



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta
Katedra fyziky, techniky a chemie

Bakalářská práce

Měření rychlosti zvuku v kapalinách hydrofony

Vypracoval: Jan Havle
Vedoucí práce: Mgr. Vladimír Vochozka, Ph.D.

České Budějovice 2026

Prohlášení

Prohlašuji,

že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů. Dále prohlašuji, že při přípravě předložené práce byly použity následující nástroje generativní AI uvedeným způsobem/uvedenými způsoby: V kvalifikační práci byl použit nástroj Google režim AI a Chat GPT v období 20. 4. 2026 – 2. 5. 2026. Nástroje jsem použil k vyhledávání tabulkových hodnot rychlosti zvuku při konkrétních teplotách v měřených kapalinách a k vyhledávání vhodných zdrojů k tématu této kvalifikační práce. Výstupy jsem následně zkontroloval, případně upravil, ověřil jejich správnost a přebírám za obsah práce plnou odpovědnost.

V Českých Budějovicích dne

Podpis:

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mě během zpracování mé bakalářské práce podporovali a pomáhali mi.

Mé poděkování patří především vedoucímu práce Mgr. Vladimíru Vochozkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, ochotu a trpělivost, které mi věnoval.

Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům a blízkým za jejich podporu, povzbuzení a trpělivost během celého mého studia.

V neposlední řadě děkuji také všem, kteří mi poskytli pomoc, podnětné připomínky nebo jiným způsobem přispěli k dokončení této práce.

Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá měřením rychlosti zvuku v kapalinách s využitím akustického piezoelektrického měniče (hydrofonu) a programu Audacity. Hlavním cílem práce je ověřit, zda lze pomocí této jednoduché experimentální metody názorně demonstrovat měření rychlosti zvuku na krátkých vzdálenostech a využít ji ve výuce fyziky jako alternativu k běžně používaným metodám, které zpravidla vyžadují větší měřicí vzdálenosti. Současně práce zkoumá vliv druhu kapaliny a teploty na rychlost šíření zvuku a porovnává experimentálně získané hodnoty s údaji uváděnými v odborné literatuře.

Měření jsou realizována ve vodě, řepkovém oleji, technickém lihu a solném roztoku v teplotním rozmezí 20-60 °C s krokem 10 °C. K určení rychlosti zvuku je využita analýza časového zpoždění zaznamenaných akustických impulzů v programu Audacity. Výsledky ukazují, že naměřené rychlosti zvuku odpovídají očekávaným fyzikálním vlastnostem jednotlivých kapalin a vykazují pouze malé odchylky od literárních údajů. Nejvyšší rychlosti jsou zaznamenány v solném roztoku, následuje voda, řepkový olej a technický líh. Ve všech případech je dosažena dobrá shoda s teoretickými hodnotami, což potvrzuje správnost použité metodiky i dostatečnou přesnost měření na krátkých vzdálenostech.

Práce prokazuje, že navržená metoda je vhodná pro výuku fyziky, protože umožňuje názorně studovat šíření zvuku i v podmínkách, kde nelze využít velké měřicí vzdálenosti. Její výhodou jsou nízké náklady, jednoduché technické vybavení a dostatečná přesnost výsledků. Současně se ukazuje, že metoda je citlivá na lidský faktor, zejména při vyhodnocování časových údajů a zpracování naměřených dat, což může ovlivnit výslednou přesnost měření.

Klíčová slova:

Tabulkové hodnoty, naměřené hodnoty, vypočtená odchylka, voda, solný roztok, technický líh, olej, Audacity, teplota

Abstract:

This bachelor's thesis deals with the measurement of the speed of sound in liquids using an acoustic piezoelectric transducer (hydrophone) and the Audacity software. The main objective of the thesis is to verify whether this simple experimental method can be used to demonstrate the measurement of the speed of sound over short distances and serve as an alternative to commonly used methods in physics education, which usually require longer measurement distances. At the same time, the thesis investigates the influence of the type of liquid and temperature on the speed of sound and compares the experimentally obtained values with data reported in the scientific literature.

Measurements are carried out in water, rapeseed oil, denatured alcohol, and a saline solution over a temperature range of 20-60 °C with a step of 10 °C. The speed of sound is determined by analyzing the time delay of recorded acoustic pulses using the Audacity software.

The results show that the measured speeds of sound correspond to the expected physical properties of the individual liquids and exhibit only small deviations from values reported in the literature. The highest speeds of sound are recorded in the saline solution, followed by water, rapeseed oil, and denatured alcohol. In all cases, good agreement with theoretical values is achieved, which confirms both the validity of the applied methodology and the sufficient accuracy of the measurements over short distances.

The study demonstrates that the proposed method is suitable for physics education because it enables a clear investigation of sound propagation even under conditions where large measurement distances cannot be used. Its advantages include low cost, simple technical equipment, and sufficient measurement accuracy. At the same time, the method proves to be sensitive to human factors, particularly during the evaluation of time-delay data and the processing of measured results, which may affect the overall accuracy of the measurements.

Keywords:

Table values, measured values, calculated deviation, water, saline solution, technical alcohol, oil, Audacity, temperature

Obsah

Úvod.....	7
1 Zvuk.....	8
1.1 Rychlost zvuku.....	8
1.1.1 Historie měření rychlosti zvuku.....	8
1.1.2 Metody měření rychlosti zvuku	11
2 Měření rychlosti zvuku v kapalinách	14
3 Experimentální pomůcky a metodika práce	15
3.1 Příprava pomůcek pro měření rychlosti zvuku	15
3.1.1 Hydrofony	15
3.1.2 Ověření funkčnosti hydrofonu a řešení technických problémů	17
3.1.3 Termostat.....	18
3.2 Ostatní experimentální pomůcky	20
3.3 Audacity	21
3.4 Průběh měření	23
4 Výsledky a zpracování vlastního měření.....	24
4.1 Porovnání rychlosti zvuku při pokojové teplotě	24
4.2 Závislost rychlosti zvuku na teplotě – jednotlivé kapaliny.....	25
4.2.1 Voda	25
4.2.2 Solný roztok	26
4.2.3 Technický líh.....	27
4.2.4 Řepkový olej	28
5 Diskuse	30
5.1 Porovnání rychlosti zvuku při pokojové teplotě	30
5.2 Závislost rychlosti zvuku na teplotě	30
Závěr	35
Zdroje.....	37

Úvod

Zvukové vlnění a jeho šíření v různých prostředích patří k základním tématům fyziky, která mají význam nejen teoretický, ale také praktický a didaktický. Rychlost zvuku v kapalinách je fyzikální veličina, která závisí na celé řadě parametrů, zejména na hustotě a modulu objemové pružnosti daného média [1]. Tyto vlastnosti se navíc mění s teplotou, což činí z měření rychlosti zvuku vhodný nástroj pro studium fyzikálních procesů probíhajících v kapalinách [2]. Zároveň jde o experiment, který lze při vhodné úpravě realizovat i v podmínkách školní laboratoře, a tím jej využít jako atraktivní a názornou pomůcku při výuce fyziky.

Cílem této bakalářské práce je experimentálně ověřit možnost měření rychlosti zvuku ve vybraných kapalinách pomocí dvou hydrofonů a digitálního záznamu signálu. Součástí práce je také posouzení, zda lze tuto metodu adaptovat pro výuku na základní škole, kde je kladen důraz na jednoduchost, názornost a bezpečnost experimentů. Měření jsou provedena ve čtyřech kapalinách s odlišnými fyzikálními vlastnostmi – ve vodě, solném roztoku, technickém lihu a řepkovém oleji, a to v teplotním rozsahu od 20 °C do 60 °C.

Součástí bakalářské práce bude také ověření možnosti využití měření rychlosti zvuku v kapalinách ve školní výuce fyziky. Toto měření bylo do práce zařazeno především proto, že se v běžné školní praxi téměř neprovádí, přestože jsou hodnoty rychlosti zvuku v kapalinách a jejich závislost na teplotě často uváděny v učebnicích jako známý fyzikální fakt. Cílem je proto zjistit, zda je možné tento teoretický poznatek experimentálně demonstrovat v podmínkách školní laboratoře a zda lze pomocí dostupného vybavení získat dostatečně přesné a názorné výsledky.

Práce se zároveň zaměřuje na posouzení praktické realizovatelnosti experimentu, jeho přesnosti a případných omezení. Výsledky mohou ukázat, zda je možné podobné měření vhodně zařadit do výuky jako experiment podporující lepší porozumění šíření zvuku v kapalinách, práci s daty a statistické zpracování naměřených hodnot.

1 Zvuk

Zvuk je mechanické vlnění, které se šíří látkovým prostředím a je schopno vyvolat sluchový vjem v lidském uchu. [1]

Vznikem, šířením a vnímáním zvuku v různých prostředích se zabývá akustika. Zkoumá také vlastnosti zvukových vln, jejich interakci s materiály a způsob, jakým je zvuk vnímán lidmi nebo měřen technickými prostředky. [2]

1.1 Rychlost zvuku

Rychlost zvuku je fyzikální veličinou, která je výrazně ovlivněna látkovým prostředím, kterým se zvuk šíří [1]. Látkové prostředí je prostor, přes který se přenáší zvuk. Může to být látka pevná, kapalná nebo plynná. Šíření zvuku v látkovém prostředí závisí na jeho teplotě a hustotě. Rychlost zvuku není ovlivněna tlakem vzduchu a je stejná pro zvuková vlnění všech frekvencí. [3]

V kapalinách a pevných látkách je rychlost zvuku větší než ve vzduchu, popř. v jiných plynech. Rychlost zvuku ve vzduchu při teplotě 0 °C a hustotě suchého vzduchu $1,293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ je $v = 331,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [2]

Přibližné hodnoty rychlosti zvuku v některých látkách jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 1).

Tabulka 1: Rychlost zvuku ve vybraných pevných a kapalných látkách [2]

Látka	Rychlost zvuku ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Voda (25 °C)	1 500
Rtuť	1 400
Beton	1 700
Led	3 200
Ocel	5 000
Sklo	5 200

Měření rychlosti zvuku

Měření rychlosti zvuku spočívá v určení, jak rychle se zvuková vlna šíří prostředím. Vždy tedy záleží na látkovém prostředí, ve kterém se zvuk šíří. Šíření rychlosti zvuku je dále závislé především na teplotě a skupenství látky, ve které se zvuk šíří. Proto je nutné uvádět, při jaké teplotě a v jakém prostředí se rychlost zvuku měří.

1.1.1 Historie měření rychlosti zvuku

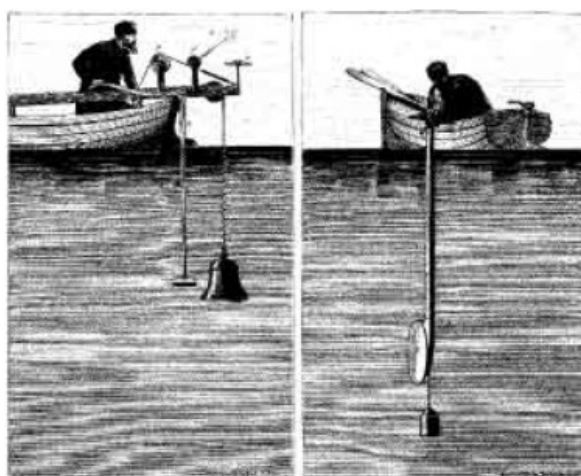
První pokusy o určení rychlosti zvuku sahají až do 17. století, kdy se začaly objevovat systematictější snahy porozumět šíření zvukových vln. Zpočátku šlo o experimenty spíše kvalitativní, jejichž cílem bylo potvrdit, že zvuk se šíří konečnou rychlostí a nikoliv okamžitě. Již v 17. století se podařilo změřit přibližnou hodnotu rychlosti zvuku ve vzduchu jednoduchou metodou, která byla založena na poznatku, že rychlost světla

je mnohem větší než rychlost zvuku [2]. Jako příklad se uvádí známá zkušenost, kdy při vzdálené bouřce pozorujeme nejprve blesk a teprve po nějaké době slyšíme zvuk hromu.

