

Experimentální ověření hašení pomocí zvukových vln

Kamila Šišková

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav bezpečnostního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Kamila Šišková
Osobní číslo: A22251
Studijní program: B1032A020001 Bezpečnostní technologie, systémy a management
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Experimentální ověření hašení pomocí zvukových vln
Téma práce anglicky: Experimental verification of fire extinguishing using sound waves

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši na tematiku metod hašení požárů.
- Definujte klíčové parametry pro metodu hašení zvukovými vlnami.
- Navrhněte experiment ověřující možnost hašení požáru zvukovými vlnami.
- Analyzujte a vyhodnoťte výsledky experimentu.
- Srovnajte experimentální metodu s běžně používanými přístupy a navrhněte aplikovatelnost návrhu.

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

1. ŠENOVSKEÝ, Michail. *Základy požárního inženýrství. SPB Spektrum. Červená řada*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2004. ISBN 80-86634-50-7.
2. KVARČÁK, Miloš. *Základy požární ochrany. SPB Spektrum. Červená řada*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005. ISBN 80-86634-76-0.
3. SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
4. NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02246-3.
5. HANSEN, Colin H. a SNYDER, Scott D. *Active control of noise and vibration*. London: E & FN Spon, 1997. ISBN 0-419-19390-1.
6. FAHY, Frank. *Foundations of engineering acoustics*. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2001. ISBN 0-12-247665-4. Dostupné také z: <http://www.loc.gov/catdir/description/els031/00103464.html>.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Stanislav Kovář, PhD.
Ústav bezpečnostního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: 11. prosince 2024

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2025

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



Ing. Jan Valouch, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 12. listopadu 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....

podpis autora

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá experimentálním ověřením netradiční metody hašení pomocí zvukových vln. Teoretická část se věnuje popisem hoření od jeho vzniku až po metody jeho přerušení. Zahrnuje také klasifikaci požárů a současný stav hašení. Praktická část se zaměřuje na návrh experimentu ověřujícího účinnost hašení pomocí zvukových vln a jeho následnou realizaci. Výsledky jednotlivých měření jsou přehledně zpracovány v tabulkách a doplněny o vizuální znázornění jednotlivých průběhů hašení. Tyto výsledky následně posloužily k porovnání s běžně používanými metodami hašení a k návrhu možného využití této alternativní metody v praxi.

Klíčová slova: hasicí zařízení, hašení požárů, nízké frekvence, zvukové vlny

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the experimental verification of an unconventional method of fire extinguishing using sound waves. The theoretical part describes combustion from its origin to interruption methods. It also includes the classification of fires and the current state of firefighting. The practical part focuses on the designing an experiment to verify the effectiveness of sound wave-based extinguishing and its subsequent implementation. The results of individual measurements are presented in tables and supplemented by visual representation of the extinguishing processes. These results were subsequently used to compare with commonly used extinguishing methods and to propose potential practical applications of this alternative method in practice.

