.2 Zalety i ograniczenia pomiarów echometrycznych.....	54
6 Badanie metody pomiarowej geometrii kawern przy obecności stalowych rur eksploatacyjnych	56
6.1 Badania symulacyjne transmisji fal ultradźwiękowych przez warstwową przeszkodę stalową.....	56
6.2 Pomiary laboratoryjne przy obecności stalowej płyty.....	60
6.3 Pomiary transmisji sygnału ultradźwiękowego przez płytę równoległą	61
6.4 Badanie wpływu odległości przetwornika ultradźwiękowego od płyty stalowej na rejestrowany sygnał transmisyjny	64

6.5	Badania symulacyjne wpływu grubości warstwy stalowej i typu sygnału nadawczego na pomiar odległości nadajnika od ściany kawerny.....	66
6.5.1	Wpływ grubości płyty na czas i amplitudę rejestrowanego echa odbitego od ściany zbiornika.....	66
6.5.2	Badania wpływu postaci sygnału nadawczego na amplitudę echa odbitego od ściany i na jego czas przyścia do odbiornika	70
6.5.3	Symulacja pomiarów odległości w przypadku, kiedy przetwornik umieszczony jest między dwoma równoległymi płytami.....	79
6.6	Symulacyjne badanie wpływu rury o różnej średnicy na kształt wiązki fali ultradźwiękowej	84
6.6.1	Badanie wpływu położenia przetwornika w wewnętrznej przestrzeni rury na wiązkę fali ultradźwiękowej	88
6.7	Pomiary odległości, kiedy sonda pomiarowa znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rury	90
6.7.1	Symulacja pomiarów odległości, kiedy sonda pomiarowa znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rury eksploatacyjnej.....	91
6.8	Laboratoryjne pomiary amplitudy sygnału w sytuacji, kiedy echosonda umieszczona jest w wewnętrznej przestrzeni rury.....	95
6.9	Laboratoryjne pomiary geometrii zbiornika, kiedy echosonda znajduje się w wewnętrznej przestrzeni rury	101
7	Pomiary grubości rur stalowych przy użyciu echosondy ultradźwiękowej	116
7.1	Symulacyjne określenie częstotliwości rezonansowych sygnału przechodzącego przez płytę.....	116
7.2	Badania symulacyjne szerokości wiązki ultradźwiękowej.....	119
7.3	Laboratoryjne pomiary grubości płyt stalowych.....	121
7.4.	Pomiary laboratoryjne grubości rur.....	125
8	Nowy zestaw do pomiaru geometrii kawern metodą ultradźwiękową opracowany przez zespół firmy „Chemkop”	137
8.1	Zestaw pomiarowy	138
8.1.1	Echosonda ultradźwiękowa.....	139
8.1.2	Pulpit sterujący.....	143
8.1.3	Oprogramowanie pomiarowe.....	143
8.2	Testy funkcjonalne aparatury pomiarowej	144
8.2.1	Przesyłanie danych pomiarowych przez kabel geofizyczny	144
8.2.2	Testowanie przetworników ultradźwiękowych.....	146
8.2.3	Pomiar temperatury	150
8.2.4	Pomiar ciśnienia	150

8.2.5	Pomiar prędkości propagacji fali ultradźwiękowej	150
8.2.6	Test modułu CCL (Casing Collar Locator)	151
8.3	Testy otworowe	153
8.4	Przygotowanie do pomiarów geometrii kawerny przez rurę eksploatacyjną	161
9	Podsumowanie	163
	Bibliografia	168
	Spis rysunków	172
	Spis tabel	183