Prvním vědcem, který se pokusil změřit rychlost zvuku ve vzduchu, byl francouzský kněz a filozof Marin Mersenne. Ten v roce 1635 stanovil poměrně přesnou hodnotu rychlosti zvuku (kolem $316 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), a to měřením času uplynulého mezi pozorováním záblesku z děla a vnímáním souvisejícího zvuku. [4] Mersenne tak potvrdil základní princip, že zvuk se šíří pomaleji než světlo, a pokusil se kvantifikovat tuto hodnotu.

V první polovině 17. století experimentoval s obdobnou metodou francouzský vědec a filozof Pierre Gassendi, který naměřil rychlost zvuku $478,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V roce 1650 pak italští fyzici Giovanni Alfonso Borelli a Vincenzo Viviani při svých experimentech se střelnou zbraní a časovačem naměřili hodnotu rychlosti zvuku $350 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [5]

Ve vodním prostředí byla rychlost zvuku poprvé přesně změřena v roce 1826 švýcarským fyzikem Jeanem-Danielem Colladonem a jeho kolegou matematikem Charlesem Sturmem [6]. Jejich experiment spočíval v úderu podvodního zvonu v Ženevském jezeře a pozorování záblesku i příchodu zvuku pomocí podvodního sluchátka (Obrázek 1).



Obrázek 1: Měření rychlosti zvuku v Ženevském jezeře [6]

Výsledkem bylo zjištění, že rychlost zvuku ve vodě při teplotě 8°C činí přibližně $1\,435 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Teoretickou hodnotu rychlosti zvuku ve vzduchu na základě zákonů mechaniky odvodil fyzik a matematik Isaac Newton ve svém díle *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687). Vzhledem k tehdejšímu chápání dějů v plynech předpokládal izotermický děj, čímž dospěl k hodnotě $282,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, která byla asi o 17 % nižší než skutečnost. Tuto hodnotu vypočetl podle hypotetického vzorce:

$$v = \sqrt{\frac{p}{\rho}}, \quad (1)$$

kde v je rychlost zvuku v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, p je tlak plynu v Pa a ρ je hustota v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Tuto chybu opravil Pierre Simon de Laplace, francouzský matematik, fyzik a astronom, v roce 1816. Do výpočtu rychlosti šíření zvuku zahrnul adiabatický děj, kterým zpřesnil teoretické odhady o hodnotě $358 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tento odhad později upřesnil na experimentální hodnotu $337,144 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a to pomocí teoretického výpočtu podle vzorce:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot p}{\rho}}, \quad (2)$$

kde γ je Poissonova konstanta, což je poměr měrných tepelných kapacit plynu

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}. \quad [7] \quad (3)$$

V 19. století byly měřicí metody dále zdokonalovány. V roce 1864 zaznamenal značný pokrok francouzský fyzik Henri Victor Regnault. Při svých experimentech vymyslel způsob, jak automaticky změřit rychlost zvuku z pistole za použití rotujícího válce pokrytého papírem a elektromagnetického zařízení s perem, jež zaznamenávalo čas výstřelu z pistole a čas, kdy zvuk dosáhl membrány u válce. Při svých pokusech zohlednil meteorologické podmínky (teplotu, tlak, vlhkost) a dospěl k velmi přesným výsledkům. Rychlost zvuku následně vypočítal na základě vzdálenosti pistole od válce a rychlosti otáčení válce a dospěl k hodnotě $335,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [8]

Na počátku 20. století došlo k významnému rozvoji akustické interferometrie, především v laboratorních podmínkách, kde badatelé využívali interferenci zvukových vln k přesnému určování rychlosti šíření zvuku v kapalinách a plynech. Tato metoda byla založena na pozorování změn intenzity zvuku vzniklých interferencí dvou vln, z nichž jedna byla odražena a druhá prošla zkoumaným prostředím. Z posunu interferenčních maxim bylo možné přesně stanovit vlnovou délku a následně i rychlost zvuku. [9]

Významné experimenty v této oblasti probíhaly zejména ve 20. a 30. letech 20. století, kdy akustické interferometry umožnily detailní studium vlastností médií, jako je hustota, teplota, viskozita či akustická impedance. [10]

Tyto výsledky se později staly základem pro vývoj ultrazvukových měřicích přístrojů a akusto-optických zobrazovacích metod, které se uplatnily v průmyslu i lékařské diagnostice. [11]

Přehled historicky naměřených hodnot rychlosti zvuku je uveden níže (Tabulka 2).

Tabulka 2: Historický vývoj naměřených hodnot rychlosti zvuku

Rok	Naměřená rychlost zvuku ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1635	316
První polovina 17. století	478,4
1650	350
1687	282,4
1816	358
1864	335,3

1.1.2 Metody měření rychlosti zvuku

Měření rychlosti zvuku je základní úlohou experimentální fyziky. Její hodnota závisí na teplotě, tlaku a fyzikálních vlastnostech média. Pro její stanovení existuje několik experimentálních metod, které se liší principem měření, potřebným vybavením i dosažitelnou přesností. Mezi nejčastěji používané patří časové (přímé) metody, rezonanční metody, metody založené na odrazu zvuku (ozvěně) a moderní ultrazvukové metody využívané zejména ve vědeckých a průmyslových aplikacích.

V této části jsou uvedeny představení a popisy vybraných metod, které umožňují stanovení rychlosti zvuku v různých prostředích.

1.1.2.1 Přímá metoda měření času a vzdálenosti

Tato metoda spočívá v měření času, za který zvuk urazí známou vzdálenost. Používá se například při měření na volném prostranství, kde se zaznamenává čas mezi vizuálním signálem (např. výstřel z pistole historicky) a jeho zvukovým projevem. Rychlost zvuku se pak vypočítá podle vztahu

$$v = \frac{s}{t}, \quad (4)$$

kde s je vzdálenost a t čas. Výhodou těchto metod je nepochybně jejich názornost [12]. V současné době se měření provádí s reproduktorem, jako zdrojem zvuku a mikrofonom pro zaznamenání zvuku. Reprodukter je společně s mikrofonom propojený s počítačovým programem, který zaznamená čas vyslání a přijetí zvuku.

Nevýhodou je nutnost velmi přesného měření času a vzdálenosti, neboť i malé chyby mohou výrazně ovlivnit výsledek.

1.1.2.2 Kundtova trubice

Kundtova trubice je klasická školní pomůcka, která umožňuje měřit rychlost zvuku v plynech. Kundtova trubice nese název po německém fyzikovi Augustu Adolphu Eduardu Eberhardu Kundtovi. [13]

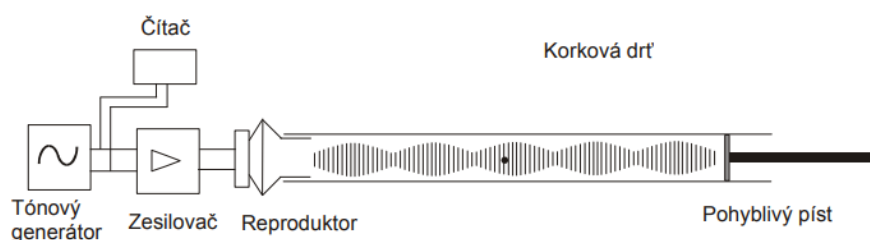
Kundtova trubice je skleněná trubice, na jejímž jednom konci je umístěn zdroj zvuku a druhý konec je uzavřen pohyblivým pístem. Zvukové vlny se šíří trubicí od zdroje,

odrážejí se od pístu v opačné fázi a při určité poloze pístu vzniká stojaté vlnění. Uzly tohoto vlnění se zobrazí díky látce (např. korková drť, písek atd.). Z měření vzdálenosti mezi uzly lze určit polovinu vlnové délky λ a následně rychlost zvuku pomocí vztahu

$$v = \lambda \cdot f, \quad (5)$$

kde f je frekvence zvuku. [14]

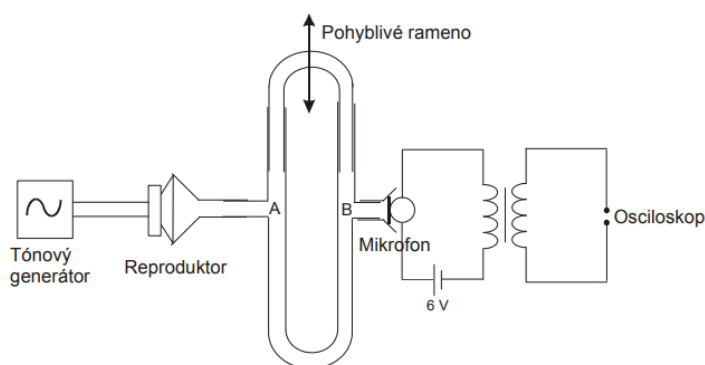
Výhodou je názornost a možnost experimentálního pozorování stojatého vlnění, nevýhodou pak nižší přesnost způsobená obtížnou identifikací uzlů a vlivem koncových efektů trubice.



Obrázek 2: Schéma zapojení Kundtovy trubice [14]

1.1.2.3 Quinckeho trubice

Quinckeho trubice je založena na principu interferometru. Jako zdroj zvuku se použije reproduktor, kterým se vytváří zvuk o určité frekvenci. Zvuk se rozdělí do dvou zvukovodů, z nichž jeden má pohyblivé rameno, jak je vidět na obrázku níže (Obrázek 3) [14].



Obrázek 3: Schéma zapojení Quinckeho trubice [14]

Na druhém konci zvukovodů je umístěn citlivý mikrofón, který zachytí zvuk a registruje výsledek interference. Pomocí pohyblivého ramene se mění délka zvukovodu a na osciloskopu se sleduje, jak zvukové vlny interferují (zesilují nebo zeslabují). Při měření se hledá interferenční maximum nebo minimum. Rozdíl délek zvukovodu dvou po sobě jdoucích minim nebo maxim je roven vlnové délce zvuku λ . Rychlost zvuku se následně vypočítá pomocí vztahu (5) [14].

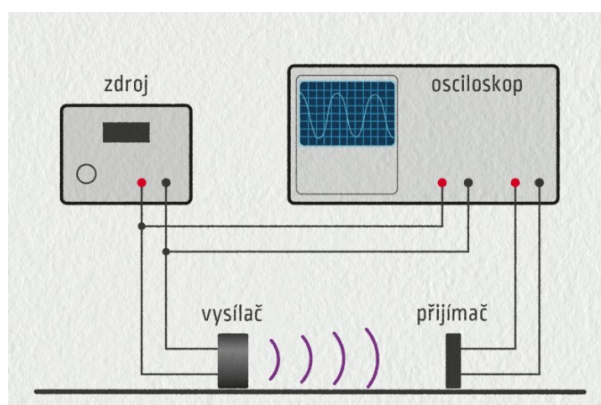
Tato metoda se používá k měření rychlosti zvuku v plynech v laboratorních podmínkách. Její výhodou je jednoduché vybavení, přímé určení vlnové délky, relativně vysoká přesnost při dobré kalibraci. Nevýhodou této metody je závislost na prostředí, omezení měření pouze na slyšitelné frekvence.

1.1.2.4 Ultrazvuková metoda s osciloskopem

Ultrazvuková metoda s osciloskopem poskytuje větší flexibilitu, vyšší přesnost a použití v rozmanitých prostředích (kapaliny, pevné látky i plyny), ovšem vyžaduje technické vybavení, kalibraci, dobrý přenos vlny mezi prostředím a měřicí hlavou, a může být méně úspěšná v materiálech, které významně rozptylují ultrazvuk. [15]

Tato metoda využívá ultrazvukový vysílač a přijímač spolu s dvoukanálovým osciloskopem. Měří se časový rozdíl mezi vysláním a přijetím signálu tím, že na osciloskopu měříme fázový posun dvou signálů z vysílače a přijímače. Poté se vypočte rychlost zvuku dle vztahu (4), kde s je vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem a t čas.