Keywords: fire extinguisher, firefighting, low frequencies, sound waves

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu své bakalářské práce, panu Ing. Stanislavu Kovářovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, podnětné nápady a vstřícný přístup během celého zpracování této práce. Velké poděkování patří také mé rodině za jejich neustálou podporu, motivaci a trpělivost po celou dobu mého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 HOŘENÍ.....	13
1.1 VZNIK A PROCES HOŘENÍ	13
1.1.1 Fáze iniciační	14
1.1.2 Fáze propagační	14
1.1.3 Fáze terminační	15
1.2 PŘERUŠENÍ HOŘENÍ	15
1.2.1 Hašení snížením teploty	15
1.2.2 Hašení odstraněním hořlavých látek	15
1.2.3 Hašení ředěním kyslíku	16
1.2.4 Inhibice.....	16
1.2.5 Izolace	16
1.3 KLASIFIKACE POŽÁRŮ	16
1.3.1 Požáry třídy A	17
1.3.2 Požáry třídy B	17
1.3.3 Požáry třídy C	17
1.3.4 Požáry třídy D	17
1.3.5 Požáry třídy F	18
2 SOUČASNÝ STAV HAŠENÍ.....	19
2.1 HAŠENÍ VODOU	19
2.2 HAŠENÍ PĚNOU	21
2.3 HAŠENÍ PRÁŠKEM	22
2.4 HAŠENÍ INERTNÍMI PLYNY	22
2.4.1 Oxid uhličitý.....	23
2.4.2 Dusík	24
2.4.3 Argon.....	24
2.4.4 Inergen.....	25
2.5 HALOTRONOVÉ HASICÍ PŘÍSTROJE	26
2.6 AEROSOLOVÉ HASIVO	26
3 ZVUK	28
3.1 AKUSTICKÉ VLNĚNÍ.....	28
3.2 TYPY VLNĚNÍ.....	29
3.3 LOM A ODRAZ VLNĚNÍ	31
3.4 FREKVENCE.....	32
3.5 VLNOVÁ DÉLKA	32
3.6 ZDROJE ZVUKU	33
3.7 VIBRACE	34

3.8	AKUSTICKÝ TLAK	35
3.8.1	Hladina akustického tlaku	35
3.8.2	Hladina intenzity zvuku	35
3.9	AKUSTICKÉ POLE	35
II	PRAKTICKÁ ČÁST	37
4	NÁVRH EXPERIMENTU	38
4.1	SLEDOVANÉ VELIČINY A PRŮBĚH MĚŘENÍ	39
4.2	HYPOTÉZY	40
4.3	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A MATERIÁLY	40
4.4	ZAPOJENÍ SENZORŮ K MIKROPOČÍTAČI	41
4.5	ZDROJOVÝ KÓD PROGRAMU	42
4.6	GENERACE FREKVENCE PROGRAMEM AUDACITY	44
4.7	MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO TLAKU	46
5	VÝSLEDKY EXPERIMENTU	48
5.1	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ÚSPĚŠNOST HAŠENÍ PLAMENE	71
5.2	SROVNÁNÍ S BĚŽNĚ POUŽÍVANÝMI HASIVY	71
5.3	MOŽNÁ APLIKOVATELNOST NÁVRHU	72
	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	75
	SEZNAM OBRÁZKŮ	79
	SEZNAM TABULEK	81
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	82
	SEZNAM PŘÍLOH	83

ÚVOD

Hašení požárů patří mezi klíčové oblasti požární bezpečnosti, které hrají zásadní roli při ochraně životů, zdraví i majetku. Tradiční hasicí metody, jako je použití vody, pěny nebo inertních plynů, jsou běžně využívány v praxi a tvoří základ většiny zásahů proti požárům. Přesto však tyto metody vykazují určité limity. Ať už v oblasti dostupnosti, šetrnosti k citlivé technice, nebo kvůli vedlejším škodám vzniklým v důsledku hašení. S rozvojem nových technologií a rostoucích požadavků na mobilitu a šetrný přístup k hašení, se hledají alternativní přístupy, které by byly účinné a zároveň méně invazivní. Jedním z inovativních směrů, který se v poslední době začíná více zkoumat, je využití zvukových vln jako prostředku k přerušení hoření. Přestože se může tato metoda na první pohled jevit zvláště, její základ spočívá v ověřených fyzikálních principech šíření mechanických vln prostředím a jejich interakce s plamenem. Dosavadní experimenty ukazují, že zvukové vlny s nízkou frekvencí mohou za určitých podmínek plamen potlačit nebo zcela uhasit. Právě tato zjištění vyvolávají potřebu důkladnějšího prozkoumání samotné metody.

Cílem této bakalářské práce je experimentálně ověřit možnosti hašení pomocí zvukových vln. Důraz je kladen jak na pochopení samotného principu hoření a mechanismu jeho přerušení, tak na identifikaci klíčových parametrů, které tuto metodu umožňují. Jedná se především o frekvenci, akustický tlak a také vzdálenost. V rámci praktické části práce je navržen a realizován experiment, který se zaměřuje na působení zvukových vln různých frekvencí na otevřený plamen. Cílem je pozorovat a analyzovat reakce plamene za specifických podmínek a zjistit, zda a za jakých okolností dochází k jeho potlačení. Výsledky mohou přispět nejen k lepšímu pochopení tohoto způsobu hašení, ale také k naznačení, kde by mohl najít praktické uplatnění. Prozkoumání této problematiky může být rovněž přínosné pro budoucí vývoj alternativních hasicích systémů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HOŘENÍ

Hoření je proces, při kterém působení tepla na hořlavé látky vyvolává fyzikální a chemické změny. Jde o chemickou reakci, jejíž výsledkem je uvolňování tepla a světla. Aby mohlo hoření nastat, musí být splněny tři podmínky. První podmínkou je potřeba přítomnosti hořlaviny, tedy paliva. Další potřebou složkou je oxidačního prostředek, např. kyslíku a zdroj tepla. Tuto kombinaci podmínek znázorňuje schéma trojúhelníku hoření v Obrázku 1, které poukazuje na nutnost přítomnosti jednotlivých podmínek, aby mohlo hoření vzniknout. Jestliže jedna složka z tohoto trojúhelníku vynechá, hoření nastat nemůže. [1]



Obrázek 1 Trojúhelník hoření

(zdroj: [1])

V této souvislosti se využívají další pojmy, a to oheň a požár. Oheň je forma hoření, kde prostor hoření je předem určený či definovaný, a je lidmi řízený. Může jít například o táborák nebo hoření v kamnech. Oproti tomu, pojem požár, je forma nekontrolovatelného hoření, kde prostor není předem určen ani ohraničen. Požár může vzniknout buď nekontrolovaným rozšířením ohně, který se vymkne kontrole, nebo přímým zapálením daného prostoru. [1]

1.1 Vznik a proces hoření

Jak je již zmíněno výše, hoření vznikne pouze pokud jsou přítomny všechny složky trojúhelníku hoření. Pro vznik je také ale potřebné dostatečné množství energie pro zapálení. Zapálení může proběhnout různými zdroji, přičemž nejčastějším zdrojem je tepelná energie.

Tepelnou energií lze rozumět plamen, elektrický výboj tepelné záření a podobně. Průběh procesu hoření rozdělujeme do po sobě následujících fází, které se navzájem ovlivňují. [1]

1.1.1 Fáze iniciační

Tato fáze představuje počátek procesu hoření, a je tak nejdůležitější fází. Dochází zde k zapálení hořlavé směsi či materiálu působením tepla. To uvede hořlavý materiál ke vzplanutí, vznícení nebo samovznícení. Podle způsobu zapálení rozlišujeme tři druhy iniciační fáze. Jedná se o iniciaci, která vznikne přímým působením zdroje zapálení, například plamenem. Dalším druhem je zapálení účinkem zdroje tepla a posledním je zapálení bez účinku tepla. Sem se řadí vznícení následkem chemické reakce, například samovznícení. Ve většině případech hoření se však za zdroj zapálení považuje teplo. [1]

Vnik hoření je podmíněn teplotou zdroje zapálení. Jedná se o jakýkoliv vnější podnět, který zahřeje hořlavou látku na její zápalnou teplotu. Zdroj zapálení tedy musí mít vyšší teplotu, než je teplota charakteristická pro zapálení hořlavého materiálu. Zdroj však může na hořlavý materiál působit různými formami tepla. U jednotlivých forem je pak důležitý čas potřebný k dosažení teploty zapálení ohříváního hořlavého materiálu, který je pro každou látku specifický, a hustota tepelného toku, která vyjadřuje, jak rychle se teplo přenáší určitou plochou. O vzniku hoření bez vlivu vnějšího tepla je hovořeno jako o samovznícení. Samovznítit se může například kapalina, která obsahuje nenasycené mastné kyseliny s dvojnými vazbami v molekule. Při následné oxidaci se generuje teplo tak, že dvojná vazba je na sebe schopna vázat kyslík o mnoho rychleji. [1]