Další možností výpočtu rychlosti zvuku je podle vztahu (5), kde λ je vlnová délka zjištěná z délky jedné vlny na osciloskopu a f je frekvence vlny zjištěné z osciloskopu [16].



Obrázek 4: Schéma zapojení ultrazvukové metody s osciloskopem [16]

2 Měření rychlosti zvuku v kapalinách

Rychlost zvuku v kapalinách představuje jednu ze základních fyzikálních veličin charakterizujících přenos mechanických vln ve spojitém prostředí. Zvuková vlna se v kapalině šíří jako podélné vlnění, při kterém částice prostředí kmitají ve směru šíření vlny. Na rozdíl od plynů jsou kapaliny prakticky nestlačitelné, proto se zvuk v nich šíří rychleji, typicky v řádu $1\,000\text{--}1\,600\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, v závislosti na hustotě a teplotě kapaliny. [17]

Rychlost zvuku v v kapalině je dána vztahem:

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (6)$$

kde K je objemový modul pružnosti a ρ je hustota kapaliny [18]. Z uvedeného vztahu vyplývá, že čím větší má kapalina modul pružnosti (je méně stlačitelná) a zároveň má menší hustotu, tím vyšší je rychlost zvuku.

Pro kapaliny platí, že rychlost zvuku se s rostoucí teplotou obvykle zvyšuje až do určité teploty (např. u vody kolem $74\text{ }^{\circ}\text{C}$) a poté opět klesá. Tento jev je způsoben protichůdnými vlivy. Zvýšená teplota snižuje hustotu kapaliny, což je příčinou zvýšení rychlosti zvuku, ale současně snižuje modul pružnosti, čímž rychlost klesá. [19]

Rychlost zvuku v různých kapalinách je uvedena v následující tabulce (Tabulka 3).

Tabulka 3: Rychlost zvuku v kapalinách při uvedených teplotách

Kapalina	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
Voda ^a	1 402,39	1 447,65	1 481,5	1 506,39	1 522,37
Mořská voda ^{ab}	1 435,48	1 477,77	1 507,49	1 528,43	1 541,65
Slunečnicový olej ^c	1 452,31	1 421,31	1 390,31	1 359,31	1 328,31
Olivový olej ^d	1 443,5	1 436	1 428,5	1 421	1 413,5
Minerální olej ^{fd}	1 409,5	1 401,5	1 393,5	1 385,5	1 377,5
Ethanol (technický líh) ^e	1 179	1 169	1 159	1 149	1 139

^a [20], [21].

^b Při salinitě 35 ppt (ppt – parts per thousand). 35 ppt znamená 35 g soli na 1 kg mořské vody. To odpovídá průměrné slanosti oceánů.

^c [22].

^d [23].

^e [4].

^f (transformátorový)

3 Experimentální pomůcky a metodika práce

Kapitola se zaměřuje na popis použitých experimentálních pomůcek a metody měření rychlosti zvuku v kapalinách. Měření probíhalo v programu Audacity.

3.1 Příprava pomůcek pro měření rychlosti zvuku

V průběhu pokusu byly použity tyto experimentální pomůcky: hydrofony, vyhřívací destička, termostat, teploměr, zdroj napětí s dostatečným výkonem pro maximální využití vyhřívací destičky, nádoba, vytištěný model lodičky pro uchycení hydrofonů.

3.1.1 Hydrofony

Hydrofon je elektroakustický snímač určený k detekci a měření zvukových vln ve vodním prostředí. Jeho funkcí je převádět změny akustického tlaku vznikající při šíření zvukových vln v kapalině na elektrický signál, který může být dále zaznamenán nebo analyzován pomocí elektronických zařízení. Hydrofony jsou často založeny na piezoelektrickém principu, kdy deformace piezoelektrického materiálu způsobená akustickým tlakem vede ke vzniku elektrického napětí. [24]

Pro výrobu hydrofonu byly připraveny následující pomůcky: piezoelektrický měnič – dva kusy max. 30 V, 3,4 kHz, 1 k Ω , 27×0,53 mm (Obrázek 5), konektor Jack 3,5 mm stereo se třemi piny (female, male), dva konektory Jack 3,5 mm stereo se čtyřmi piny a elektrický kabel. Pro výrobu hydrofonu byla dále použita pájka a cín.



Obrázek 5: Piezoelektrický měnič [25]

Postup výroby hydrofonu byl následující:

1. Pomocí pájky a cínu byl připájen elektrický kabel a piezoelektrický měnič.
2. Na stejný kabel byl připájen konektor Jack 3,5 mm dle schématu (Obrázek 6).



Obrázek 6: Schéma zapojení piezoelektrických měničů ke konektoru [25]

3. Po připájení vodičů byl piezoelektrický měnič umístěn do vytištěného pouzdra a opatřen gumovou ochrannou vrstvou, která zajišťuje ochranu při ponoření do kapaliny (Obrázek 7).



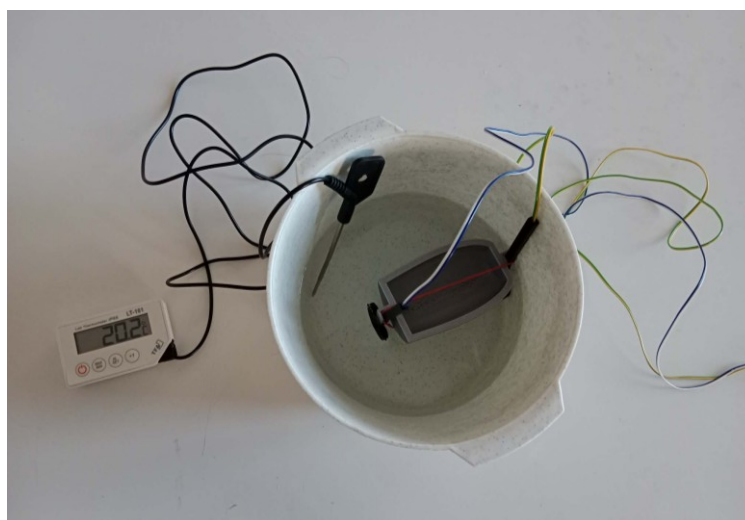
Obrázek 7: Hydrofony – povrchová úprava gumou ve spreji

4. Pro hydrofony byl dále použit držák ve tvaru loďky (Obrázek 8), který byl vytisknutý na 3D tiskárně. Pomocí něho byly hydrofony od sebe ve vzdálenosti 100 mm a docházelo k jejich plování v kapalině ve stejné hloubce.



Obrázek 8: Držák hydrofonů

Zapojení vyrobených hydrofonů dokládá obrázek níže (Obrázek 9).



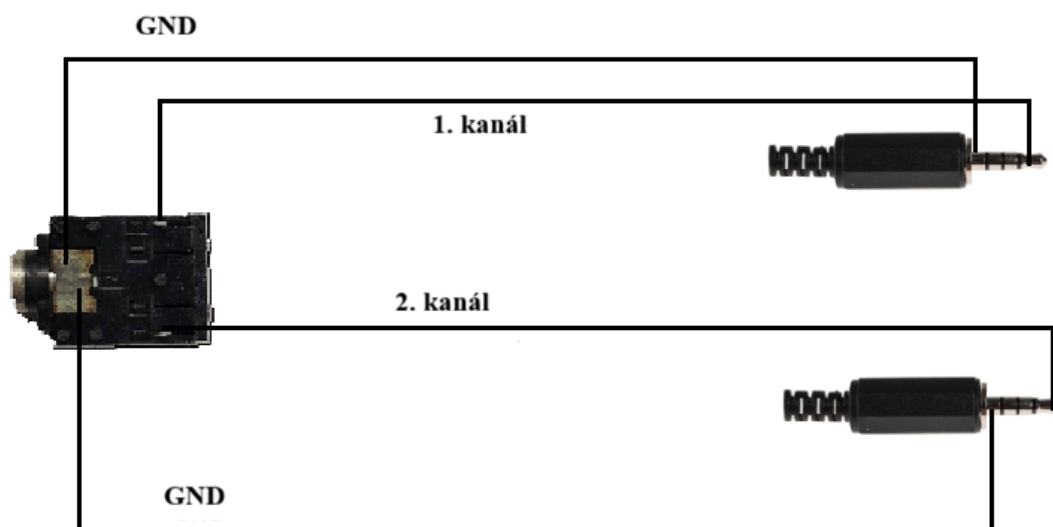
Obrázek 9: Zapojení hydrofonů

3.1.2 Ověření funkčnosti hydrofonu a řešení technických problémů

Pomocí softwarového programu Audacity byla vyzkoušena funkčnost vyrobeného hydrofonu. Při nahrávání zvuku byl zaznamenán problém, kdy byl signál snímán pouze z jednoho mikrofону. Nejprve bylo přistoupeno k odstranění chyby pomocí softwarového řešení, avšak ani poté neprobíhalo nahrávání správně. Následně bylo zjištěno, že příčina problému spočívá v konektoru notebooku, který je 4pinový. Z tohoto důvodu byla navržena a vyrobena přípojka mezi stereofonním konektorem Jack 3,5 mm (3pin) a vstupem notebooku.

Postup výroby přípojky byl následující:

1. Konektor Jack 3,5 mm stereo female byl připájen k elektrickému kabelu
2. Druhý konec elektrického kabelu byl připájen ke dvěma konektorům Jack 3,5 mm 4pin dle schématu na obrázku níže (Obrázek 10).



Obrázek 10: Schéma zapojení přípojky

Opět byla vyzkoušena funkčnost vyrobeného hydrofonu s přípojkou pomocí softwarového programu Audacity, a to tak, že byl zapojen jeden Jack do zvukové karty, která byla připojena do notebooku přes USB konektor. Druhý Jack byl připojen do notebooku, a to do konektoru Jack 3,5 mm 4pin female. Nahrávání bylo stále stejné, opět nahrával pouze jeden mikrofon. Problém byl v použitém softwaru Audacity, který neuměl nahrávání rozdělit na dva mikrofony.

K rozdělení zvukového signálu při nahrávání byl využit software Voicemeeter, který umožnil programu Audacity současně zaznamenávat oba mikrofony.

Zvuk nebyl dostatečně silný, proto byla zapojena druhá zvuková karta na druhý USB port PC. Ani poté nedocházelo ke správnému měření rychlosti zvuku, proto bylo přistoupeno k měření na stolním počítači, který má rozdělený vstup na mikrofon a sluchátka, kde vstup pro mikrofon je stereo. Toto měření probíhalo již bez problémů.

3.1.3 Termostat

Pro řízení a stabilizaci teploty byla použita digitální termostatická jednotka XH-W1219 s pracovním rozsahem -50 až 110 °C. Tento termostat umožňuje automatické spínání a vypínání topného prvku na základě teploty snímané externím teplotním čidlem.

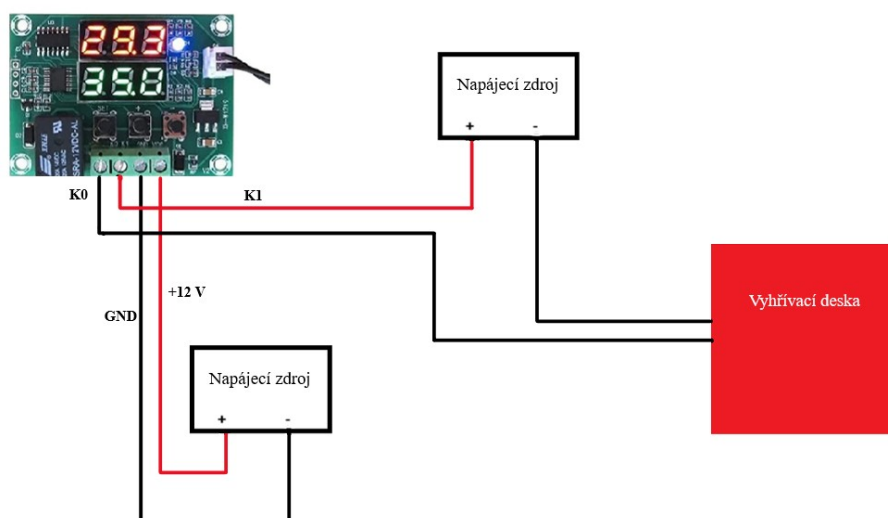
Jako topný prvek byla použita vyhřívací podložka o rozměrech 10×10 cm s elektrickými parametry 12 V a příkonem 120 W. Z uvedených parametrů vyplývá proudový odběr přibližně 10 A, který lze stanovit podle vztahu:

$$I = \frac{P}{U}, \quad (7)$$

kde I je proud (A), P je příkon (W) a U je napětí (V).

Tato hodnota se nachází na horní hranici zatížitelnosti výstupního relé termostatu, proto je z hlediska provozní bezpečnosti vhodné použít externí napájecí zdroj, který lze nastavit tak, aby dodával maximální možný příkon na vyhřívací desku pro nejvyšší efektivitu.

Napájení termostatu bylo realizováno stejnosměrným napětím 12 V. Kladný pól zdroje byl připojen na svorku VCC, záporný pól na svorku GND. Vyhřívací podložka byla zapojena přes výstupní relé termostatu tak, aby byl spínán kladný vodič napájení. Jeden z výstupních kontaktů relé byl propojen s kladným pólem druhého napájecího zdroje. Na druhý výstupný kontakt relé byl připojen kladný výstup vyhřívací destičky. Záporný vodič podložky byl připojen přímo na záporný pól druhého napájecího zdroje. Kladný pól druhého napájecího zdroje byl připojen na druhý výstup vyhřívací desky (Obrázek 11).



Obrázek 11: Schéma zapojení termostatu

Teplotní čidlo bylo připojeno ke konektoru termostatu a umístěno přibližně do středu objemu kapaliny. Umístění bylo zvoleno s cílem zachytit reprezentativní teplotu v podmínkách, kdy dochází k proudění a promísení kapaliny v celém objemu. Měření probíhalo až po delší době ohřevu, kdy již došlo k ustálení teplotního pole a částečné homogenizaci teploty v systému. Tím bylo možné lépe charakterizovat výsledný tepelný stav soustavy než při měření přímo v blízkosti topného elementu, kde by byla teplota lokálně ovlivněna intenzivním ohřevem.

Termostat byl nastaven do režimu vyhřívání (Heating), který je v menu zařízení označen parametrem $P0 = H$. V tomto režimu dochází k sepnutí relé v případě, že teplota klesne pod nastavenou hodnotu. Po dosažení požadované teploty je relé automaticky rozepnuto, čímž se přeruší napájení vyhřívací podložky.

Požadovaná pracovní teplota byla nastavena podle potřeb experimentu. Pro zajištění stabilního regulačního procesu byla nastavena hystereze pomocí parametru P1, například na hodnotu 2 °C. To znamená, že při cílové teplotě 30 °C se topný prvek znovu aktivuje

při poklesu teploty na 28 °C a vypne se po dosažení 30 °C. Tím je zajištěno omezení častého spínání relé a stabilní udržování požadované teploty.

Takto zapojený a nastavený systém umožňuje spolehlivou automatickou regulaci teploty vyhřívací podložky a její dlouhodobé udržování na požadované hodnotě.

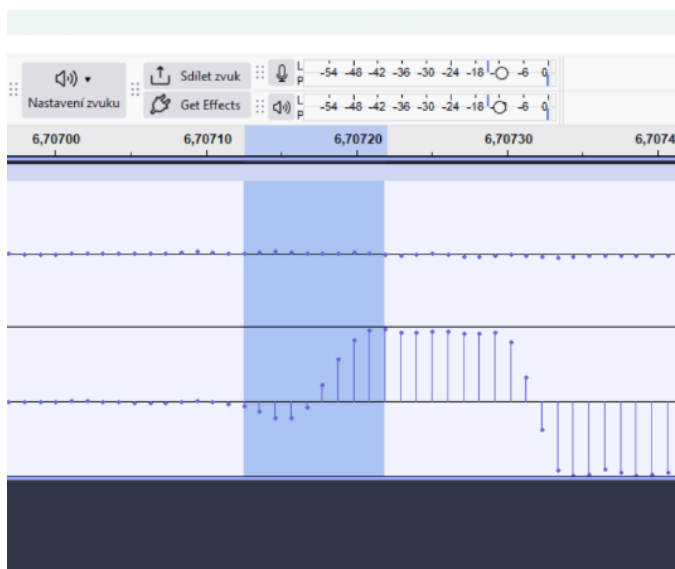
3.2 Ostatní experimentální pomůcky

Pro kontrolu teploty měřené kapaliny byl použit kalibrovaný laboratorní teploměr TFA 30.1033 s externí vpichovací sondou (Obrázek 12).



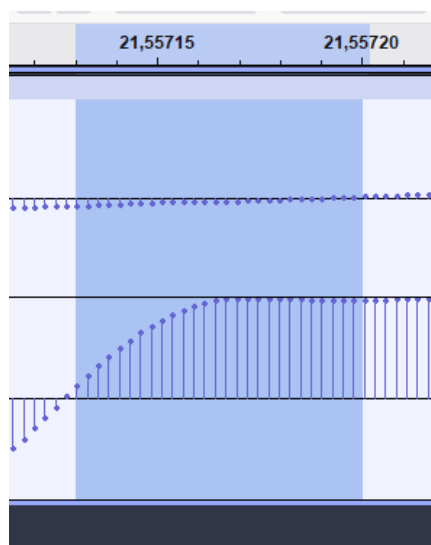
Obrázek 12: Kalibrovaný digitální teploměr

Při volbě nádoby pro měření rychlosti zvuku v kapalinách byla nejprve použita kvádřová plastová nádoba. Ukázalo se však, že toto řešení není zcela vyhovující, protože signál zachycený mikrofonom nebyl dostatečně silný pro spolehlivé vyhodnocení měření (Obrázek 13).



Obrázek 13: Ukázka měření v kvádřové plastové nádobě

Z tohoto důvodu byla následně zvolena válcová plastová nádoba (Obrázek 9), která se pro daný experiment ukázala jako vhodnější. V této konfiguraci již měření probíhalo úspěšně a získaný signál byl dostatečně kvalitní pro další analýzu (Obrázek 14).



Obrázek 14: Záznam zpoždění mezi dvěma nahrávacími kanály

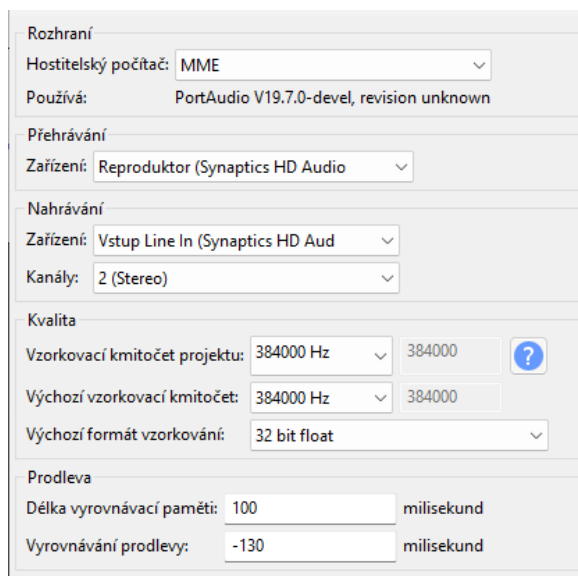
3.3 Audacity

Audacity je bezplatný software s otevřeným zdrojovým kódem pro nahrávání a úpravu zvuku. Audacity je snadno použitelný vícestopý zvukový editor a rekordér pro Windows, macOS, GNU/Linux a další operační systémy. [26]

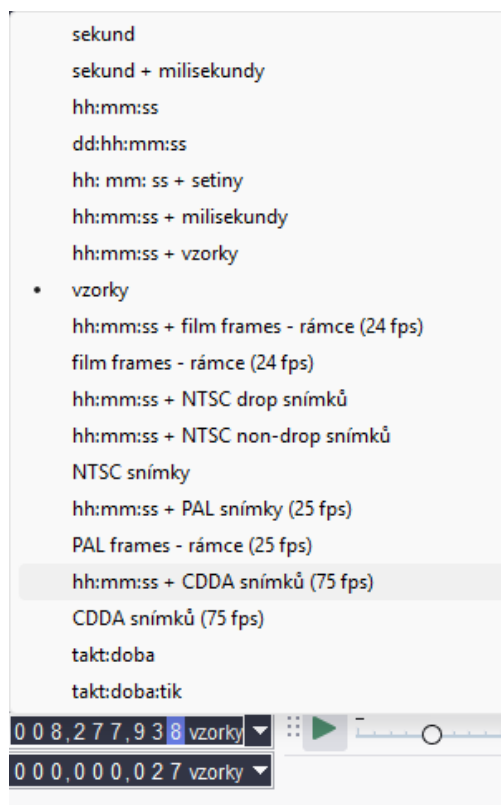
Před zahájením vlastního měření byly v horní oblasti panelu nástrojů v nastavení zvuku (Obrázek 15) programu Audacity nastaveny následující parametry: vzorkovací frekvence 384 000 Hz, nahrávání dvou kanálů – stereo a nahrávací zdroj dle obrázku níže (Obrázek 16).



Obrázek 15: Horní oblast panelu nástrojů



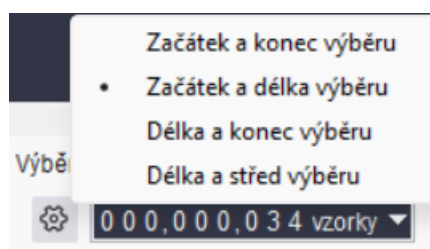
Obrázek 16: Nastavení zvuku



Obrázek 17: Nastavení vzorků

Dále bylo v dolní oblasti panelu nástrojů provedeno přenastavení z nastavení „sekund“ na „vzorky“ dle obrázku níže (Obrázek 17).

Jako poslední krok bylo pomocí ozubeného kolečka nalevo u vzorkování zvolena možnost „Začátek a délka výběru“ (Obrázek 18).



Obrázek 18: Nastavení vzorkování

Po provedeném nastavení bylo přistoupeno k vlastnímu měření rychlosti zvuku, a to tak, že bylo spuštěno nahrávání v horní oblasti panelu nástrojů tlačítkem „Nahrávat“ (Obrázek 19).



Obrázek 19: Spuštění nahrávání

3.4 Průběh měření

Jako zdroj zvuku byly použity dvě kovové ladičky (Obrázek 20).



Obrázek 20: Zdroj zvuku

Pomocí programu Audacity byl pod hladinou kapaliny zaznamenán zvuk vzniklý ťuknutím dvou ladiček o sebe, přičemž k ťuknutí došlo stranou od obou hydrofonů. Následně byla provedena analýza časových průběhů v obou záznamových kanálech s cílem identifikovat akustický impuls. Po dostatečném zvětšení časové osy byla určena oblast, v níž hydrofony zaznamenaly časový rozdíl zvuku. Z této části byl následně odečten odpovídající počet vzorků (Obrázek 14).