1.1.2 Fáze propagační

Tato fáze je doprovázena buď plamenným, nebo bezplamenným hořením, při kterém dochází k chemické reakci hoření, ale bez doprovodu viditelného plamene. Šíření plamene je neustálý proces, při kterém dochází k zapalování nových částí hořlavého materiálu. Hoření se může rozvíjet díky tomu, že se teplo z hořícího materiálu rozšiřuje do okolních částí materiálu. Může to být také přestupem tepla od hořících materiálů nebo sáláním tepla od plamene, pokud je povrch materiálu, který se nachází poblíž místa hoření, dobře přístupný pro kyslík. Jakmile povrch dosáhne teploty vzplanutí, proběhne chemická reakce hoření, čímž se v prostoru objeví plamen. Tímto způsobem se plamenné hoření rozšiřuje na další části hořlavého materiálu. [1]

Rychlost šíření plamene je nejvíce závislá na množství tepla, které se při hoření uvolní. Rychlost šíření ale ovlivňuje více faktorů, jako jsou měrné teplo, tepelná vodivost a vlhkost materiálu. O rychlosti také rozhoduje například koncentrace hořlavých par a další podobné faktory. [1]

1.1.3 Fáze terminační

Po intenzivním hoření dochází během požáru k jeho postupnému slábnutí. Je zde však několik možností ukončení procesu hoření. Buďto úplně vyhoří hořlavé látky, poklesne teplota nebo se sníží koncentrace hořlavých par či oxidačního prostředí. Jednodušeji řečeno, terminační fáze nastane, jestliže je jedna ze základních složek pro hoření přerušena. Přerušování hoření je však možno docílit také lidským zásahem, což je popsáno v kapitolách níže. [1]

1.2 Přerušování hoření

Přerušování hoření neboli uhašení požáru je zaměřeno na způsoby, jakými lze zastavit proces hoření. Zastavení je možno dosáhnout buď omezením, nebo přerušením přívodu minimálně jednoho z potřebných prvků procesu hoření. Odborněji jde o soubor fyzikálně-chemických procesů, které se odehrávají v reakčním pásmu vlivem hasících látek. Existuje několik způsobů, jak dosáhnout přerušování hoření. Některé z nich jsou popsány níže. [2], [3]

1.2.1 Hašení snížením teploty

Hašení snížením teploty je jedna z nejběžnějších metod, přičemž k jejímu provedení se využívá voda, která ochlazuje hořící materiál. Princip spočívá v tom, že se hořlavý materiál ochladí pod teplotu, při které již materiál nehoří. Zároveň, používané hasivo musí disponovat schopností odebírat teplo z místa hoření. [2], [4]

1.2.2 Hašení odstraněním hořlavých látek

V určitých situacích je možné oheň efektivně uhasit tím, že se z oblasti zasažené ohněm odstraní hořlavé materiály, kapaliny nebo plyny. Tento postup je účinný právě proto, že odstraněním hořlavé látky se odstraní jedna ze základních složek trojúhelníku hoření, a to paliva. [2]

1.2.3 Hašení ředěním kyslíku

Tento způsob hašení se využívá k potlačení požárů tím, že se v místě či oblasti požáru sníží koncentrace kyslíku. Jelikož je kyslík nezbytný pro udržení hoření, při poklesu jeho koncentrace v místnosti pod určitou hranici se hoření zastaví, jelikož už není v objemu vzduchu dostatek kyslíku pro pokračování chemických reakcí. Obvykle je tato hranice pod 16 % celkového objemu vzduchu. Tato metoda nachází široké uplatnění nejčastěji v uzavřených prostorách, jako jsou sklady, tunely nebo podzemní garáže, kde není snadné nebo nelze aplikovat jiné metody hašení, jako je voda nebo pěna. Zředění kyslíku může být dosaženo například použitím inertních plynů, kterým může být dusík. [2]