Z počtu vzorků bylo vypočteno zpoždění, tedy čas, za který zvuk dorazil z prvního hydrofonu na druhý, a to pomocí vztahu:

$$t = \frac{1}{f} \cdot n, \quad (8)$$

kde t je čas (s), f je vzorkovací frekvence (Hz) a n je počet vzorků. [25]

Z vypočtené hodnoty času t byla následně vypočtena rychlost zvuku v , a to pomocí vztahu (4), kde s je vzdálenost mezi hydrofony (m).

Vzdálenost mezi hydrofony byla změřena a pro všechna měření konstantní. Tato vzdálenost činila 9,965 cm.

4 Výsledky a zpracování vlastního měření

Cílem experimentální části práce bylo zjistit, zda lze toto měření upravit do školní třídy, tedy jako pokus pro výuku na základní škole. Dalším úkolem bylo stanovit rychlost zvuku ve vybraných kapalinách (voda, solný roztok, technický líh a olej) a analyzovat její závislost na teplotě. Měření bylo provedeno přímou metodou, kdy byla rychlost zvuku určena na základě doby průchodu signálu mezi hydrofony.

Experiment probíhal ve dvou režimech. Nejprve byla provedena měření při pokojové teplotě, která umožnila vzájemné porovnání jednotlivých kapalin. Následně byla sledována závislost rychlosti zvuku na teplotě, přičemž každá kapalina byla analyzována samostatně při teplotách 20 °C až 60 °C s krokem 10 °C.

V rámci experimentu byla nejprve změřena vzdálenost mezi jednotlivými hydrofony. Na základě zaznamenaných signálů byla následně určena doba šíření zvuku mezi hydrofony podle vztahu (8). Takto získané časové údaje byly dále statisticky zpracovány s cílem stanovit aritmetický průměr a příslušnou odchylku, která byla v případě vzdálenosti mezi oběma hydrofony $9,965 \pm 0,001$ cm. Dalším krokem byl výpočet rychlosti zvuku podle vztahu (4) z aritmetického průměru vzdálenosti mezi hydrofony a jednotlivými hodnotami času. Jako poslední byl vypočítán aritmetický průměr rychlosti zvuku a odchylka podle vztahu:

$$\vartheta_v = \sqrt{\left(\frac{1}{\bar{t}} \cdot \vartheta_s\right)^2 + \left(-\frac{\bar{s}}{\bar{t}^2} \cdot \vartheta_t\right)^2}, \quad (9)$$

kde $\bar{t}$ je aritmetický průměr času, ϑ_s je odchylka vzdálenosti mezi hydrofony, $\bar{s}$ je aritmetický průměr vzdálenosti mezi hydrofony a ϑ_t je odchylka času.

4.1 Porovnání rychlosti zvuku při pokojové teplotě

V tabulce (Tabulka 4) jsou uvedeny výsledné hodnoty měření rychlosti zvuku při pokojové teplotě (cca 20 °C).

Tabulka 4: Výsledné hodnoty rychlosti zvuku v kapalinách při pokojové teplotě

kapalina	τ (°C)	v (m·s ⁻¹)
voda	18,4	1 474
solný roztok	20,1	1 527
líh	20,4	1 162
olej	21,5	1 447

Z tabulky vyplývá, že nejvyšší rychlost zvuku byla zaznamenána u solného roztoku, následovala voda, poté řepkový olej a nejnižší hodnoty vykazoval technický líh. Tento výsledek odpovídá očekávaným fyzikálním vlastnostem kapalin.

4.2 Závislost rychlosti zvuku na teplotě – jednotlivé kapaliny

V předchozí části byly porovnány hodnoty rychlosti zvuku v jednotlivých kapalinách při pokojové teplotě. Pro komplexnější pochopení chování zkoumaných látek je však nutné analyzovat také vliv teploty na rychlost šíření zvuku.

Z tohoto důvodu byla provedena série měření v širším teplotním rozsahu, přičemž každá kapalina byla zkoumána samostatně. Získaná data byla následně zpracována do grafické podoby, která umožňuje sledovat změny rychlosti zvuku v závislosti na teplotě a porovnat charakter těchto změn mezi jednotlivými kapalinami.

Všechna grafická znázornění byla zpracována na základě hodnot uvedených v tabulce níže (Tabulka 5), která obsahuje kompletní soubor vypočtených hodnot pro všechny kapaliny a teplotní body.

Tabulka 5: Vypočtené hodnoty rychlosti zvuku v kapalinách v závislosti na teplotě

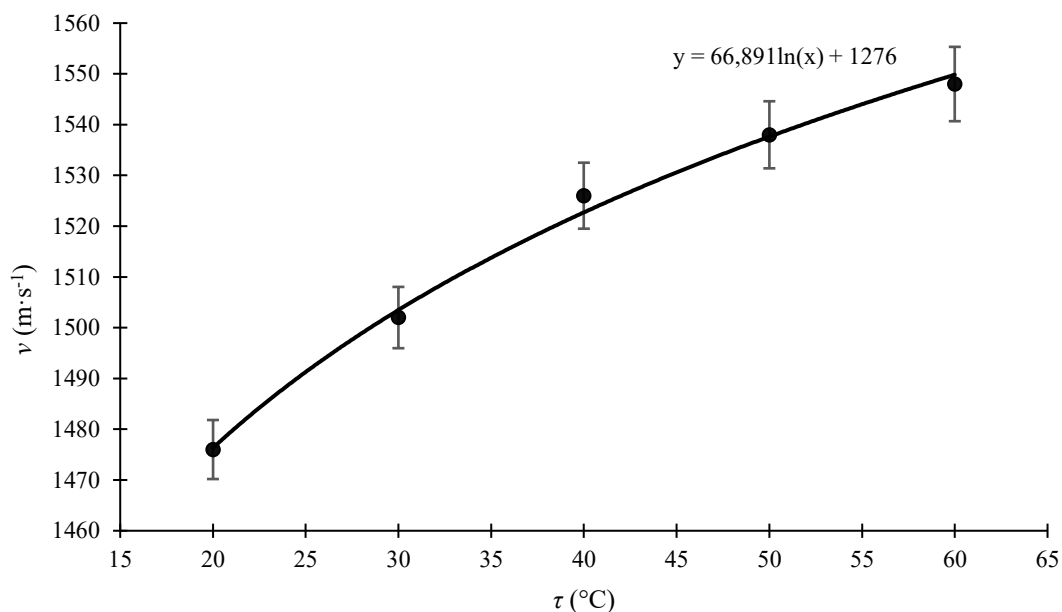
	τ (°C)				
	20	30	40	50	60
	v (m·s ⁻¹)				
voda	1 476	1 502	1 526	1 538	1 548
solný roztok (3,5 %)	1 532	1 541	1 553	1 569	1 582
líh	1 162	1 123	1 089	1 059	1 007
řepkový olej (Vitador)	1 448	1 415	1 380	1 348	1 309

Z těchto dat byly následně vytvořeny jednotlivé grafy, které umožňují sledovat průběh závislosti rychlosti zvuku na teplotě i vzájemné rozdíly mezi kapalinami.

V následujících podkapitolách jsou proto postupně uvedeny výsledky měření pro jednotlivé kapaliny, včetně jejich vyhodnocení a stručného komentáře k pozorovaným trendům.

4.2.1 Voda

V této části jsou uvedeny výsledky měření rychlosti zvuku ve vodě v závislosti na teplotě. Průběh této závislosti je zobrazen v následujícím grafu (Graf 1).



Graf 1: Závislost rychlosti zvuku na teplotě ve vodě

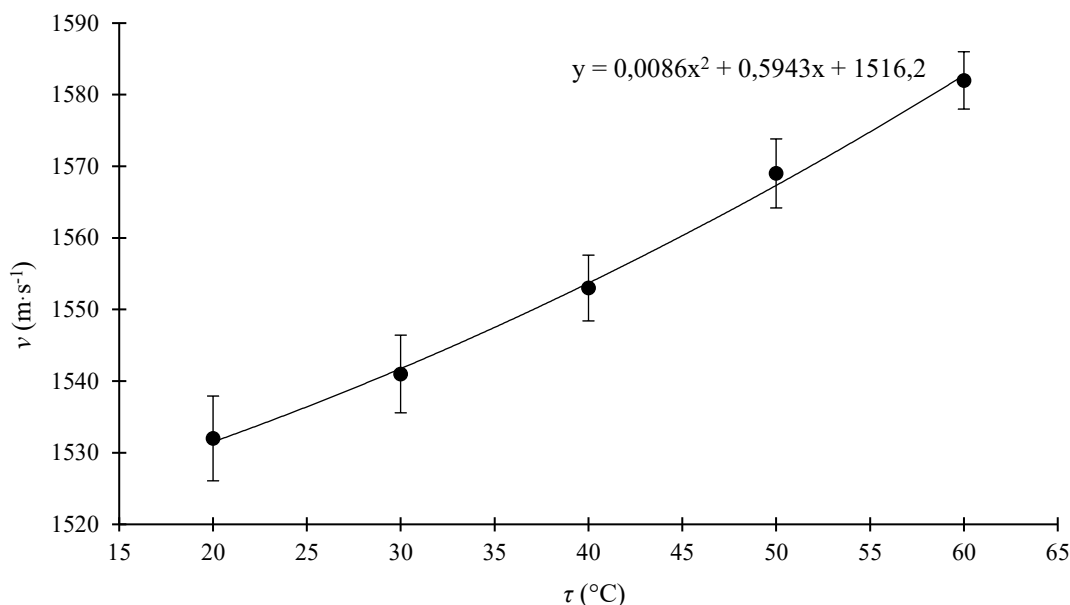
Při nejnižší teplotě kolem 20 °C se rychlost zvuku pohybuje přibližně na hodnotě 1 475 m·s⁻¹. S postupným ohřevem vody dochází k výraznějšímu nárůstu, zejména v intervalu mezi 20 °C a 40 °C, kde je nárůst strmější. V tomto rozsahu se rychlost zvýší zhruba na 1 525 m·s⁻¹, což představuje nejvýraznější změnu v celém měřeném intervalu.

V oblasti vyšších teplot (40-60 °C) se růst rychlosti zvuku zpomaluje. Hodnoty se zde zvyšují pozvolněji a při 60 °C dosahují přibližně 1 550 m·s⁻¹. Celkový průběh tak vykazuje nelineární charakter, kdy je nárůst výraznější při nižších teplotách a následně se postupně stabilizuje.

Z grafu je tedy zřejmé, že rychlost zvuku ve vodě s teplotou roste, přičemž závislost není zcela lineární, ale má mírně klesající přírůstky v oblasti vyšších teplot. Tento trend je dobře patrný ze sklonu křivky v jednotlivých intervalech měření.

4.2.2 Solný roztok

Následující měření bylo provedeno na solném roztoku o konstantní salinitě 3,5 %, který byl připraven pro účely experimentu. Z grafu závislosti rychlosti zvuku na teplotě (Graf 2) je zřejmé, že rychlost zvuku s rostoucí teplotou soustavně narůstá.



Graf 2: Závislost rychlosti zvuku na teplotě v solném roztoku

V měřeném teplotním intervalu přibližně od 20 °C do 60 °C se hodnoty rychlosti zvuku zvyšují zhruba z 1 532 m·s⁻¹ na 1 582 m·s⁻¹. Celkový nárůst tedy činí přibližně 50 m·s⁻¹, přičemž mezi jednotlivými měřeními body dochází k relativně rovnoměrným přírůstkům.

Průběh závislosti má téměř lineární charakter. Jednotlivé body jsou rozmístěny plynule a nevykazují výrazné odchylky od celkového trendu. Mezi sousedními teplotami (20-30 °C, 30-40 °C, 40-50 °C a 50-60 °C) dochází k postupnému zvyšování rychlosti zvuku, přičemž rozdíly mezi jednotlivými úseky jsou srovnatelné. Mírně větší nárůst je patrný ve vyšší teplotní oblasti (zejména mezi 40 °C a 60 °C), kde je změna rychlosti výraznější než v nižších teplotách.