1.2.4 Inhibice

Inhibice je způsob hašení ohně, jejíž princip je založen na chemickém zpomalování procesu hoření. Zpomalují se tak řetězové reakce hoření, co má za následek následné uhašení ohně. Funguje tak, že se do ohně přidá hasební látka, které naruší proces hoření. Drobné částice hasební látky na sebe vážou aktivní částice, které vznikly hořením. [5]

1.2.5 Izolace

Izolace hořlavé látky od přístupu okysličovadla je jedním z klíčových principů hašení požárů. Tento přístup využívá metody, které brání kontaktu hořlavé látky s kyslíkem, což je jeden ze tří hlavních faktorů potřebných pro udržení hoření. Bez přístupu kyslíku se proces hoření zastaví. [4]

1.3 Klasifikace požárů

Klasifikace požárů je klíčová pro efektivní zvládnutí a hašení požárů, jelikož různé typy požárů vyžadují různé metody hašení a různé typy hasicích prostředků. Správná identifikace typu požáru je nezbytná nejen pro ochranu majetku, ale především pro zajištění bezpečnosti obyvatelstva a zasahujících hasičů. Požáry se běžně dělí do několika kategorií podle druhu hořlavého materiálu, který se stal zdrojem požáru. Tento systém klasifikace je standardizován mezinárodně, aby zajistil jednotnost v přístupu k prevenci a řešení požárů.

Znalost klasifikace požárů je důležitá nejen pro hasiče, ale také pro širokou veřejnost. Pochopení základních principů hasicích prostředků a jejich použití může pomoci při zvládnutí drobných požárů ještě před příjezdem profesionální pomoci. Proto je osvěta v oblasti požární bezpečnosti a prevence požárů nezbytnou součástí školení v pracovním prostředí. Správné vybavení, jako jsou hasicí přístroje vhodné pro konkrétní rizika,

a pravidelný nácvik evakuace mohou významně přispět ke snížení následků požárů a ochraně lidských životů.

1.3.1 Požáry třídy A

Do této kategorie spadají požáry pevných hořlavých materiálů, jako je dřevo, textilie, papír, guma a různé druhy plastů. Hlavní metodou hašení těchto požárů je použití vody, která slouží k ochlazování materiálů a snižování jejich teploty pod bod vznícení. Pro zlepšení účinnosti vody se často přidávají tzv. smáčedla, která snižují povrchové napětí vody. Díky tomu voda lépe proniká i do hlubších vrstev hořících materiálů. Smáčedla se obvykle používají ve velmi malém množství, přibližně 0,5 % směsi. Tento postup umožňuje efektivnější zvládnutí požárů této třídy. [2]

1.3.2 Požáry třídy B

Třída B zahrnuje požáry hořlavých kapalin, například benzínu, olejů, petroleje, laků, barev, destilátů nebo alkoholu. Na tyto požáry se zpravidla nepoužívá voda, protože může být neúčinná nebo dokonce nebezpečná. Místo toho se využívají chemické hasební látky, jako je Halotron I., nebo hasicí pěna. Tyto prostředky izolují hořící látku od přístupu vzduchu a snižují šíření požáru. Velmi účinné jsou také hasicí prášky, které rychle přeruší proces hoření. [2]

1.3.3 Požáry třídy C

Tato třída zahrnuje požáry hořlavých plynů, například metanu, propanu nebo vodíku. Hašení požárů tohoto typu vyžaduje speciální postupy. Nejčastěji se používají hasicí prášky nebo oxid uhličitý, který vytlačuje kyslík z oblasti požáru, a tak ho dusí. Ve specifických situacích může být použita i voda, ale pouze pokud nehrozí riziko rozšíření požáru nebo exploze. [2]

1.3.4 Požáry třídy D

Požáry této kategorie se týkají hořlavých kovů, jako jsou hořčík, hliník, titan, zirkonium, sodík nebo draslík. Tyto požáry jsou obzvláště nebezpečné, zejména pokud jsou tyto kovy v práškové formě, kde může dojít k rychlému a nekontrolovatelnému šíření ohně. Kromě toho dosahuje hoření těchto materiálů extrémně vysokých teplot, což činí běžné hasicí prostředky, jako je voda, zcela neúčinnými nebo dokonce nebezpečnými. Pro zvládnutí těchto požárů se používají speciální hasicí prášky určené pro kovy, které jsou schopny efektivně přerušit hoření a zabránit jeho dalšímu šíření. [2]

1.3.5 Požáry třídy F

Tato třída zahrnuje požáry rostlinných nebo živočišných olejů a tuků. Tyto požáry jsou obtížné k uhašení kvůli vysokým teplotám a riziku opětovného vzplanutí. K hašení se používají speciální hasicí pěny nebo chemické prostředky, které neutralizují oleje a vytváří na jejich povrchu vrstvu zabráňující kontaktu s kyslíkem. Současně snížit teplotu a zamezit šíření plamenů. Špatně zvolený prostředek, jako je voda, může způsobit prudké rozstříknutí hořlavého oleje, což může situaci zhoršit. [6]

2 SOUČASNÝ STAV HAŠENÍ

V současné době existuje několik zavedených a časem osvědčených způsobů hašení požárů, z nichž každý je vhodný pro jiné podmínky a typy požárů. Volba správné hasicí metody je klíčová nejen pro efektivitu samotného zásahu, ale i pro minimalizaci škod a zajištění bezpečnosti zasahujících osob. Mezi nejrozšířenější patří hašení vodou, pěnou, hasicími prášky, inertními plyny a halogenovanými hasivy. Každá z těchto metod má své specifické vlastnosti, výhody a omezení, které určují jejich vhodnost pro různé typy požárů. Výběr konkrétního způsobu hašení závisí nejen na typu hořící látky, ale také na prostředí, dostupnosti zdrojů a požadavcích na ochranu majetku a zdraví. Pro účinné zvládnutí požáru je tedy nezbytné porozumění vlastnostem jednotlivých hasiv a způsobům jejich aplikace.

Vedle osvědčených a dlouhodobě používaných způsobů hašení se dnes začínají prosazovat i moderní technologie. Vývoj směřuje například k využívání dronů, které umožňují rychleji vyhledat požár a efektivněji zasáhnout i na těžko přístupných místech [7]. Vedle tradičních metod se dnes zkouší a testují také nové přístupy k hašení požárů. Mezi ně lze například zařadit hašení pomocí zvukových vln, které je zatím ve stádiu výzkumu a experimentální ověření této metody je předmětem této práce. V budoucnu by tento způsob mohl představovat v určitých oblastech šetrnější variantu zásahu proti požárům.

2.1 Hašení vodou

Voda patří mezi nejběžnější a nejúčinnější prostředky pro hašení požárů, především díky své široké dostupnosti a unikátním fyzikálním vlastnostem. Její efektivita při hašení požárů spočívá v kombinaci několika klíčových mechanismů popsanych níže. Voda se osvědčuje především při hašení požárů pevných látek, jako jsou dřevo, papír, textilie nebo jiné běžné materiály. Díky své dostupnosti a efektivitě zůstává klíčovou součástí protipožárních opatření a jedním z nejdůležitějších nástrojů hasičů. [8]

Nejdůležitější hasební efekt vody spočívá v její schopnosti absorbovat teplo díky vysoké hodnotě skupenského tepla při vypařování, což jí umožňuje pohlcovat značné množství tepla z hořlavé látky a ochlazovat ji pod bod vzplanutí, čímž přerušuje proces hoření. Dalším klíčovým efektem je dusivý účinek, při kterém vzniká až 1700 litrů vodní páry z jednoho litru vody, což vytěsňuje kyslík z prostoru hoření a zároveň ředí koncentraci hořlavých par. Voda se také dokáže mísit s některými hořlavými kapalinami, jako jsou lihy, glykoly nebo kyselina octová, a díky ředění těchto látek snižuje koncentraci hořlavých složek, což zpomaluje proces hoření. Mechanické působení vody navíc umožňuje oddělit

hořlavé látky od zdroje požáru, což brání jeho dalšímu šíření, a tento efekt je znám jako dělící. [8]