Naměřené hodnoty tvoří kompaktní soubor bez výrazných rozptylů, což svědčí o dobré opakovatelnosti měření. Body leží blízko spojnice, která vystihuje celkový trend, a nevykazují náhlé skoky ani lokální extrémy. To umožňuje spolehlivé odečítání závislosti v celém rozsahu měření.

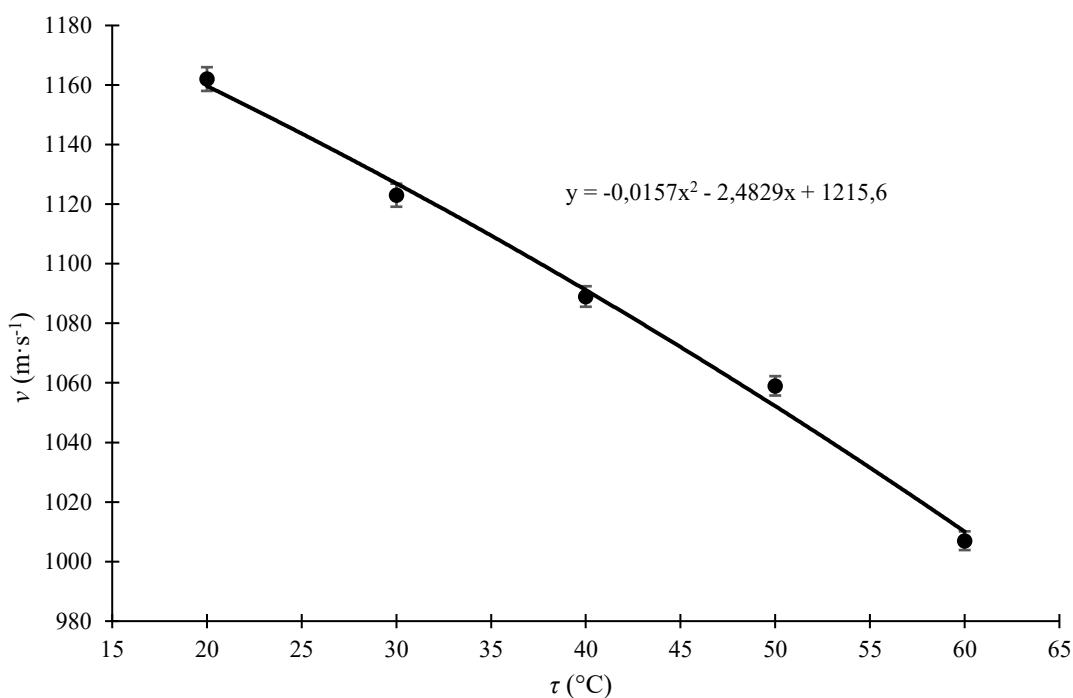
Celkově graf ukazuje plynulý, monotónně rostoucí průběh rychlosti zvuku v závislosti na teplotě, s rovnoměrným rozložením naměřených hodnot a bez zjevných anomálií v průběhu měření.

4.2.3 Technický líh

Z naměřených hodnot rychlosti zvuku v technickém lihu je patrná jednoznačná klesající závislost na teplotě. S rostoucí teplotou od přibližně 20 °C do 60 °C dochází k výraznému snížení rychlosti zvuku, a to zhruba z 1 160 m·s⁻¹ na hodnoty okolo 1 005 m·s⁻¹. Tento pokles je v celém sledovaném intervalu spojitý a nevykazuje žádné náhlé změny směru.

Průběh závislosti je plynulý, přičemž jednotlivé experimentální body na sebe dobře navazují. V nižších teplotách je pokles pozvolnější, zatímco ve vyšší teplotní oblasti se trend mírně zesiluje, což je patrné zejména mezi posledními dvěma měřenými body. I přes tuto změnu strmosti zůstává celkový charakter závislosti přehledný a dobře interpretovatelný.

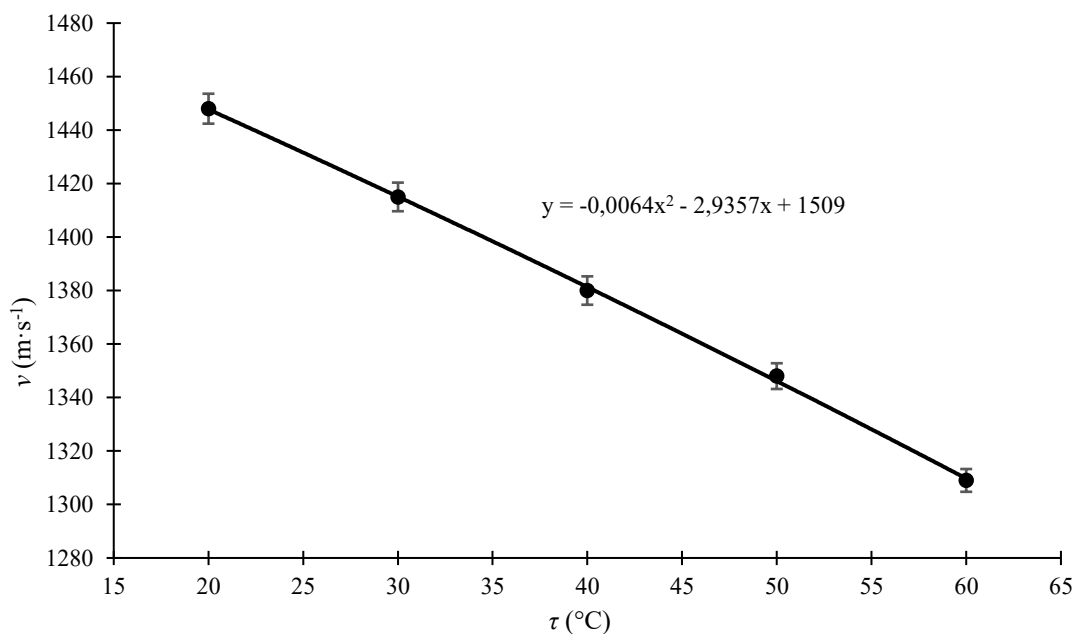
Rozsah naměřených hodnot je dostatečně široký pro zachycení charakteru sledované závislosti v celém teplotním intervalu. Hustota měřených bodů je rovnoměrná, což přispívá k přehlednosti grafického znázornění a usnadňuje následné zpracování dat.



Graf 3: Závislost rychlosti zvuku na teplotě v technickém lihu

4.2.4 Řepkový olej

Z naměřených hodnot zobrazených v grafu je patrné, že rychlost zvuku v řepkovém oleji (Vitador) klesá s rostoucí teplotou. Tento trend je zřejmý v celém sledovaném teplotním rozsahu a odpovídá chování některých kapalin (Graf 4).



Graf 4: Závislost rychlosti zvuku na teplotě v řepkovém oleji (Vitador)

V teplotním intervalu od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ je pokles rychlosti zvuku plynulý a téměř lineární. Při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dosahuje rychlost zvuku přibližně $1\,448\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, zatímco při $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ klesá na zhruba $1\,380\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při nejvyšší měřené teplotě $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ činí rychlost zvuku přibližně $1\,309\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Celkový pokles rychlosti zvuku v uvedeném rozsahu tedy představuje přibližně $160\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Průběh grafu neobsahuje žádné výrazné odchylky či nepravidelnosti, což naznačuje stabilní chování měřeného média a konzistentnost provedených měření.

5 Diskuse

Cílem experimentální části práce bylo ověřit, zda lze měření rychlosti zvuku v kapalinách realizovat v laboratorních podmínkách tak, aby bylo vhodné i pro výuku na základní škole. Současně bylo úkolem stanovit rychlost zvuku ve vybraných kapalinách a analyzovat její závislost na teplotě. Získané výsledky umožňují posoudit jak technickou proveditelnost měření, tak i fyzikální interpretaci naměřených hodnot.

5.1 Porovnání rychlosti zvuku při pokojové teplotě

Naměřené hodnoty rychlosti zvuku při teplotě okolo 20 °C odpovídají očekávaným fyzikálním vlastnostem jednotlivých kapalin. Nejvyšší rychlost zvuku byla zaznamenána u solného roztoku, následovala voda, poté řepkový olej a nejnižší hodnoty vykazoval technický líh. Tento výsledek je v souladu s teorií, podle níž rychlost zvuku v kapalinách závisí především na jejich hustotě a objemovém modulu pružnosti.

Pro ověření správnosti měření byla naměřená data porovnána s hodnotami uváděnými v literatuře. Tabulková hodnota rychlosti zvuku ve vodě je cca 1 482 m·s⁻¹ [20]. Naměřená hodnota 1 474 m·s⁻¹ s vypočtenou odchylkou 4 m·s⁻¹ se od tabulkové liší o přibližně 8 m·s⁻¹. Tato shoda potvrzuje správnost měření i použitou metodu.

Tabulková hodnota rychlosti zvuku v solném roztoku o salinitě 3,5 % se uvádí cca 1 522 m·s⁻¹ [27]. Naměřená hodnota 1 527 m·s⁻¹ s vypočtenou odchylkou 3 m·s⁻¹ se liší o 5 m·s⁻¹.

Tabulková hodnota rychlosti zvuku v technickém lihu je uváděna o hodnotě cca 1 159 m·s⁻¹ [4]. Naměřená hodnota 1 162 m·s⁻¹ s vypočtenou odchylkou 3 m·s⁻¹ se prakticky shoduje s literaturou.

Tabulkové hodnoty rychlosti zvuku pro řepkový olej se v literatuře mírně liší, obvykle 1 455 m·s⁻¹ [28]. Naměřená hodnota 1 447 m·s⁻¹ s vypočtenou odchylkou 3 m·s⁻¹ se téměř shoduje s literaturou.

Z uvedeného porovnání vyplývá, že naměřené hodnoty velmi dobře odpovídají tabulkovým údajům. Vypočtené odchylky se pohybují v jednotkách m·s⁻¹, což svědčí o relativně dobré přesnosti a reprodukovatelnosti provedeného experimentu. Velikost těchto odchylek je dána zejména nejistotou experimentální metody, především citlivostí výpočtu na nepřesnost měření času a relativně krátkou délkou měřené dráhy.

5.2 Závislost rychlosti zvuku na teplotě

Analýza teplotní závislosti rychlosti zvuku ukázala, že jednotlivé kapaliny vykazují rozdílné trendy, které odpovídají jejich fyzikálním vlastnostem.

Voda

Dle naměřených hodnot rychlosti zvuku ve vodě je patrné, že se s rostoucí teplotou rychlost zvuku zvyšuje, což odpovídá teoretickým předpokladům.

Tabulkové hodnoty rychlosti zvuku ve vodě jsou pro teplotu 20 °C uváděny okolo 1 481 m·s⁻¹. Naměřená hodnota 1 476 m·s⁻¹ s vypočtenou odchylkou 6 m·s⁻¹ se od tabulkové hodnoty jen mírně liší. Obdobně je tomu u teploty 30 °C, kdy hodnoty v tabulkách uvádí 1 507 m·s⁻¹ a hodnota naměřená v průběhu pokusu dosáhla 1 502 m·s⁻¹ s vypočtenou odchylkou 6 m·s⁻¹. Při teplotě 40 °C byla naměřená hodnota rychlosti zvuku ve vodě 1 526 m·s⁻¹ s vypočtenou odchylkou 7 m·s⁻¹ a je shodná s tabulkovou hodnotou 1 526 m·s⁻¹. Při teplotě 50 °C byla naměřená hodnota rychlosti zvuku ve vodě 1 538 m·s⁻¹ s vypočtenou odchylkou 7 m·s⁻¹ a opět se mírně liší s tabulkovou hodnotou 1 541 m·s⁻¹. Při teplotě 60 °C tabulkové hodnoty uvádějí rychlost zvuku 1 552 m·s⁻¹, zatímco naměřená hodnota 1 548 m·s⁻¹ s vypočtenou odchylkou 7 m·s⁻¹ se drobně odchyluje od tabulkové hodnoty. [29]

Ve všech případech se tedy experimentální výsledky od tabulkových hodnot liší pouze o jednotky m·s⁻¹. Nízké hodnoty vypočtených odchylek naznačují, že měření vykazovalo dobrou přesnost i přes krátkou vzdálenost mezi hydrofony a vysokou rychlost šíření zvuku ve vodě.