Aplikace vody při hašení požárů může probíhat různými metodami, které se volí podle specifických podmínek a typu požáru. Jednou z metod je použití plného proudu, zobrazeného na Obrázku 2. Ten je vhodný zejména pro hašení vzdálenějších ohnisek nebo pro ochranu okolních objektů. Nevýhodou této metody je však menší účinnost při hašení rozptýlených požárů. Další možností, jak lze vidět na Obrázku 3, je tříštěný proud. Tato metoda se osvědčuje při zamezení šíření plamenů a ochlazování prostoru, přičemž se využívá především v interiérech. Třetí metodou je vodní mlha, která pracuje s vysokým tlakem a vytváří jemné kapky, jež zajišťují maximální odvod tepla. Tento způsob je ideální pro hašení uzavřených prostorů a je vyobrazena na Obrázku 4. [8]



Obrázek 2 Plný proud

(zdroj:[9])



Obrázek 3 Tříštěný proud

(zdroj: [9])



Obrázek 4 Mlhový proud

(zdroj: [9])

Vlastnosti vody lze vylepšit úpravou některých jejích parametrů. Přidáním specifických přísad lze například výrazně snížit povrchové napětí vody, což zvyšuje její schopnost smáčet různé povrchy a zvyšuje účinnost při hašení požárů. Tyto přísady, známé jako smáčedla, se obvykle používají v koncentracích nepřesahujících deset procent. Upravená voda se díky těmto vlastnostem často využívá nejen při hašení, ale také při odstraňování olejů, přípravě emulzí či v papírenském průmyslu, kde je vysoká smáčivost klíčová. [8]

2.2 Hašení pěnou

Hasicí pěny jsou po vodě nejčastěji používaným hasivem, zejména při požárech hořlavých kapalin v průmyslu. Pěnové systémy jsou speciálně navrženy pro požáry, kde voda není účinná. Primárním hasebním efektem pěny je izolační schopnost, která tak zabraňuje přístupu kyslíku k hořlavé látce. Sekundární schopností tohoto hasiva je pak efekt ochlazovací. Dělí se podle čísla napěnění, které udává kolikrát se zvětší objem kapaliny (pěnotvorného roztoku) po jejím napěnění, na těžké, střední a lehké pěny. Těžká pěna má největší chladicí efekt oproti středním a lehkým pěnám, které mají nižší chladicí schopnost kvůli nízkému obsahu vody. Hasicí pěna je vhodná pro požáry tříd A a B, ale nelze ji použít na látky reagující s vodou nebo na elektrická zařízení pod napětím. Pěna se vytváří pomocí speciálních hasičských přístrojů, které míchají vodu a pěnový koncentrát, což vytváří objemnou pěnu. [8], [10]

2.3 Hašení práškem

Hasicí prášky jsou považovány za velmi účinné hasivo s širokým spektrem využití, přičemž jejich hlavní výhodou je elektrická nevodivost. Tato vlastnost umožňuje jejich bezpečné použití při hašení požárů elektrických zařízení pod napětím, kde by aplikace vodních nebo pěnových hasiv mohla představovat riziko úrazu elektrickým proudem. Díky této schopnosti jsou hasicí prášky běžnou volbou nejen v domácnostech a kancelářích, ale také v průmyslu, kde je nutné chránit elektrická zařízení, rozvodny, transformátory nebo servery. Prášky fungují na principu přerušení chemické reakce hoření. Obsahují látky, které při aplikaci na plamen vážou aktivní radikály, čímž narušují řetězovou reakci, která je základem hoření. [11], [12]