Rozdíly mezi naměřenými a tabulkovými hodnotami lze tedy považovat za malé a odpovídající běžným experimentálním nejistotám. Ty mohou být způsobeny například nepřesností měření vzdálenosti mezi hydrofony, omezeným časovým rozlišením měřicí aparatury, kolísáním teploty vody nebo vlivem prostředí (např. odrazy zvuku). Celkově lze konstatovat, že trend závislosti rychlosti zvuku na teplotě byl experimentálně potvrzen, avšak pro přesnější vyhodnocení by bylo nutné odstranit systematické chyby měření a co nejvíce zredukovat lidský faktor.

Solný roztok (salinita 3,5 %)

Naměřené hodnoty rychlosti zvuku v solném roztoku vykazují rostoucí závislost na teplotě, což je v souladu s obecně uváděnými fyzikálními vlastnostmi vodných roztoků.

Pro srovnání lze uvést, že podle literatury se rychlost zvuku v mořské vodě o salinitě přibližně 3,5 % při teplotě 20 °C pohybuje okolo 1 522 m·s⁻¹ a s rostoucí teplotou dále narůstá [27]. Naměřená hodnota byla přibližně 1 532 m·s⁻¹ při 20 °C s vypočtenou odchylkou 6 m·s⁻¹. Při teplotě 30 °C dosahují tabulkové hodnoty rychlosti zvuku v solném roztoku přibližně 1 546 m·s⁻¹ [27], zatímco v rámci experimentu byla naměřena hodnota kolem 1 541 m·s⁻¹ s vypočtenou odchylkou 5 m·s⁻¹. Při teplotě 40 °C uvádí umělá inteligence Google rychlost zvuku 1 563 m·s⁻¹. Tuto hodnotu uvádí jako vypočtenou dle teoretického modelu tzv. Mackenzieho rovnice, což je devítimístný polynom navržený pro rychlé výpočty v širokém rozsahu parametrů [30]. Totéž platí

i pro teploty 50 °C a 60 °C. Naměřená hodnota při 40 °C byla $1\,553\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s vypočtenou odchylkou $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a oproti vypočtené hodnotě se mírně liší. Obdobně je tomu u rychlosti zvuku při teplotě 50 °C, kdy jsou vypočtené hodnoty uváděny okolo $1\,576\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, přičemž naměřená hodnota v pokusu byla cca $1\,569\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s vypočtenou odchylkou $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při teplotě 60 °C dosáhla naměřená rychlost zvuku v solném roztoku $1\,582\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s vypočtenou odchylkou $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vypočtená hodnota uvádí rychlost zvuku okolo $1\,585\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Relativně nízké hodnoty vypočtených odchylek svědčí o dobré reprodukovatelnosti měření, a to i přes krátkou vzdálenost mezi hydrofony a vysokou rychlost šíření zvuku ve vodě, které mohou měření časového zpoždění ztěžovat.

Celkově lze konstatovat, že naměřené hodnoty sledují očekávaný trend a jejich absolutní velikost odpovídá fyzikálním předpokladům i tabulkovým hodnotám. Vypočtené odchylky se pohybují v relativně nízkém rozmezí $3\text{--}7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což svědčí o dobré přesnosti a reprodukovatelnosti měření. Přesto mohly být výsledky částečně ovlivněny krátkou vzdáleností mezi hydrofony a velmi krátkou dobou průchodu signálu, která zvyšuje citlivost výpočtu na malé časové nepřesnosti. Určitý vliv mohly mít také odrazy a interference zvuku v měřicí nádobě, citlivost rychlosti zvuku na přesnou koncentraci soli a v případě vyšších teplot i vlastnosti použitých hydrofonů, které nebyly speciálně upraveny pro měření při zvýšených teplotách.

Nízké hodnoty vypočtených odchylek potvrzují dobrou reprodukovatelnost měření, a proto lze získané výsledky považovat za spolehlivé v rámci přesnosti použité experimentální metody.

Technický líh

Technický líh vykazuje opačný trend, tzn. že rychlost zvuku s rostoucí teplotou klesá. Trend klesající rychlosti zvuku v ethanolu s rostoucí teplotou je patrný z tabulkových hodnot. Tyto hodnoty ukazují, že rychlost zvuku v ethanolu klesá v intervalu 20-60 °C přibližně z $1\,160\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na $1\,030\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tento pokles je způsoben výrazným snížením modulu pružnosti kapaliny při ohřevu. [31]

Při teplotě 20 °C byla naměřena rychlost zvuku $1\,162\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s vypočtenou odchylkou $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což velmi dobře odpovídá tabulkové hodnotě přibližně $1\,160\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Podobně při 30 °C byla naměřena hodnota $1\,123\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s vypočtenou odchylkou $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, zatímco literatura uvádí přibližně $1\,125\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Také při 40 °C je shoda velmi dobrá – naměřená hodnota $1\,089\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s vypočtenou odchylkou $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se liší od tabulkové hodnoty pouze o několik jednotek. Při 50 °C byla naměřena rychlost zvuku $1\,059\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s vypočtenou odchylkou $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což je jen mírně vyšší než literární údaj okolo $1\,045\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při nejvyšší měřené teplotě 60 °C byla rychlost zvuku $1\,007\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s vypočtenou odchylkou $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což opět velmi dobře odpovídá tabulkové hodnotě přibližně $1\,005\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Celkově lze tedy konstatovat, že naměřené hodnoty vykazují velmi dobrou shodu s literaturou a potvrzují správnost provedeního měření.

Vypočtené odchylky dosahují hodnot přibližně $3\text{--}4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což lze vzhledem k charakteru experimentu považovat za nízké hodnoty. To naznačuje, že měření byla dostatečně stabilní a jednotlivé výsledky vykazovaly pouze malé vzájemné rozdíly. Přesnost výsledků mohla být částečně ovlivněna především krátkou vzdáleností mezi hydrofony, velmi krátkou dobou šíření signálu nebo odrazy zvuku od stěn měřicí nádoby. Tyto vlivy však neměly zásadní dopad na výsledné hodnoty rychlosti zvuku, které se velmi dobře shodují s tabulkovými údaji.

Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že měření rychlosti zvuku v technickém lihu poskytlo věrohodné a fyzikálně správné hodnoty. Relativně malé odchylky potvrzují dobrou reprodukovatelnost experimentu a současně byl jednoznačně potvrzen očekávaný pokles rychlosti zvuku se zvyšující se teplotou kapaliny.

Řepkový olej

Podobně jako u lihu byla i u řepkového oleje pozorována klesající závislost rychlosti zvuku na teplotě.

V rámci experimentální části práce byla měřena rychlost zvuku v jedlém řepkovém oleji značky Vitador v teplotním rozmezí od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ s krokem $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naměřené průměrné hodnoty vykazovaly stabilní klesající trend: při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ byla zjištěna rychlost $1\,448\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (s vypočtenou odchylkou $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), při $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ $1\,415\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (s vypočtenou odchylkou $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), při $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $1\,380\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (s vypočtenou odchylkou $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), při $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $1\,348\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (s vypočtenou odchylkou $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a při $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $1\,309\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (s vypočtenou odchylkou $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Tento lineární pokles rychlosti zvuku v závislosti na rostoucí teplotě je v plném souladu s obecnými fyzikálními vlastnostmi kapalných triglyceridů. Se zvyšující se teplotou dochází k expanzi kapaliny a poklesu její hustoty i modulu objemové pružnosti, což se projevuje právě snížením rychlosti šíření akustického vlnění [28].

Při komparaci získaných dat s dostupnou odbornou literaturou lze konstatovat vysokou míru shody průměrných naměřených hodnot. Studie, kterou publikovali Nedić et al. [28], uvádí pro čistý řepkový olej při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hodnotu $1\,454,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Námi naměřená hodnota $1\,448\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se tak od tohoto literárního údaje liší o pouhých $0,46\%$, což potvrzuje, že olej Vitador vykazuje standardní akustické vlastnosti rafinovaného řepkového oleje. Rovněž průměrný teplotní gradient poklesu rychlosti, který v tomto měření činí přibližně $3,47\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, velmi přesně koresponduje s koeficienty uváděnými pro rostlinné oleje v rozmezí $3,3$ až $3,6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [32].

Důležitým aspektem vyhodnocení jsou také vypočtené odchylky, které se při měření řepkového oleje Vitador pohybovaly přibližně v rozmezí $4\text{--}6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tyto hodnoty lze vzhledem k podmínkám experimentu považovat za relativně nízké a odpovídající přesnosti použité měřicí metody. Na velikost odchylek mohla mít opět vliv zejména krátká vzdálenost mezi hydrofony, omezené časové rozlišení měřicí aparatury nebo

možné odrazy zvukového signálu od stěn nádoby. Tyto faktory mohly částečně ovlivnit určení okamžiku příchodu signálu a tím i výslednou hodnotu rychlosti zvuku.

Přesto vykazují naměřené hodnoty velmi dobrou vzájemnou konzistenci a vytvářejí téměř lineární závislost odpovídající očekávanému fyzikálnímu chování kapaliny. Experiment tak potvrzuje předpokládaný trend změny rychlosti zvuku v závislosti na teplotě i správnost použité metodiky měření.

Závěr

Cílem experimentální části práce bylo ověřit, zda je možné měření rychlosti zvuku v kapalinách realizovat v laboratorních podmínkách tak, aby bylo současně vhodné i pro výuku na základní škole. Dalším cílem bylo stanovit rychlost zvuku ve vybraných kapalinách – vodě, solném roztoku, technickém lihu a řepkovém oleji – a analyzovat její závislost na teplotě. Na základě provedených měření lze konstatovat, že oba cíle byly splněny.

Naměřené hodnoty rychlosti zvuku při pokojové teplotě velmi dobře odpovídaly tabulkovým údajům dostupným v literatuře. Rozdíly mezi experimentálními a tabulkovými hodnotami se pohybovaly v řádu jednotek až nižších desítek $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, což potvrzuje správnost použité metody i dostatečnou přesnost měření. Nejvyšší rychlost zvuku byla naměřena u solného roztoku, následovala voda, řepkový olej a nejnižší hodnoty vykazoval technický líh. Toto pořadí odpovídá fyzikálním vlastnostem jednotlivých kapalin, zejména jejich hustotě a modulu objemové pružnosti.

Analýza teplotní závislosti rychlosti zvuku ukázala, že jednotlivé kapaliny vykazují rozdílné trendy, které jsou v souladu s teoretickými předpoklady. U vody a solného roztoku rychlost zvuku s rostoucí teplotou narůstala, zatímco u technického lihu a řepkového oleje byl pozorován trend opačný – rychlost zvuku s rostoucí teplotou klesala. Tyto výsledky odpovídají známým fyzikálním vlastnostem vodných roztoků a organických kapalin a potvrzují správnost provedeného měření.

Vypočtené hodnoty odchylek se ve všech případech pohybovaly pouze v jednotkách $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, což svědčí o dobré přesnosti a reprodukovatelnosti provedených měření. Jejich velikost mohla být částečně ovlivněna krátkou vzdáleností mezi hydrofony, velmi krátkou dobou průchodu signálu a citlivostí výpočtu na malé časové nepřesnosti. Další vliv mohly mít také odrazy zvuku v měřicí nádobě, šum měřicí aparatury nebo drobné kolísání teploty během experimentu. Tyto faktory však neměly zásadní dopad na výsledné hodnoty rychlosti zvuku.

Průměrné hodnoty rychlosti zvuku se ve všech případech velmi dobře shodovaly s tabulkovými údaji, což potvrzuje správnost použité metodiky i dostatečnou přesnost měření. Výsledky zároveň ukazují, že experiment nebyl významně zatížen systematickou chybou a že jednotlivá měření vykazovala pouze malý rozptyl.

Nízké hodnoty odchylek potvrzují dobrou reprodukovatelnost experimentu a ukazují, že použitá metoda je vhodná pro měření rychlosti zvuku v kapalinách. Přesnost výsledků by bylo možné dále zvýšit například větší vzdáleností mezi hydrofony, přesnějším určením okamžiku příchodu signálu nebo omezením odrazů a rušení v měřicí soustavě. Celkově lze konstatovat, že experiment úspěšně potvrdil závislost rychlosti zvuku na teplotě a poskytl výsledky odpovídající teoretickým předpokladům i hodnotám uváděným v literatuře.

Z didaktického hlediska lze konstatovat, že použitá metoda je vhodná pro výuku fyziky na základní škole. Měření je názorné, technicky nenáročné a umožňuje žákům pracovat s reálnými daty, analyzovat grafy a porovnávat výsledky s teoretickými předpoklady. Experiment tak může sloužit jako efektivní nástroj pro rozvoj praktických dovedností i hlubšího porozumění fyzikálním principům šíření zvuku v kapalinách.

Experiment však není vhodné provádět při teplotách vyšších než 50 °C. Při této teplotě se u vody a solného roztoku začala citlivost hydrofonu zmenšovat až do jeho nefunkčnosti. Hydrofon bylo nutné vyměnit za nový. Při měření rychlosti zvuku v oleji nebyl problém přímo u měření, ale po ukončení vlastního pokusu se ochranný prvek (guma ve spreji) začal rozpouštět. Z těchto důvodů je ve výuce na základních školách možné měřit pouze za pokojové teploty.

Celkově lze uzavřít, že experimentální měření rychlosti zvuku ve vybraných kapalinách potvrdilo teoretické předpoklady i tabulkové hodnoty a prokázalo, že metoda je vhodná jak pro laboratorní použití, tak pro vzdělávací účely. Pro zvýšení přesnosti měření by bylo vhodné v budoucnu optimalizovat měřicí aparaturu, zejména prodloužit vzdálenost mezi hydrofony, zvýšit časové rozlišení záznamu a minimalizovat vliv odrazů a teplotních výkyvů. Významným zdrojem nepřesnosti může být také lidský faktor při ručním určování polohy signálu v programu Audacity, protože i posunutí o jediný vzorek může způsobit změnu vypočtené rychlosti zvuku přibližně o $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. I přes tato omezení však získané výsledky poskytují spolehlivý a ucelený obraz o chování jednotlivých kapalin v závislosti na teplotě.

Zdroje

- [1] LEPIL, Oldřich, Milan BEDNAŘÍK a Radmila HÝBLOVÁ. *FYZIKA pro střední školy II*. 3. přepracované vydání. Praha 4: Prometheus, 2005. ISBN 80-7196-185-X.
- [2] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia - Mechanické kmitání a vlnění*. 7. vydání. Praha 4: Prometheus, 2024. ISBN 978-80-7196-545-9.
- [3] SVOBODA A KOL., Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. Dotisk 6., upraveného a doplněného vydání. Praha 4: Prometheus, 2022. ISBN 978-80-7196-475-9.
- [4] FIZZIQ. *Speed of sound Measuring the speed of sound with a smartphone* [online]. 2021 [cit. 2025-10-19]. Dostupné z: <https://www.fizziq.org/team-en/speed-%E2%80%8B%E2%80%8Bof-sound>
- [5] BERG, Richard E. BRITANNICA. Measuring the speed of sound. *Encyclopædia Britannica* [online]. 2025, 27.5.2025 [cit. 2025-10-25]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/acoustics/Measuring-the-speed-of-sound>
- [6] DOSITS. *Discovery of Sound in the Sea* [online]. 2002, 2025 [cit. 2025-10-25]. Dostupné z: <https://dosits.org/people-and-sound/history-of-underwater-acoustics/the-first-studies-of-underwater-acoustics-the-1800s/>
- [7] FINN, Bernard S. *Laplace and the Speed of Sound* [online]. 1964 [cit. 2025-10-25]. University of Notre Dame.
- [8] BREAU, Amy. Measuring The Speed Of Sound. In: *Indiana public media* [online]. 2019, September 16, 2019 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: <https://www.ipm.org/show/amomentofscience/2019-09-16/measuring-the-speed-of-sound>
- [9] BRITANNICA. *Acoustic interferometer* [online]. c2026 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/acoustic-interferometer>
- [10] DISCOVERY OF SOUND IN THE SEA. *Between World War I and World War II: The 1920s and 1930s* [online]. c2002-2025 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: <https://dosits.org/people-and-sound/history-of-underwater-acoustics/between-world-war-i-and-world-war-ii-the-1920s-and-1930s/>
- [11] VERBURG, Samuel A., Kenji ISHIKAWA, Efren FERNANDEZ-GRANDE a Yasuhiro OIKAWA. *A Century of Acousto-Optics: From Early Discoveries to*

- Modern Sensing of Sound with Light. *Acoustical Society of America* [online]. c2023, **19**, 54-62 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: doi:10.1121/AT.2023.19.3.54
- [12] DVOŘÁK, Leoš. *Rychlost zvuku stokrát jinak* [online]. Praha: Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky, 2007 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: https://vnuf.cz/sbornik/prispevky/pdf/12-21-Dvorak_L.pdf
- [13] KONEČNÝ, Pavel. *Z jídelního lístku Fyzikální kavárny při ÚFE PŘF MU aneb Kundtova a Rubensova trubice* [online]. Praha: Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky, 2007 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: https://vnuf.cz/sbornik/prispevky/pdf/12-02-Konecny_P.pdf
- [14] TESAR, Jiří. *Klasické a inovované měření rychlosti zvuku* [online]. Praha: Veletrh nápadů učitelů fyziky 8, 2003 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: https://vnuf.cz/sbornik/prispevky/pdf/08-16-Tesar_J.pdf
- [15] ONE STOP NDT. *What Are the Advantages and Disadvantages of Ultrasonic Testing?* [online]. c2026 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: <https://www.onestopndt.com/ndt-articles/advantages-disadvantages-ultrasonic-testing>
- [16] E-MANUEL. *Měření rychlosti zvuku* [online]. c2026 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: <https://e-manuel.cz/kapitoly/mechanicke-vlneni/praktika/mereni-rychlosti-zvuku/>
- [17] KUTTRUFF, Heinrich. *Acoustics an introduction* [online]. English edition. S. Hirzel Verlag, 2007 [cit. 2025-11-16]. ISBN 0-203-97089-6. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=ij9iDkSkpCkC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Kuttruff,+H.+\(2017\).+Acoustics:+An+introduction.+CRC+Press.&ots=gy81zavVJM&sig=fm9FQ-AjNLYd5uIr1QwY82BVbiw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=ij9iDkSkpCkC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Kuttruff,+H.+(2017).+Acoustics:+An+introduction.+CRC+Press.&ots=gy81zavVJM&sig=fm9FQ-AjNLYd5uIr1QwY82BVbiw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- [18] PIERCE, Allan D. *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications* [online]. Reprint edition. State College, PA: Acoustical Society of America, 1989 [cit. 2026-03-08]. ISBN 0883186128. Dostupné z: doi:10.1063/1.2914388
- [19] KAATZE, Udo, Frieder EGGERS a Karl LAUTSCHAM. Ultrasonic velocity measurements in liquids with high resolution—techniques, selected applications and perspectives. *IOP science* [online]. 2008, **19**(6) [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/19/6/062001
- [20] MACKENZIE, Kenneth. Nine-term equation for sound speed in the oceans. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1981, **1981**, 70. ISSN 1520-8524.

- [21] NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. *Technical guides – Speed of sound in sea-water* [online]. 2000 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/soundseawater/>
- [22] YAN, Jing, William M.D. WRIGHT, James A. O'MAHONY, Yrjö ROOS, Eric CUIJPERS a Saskia M. VAN RUTH. A sound approach: exploring a rapid and non-destructive ultrasonic pulse echo system for vegetable oils characterization. *ScienceDirect* [online]. 2019, **125**(108552), 3.2 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: doi:10.1016/j.foodres.2019.108552
- [23] JAVANAUD, Dr. Clarissa a Dr. R. R. RAHALKAR. Velocity of Sound in Vegetable Oils. *European Journal of Lipid Science and Tecnology* [online]. 1988, **90**, 73-75 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: doi:10.1002/lipi.19880900208
- [24] URICK, Robert J. *Principles of Underwater Sound*. 3rd edition. New York: McGraw-Hill, 1983. ISBN 9780932146625.
- [25] ŠERÝ, Michal a Vladimír VOCHOZKA. PEDAGOGICKÁ FAKULTA JIHOČESKÉ UNIVERZITY V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH. Měření rychlosti zvuku ve vodě a lihu pomocí piezoelektrických hydrofonů. PEDAGOGICKÁ FAKULTA JIHOČESKÉ UNIVERZITY V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH. *Veletrh nápadů učitelů fyziky 28* [online]. 2023 [cit. 2025-09-28]. Dostupné z: https://home.pf.jcu.cz/~vnuf28/doc/Sbornik_VNUF_28.pdf
- [26] AUDACITY. *Audacity is the world's most popular audio editing and recording app* [online]. c2026 [cit. 2026-03-08]. Dostupné z: <https://www.audacityteam.org/>
- [27] BATHYLOGGER. Speed of Sound in Seawater @ 35 PPT / per Mille. *Bathylogger* [online]. 2015 [cit. 2026-05-02]. Dostupné z: https://bathylogger.com/wp-content/uploads/2015/10/speed_of_sound_in_seawater.pdf
- [28] NIKOLIĆ, Boban D., Breda KEGL, Saša D. MARKOVIĆ, Melanija S. MITROVIĆ a Boban D. NIKOLIĆ. DETERMINING THE SPEED OF SOUND, DENSITY, AND BULK MODULUS OF RAPESEED OIL, BIODIESEL, AND DIESEL FUEL. In: *Determining the Speed of Sound, Density and Bulk Modulus* [online]. Vol. 16. THERMAL SCIENCE, 2012, s. 505-514 [cit. 2026-05-02]. Dostupné z: <https://scispace.com/pdf/determining-the-speed-of-sound-density-and-bulk-modulus-of-5fb6f2ehzd.pdf>
- [29] THE ENGINEERING TOOLBOX. Water - Speed of Sound vs. Temperature. *Engineering ToolBox* [online]. 2004 [cit. 2026-05-03]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-water-d_598.html

- [30] NPL. Speed of sound in sea water - Underlying Physics. NPL. *National Physical Laboratory* [online]. 2026 [cit. 2026-05-03]. Dostupné z: <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/soundseawater/underlying-phys.html>
- [31] *CRC Handbook of Chemistry and Physics* [online]. CRC Press, 2015 [cit. 2026-05-03]. Dostupné z: <https://ia601308.us.archive.org/27/items/CRC.Press.Handbook.of.Chemistry.and.Physics.85th.ed.eBook-LRN/CRC.Press.Handbook.of.Chemistry.and.Physics.85th.ed.eBook-LRN.pdf>
- [32] JIMÉNEZ, A., M. RUFO, J.M. PANIAGUA, A. GONZÁLEZ-MOHINO a L.S. OLEGARIO. Temperature dependence of acoustic parameters in pure and blended edible oils: Implications for characterization and authentication. *Science Direct* [online]. 2024, **2024**(138), Volume 138 [cit. 2026-05-03]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ultras.2023.107216