Hasicí prášky se dělí do několika kategorií podle typu hašených požárů. BC prášky jsou určeny pro hašení požárů třídy B, tedy hořlavé kapaliny a C, plyny. Jejich složky přerušují řetězovou reakci hoření vazbou aktivních radikálů. ABC prášky se využívají pro hašení požárů tříd A, tedy pevné látek, B a C, přičemž při vysokých teplotách na povrchu hořících látek vytvářejí ochrannou glazuru, která omezuje šíření tepla a přístup kyslíku. Pro hašení hořlavých kovů, třída D, se používají speciální prášky, jejichž hlavní složka při vysokých teplotách vytváří vrstvy, které izolují povrch hořícího kovu a postupně tak požár uhasí. [11]

2.4 Hašení inertními plyny

Inertní plyny jsou látky, které díky své chemické stabilitě nereagují snadno s ostatními sloučeninami, což je činí užitečnými v mnoha průmyslových i bezpečnostních aplikacích. Mezi jejich klíčové vlastnosti patří nehořlavost a nekorozivnost, schopnost izolovat nebo vytěsnit kyslík, nízká tepelná vodivost minimalizující přenos tepla na hořlavé látky a vysoká tepelná kapacita, která jim umožňuje vázat velké množství tepla. Hašení inertními plyny funguje na principu ředění hořlavé směsi, kdy snížením koncentrace kyslíku a hořlavých látek v místě požáru lze přerušit proces hoření – obvykle při poklesu kyslíku na 10–12 %. Inertní plyny vytlačují kyslík ze vzduchu v okolí požáru, čímž zabraňují chemickým reakcím podporujícím hoření, a zároveň ochlazují hořící látky díky absorpci tepla. Použití inertních plynů je vhodné zejména tam, kde voda či pěna není ideální, například v datových centrech, archivech nebo elektrických rozvodnách. Jejich použití je bezpečné, nezanechávají zbytky, nepoškozuji citlivé vybavení a jsou ekologicky šetrné. Typická nasazení zahrnují ochranu elektroniky, archivů, muzeí či hašení v uzavřených prostorách motorů a strojoven v lodním a leteckém průmyslu. [13]

2.4.1 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý (CO_2) je inertní plyn s vlastnostmi, které z něj činí ideální prostředek pro hašení požárů v mnoha specifických situacích. Tento bezbarvý, nehořlavý a nepáchnoucí plyn je snadno rozpustný ve vodě a v nízkých koncentracích běžně přítomný ve vzduchu. Při hašení funguje na principu fyzikálního i chemického potlačení požáru, kdy především snižuje koncentraci kyslíku v okolí ohně a zároveň absorbuje teplo, čímž brání šíření plamenů. Účinnost hašení CO_2 je patrná zejména v uzavřených prostorách, kde se běžně aplikuje v koncentracích 30–35 % objemových. Používá se k ochraně cenného vybavení, archivů a laboratoří, protože nezanechává zbytky a minimalizuje poškození citlivých materiálů. Oxid uhličitý je tak díky svým vlastnostem klíčovým nástrojem v požární ochraně, kde voda či jiné hasební prostředky nejsou vhodné. [13], [14]

CO_2 lze skladovat v tlakových lahvích, protože je při relativně nízkém tlaku snadno zkapalnitelný. V běžných podmínkách přechází do plynného stavu, čímž umožňuje rychlé a efektivní použití při hašení. Relativní hustota CO_2 vůči vzduchu je 1,529, což znamená, že CO_2 je těžší než vzduch, což může ovlivnit jeho distribuci v prostoru. Přesto však jeho použití vyžaduje opatrnost, protože ve vysokých koncentracích může být pro člověka nebezpečný – způsobuje závrať, dušení či dokonce bezvědomí při koncentraci 8–10 %. Při koncentraci 3–4 % objemu CO_2 ve vzduchu může docházet k zrychlenému dýchání a bolestem hlavy. CO_2 není považován za jedovatý, je však málo toxický a při vyšších koncentracích může způsobit udušení. Nelze jej používat v situacích, kde je přítomný žhavý kov či silně reaktivní materiály, protože může dojít k nežádoucím chemickým reakcím vedoucím k vývinu oxidu uhelnatého nebo vzniku jisker. Tento plyn je také nevodivý, což znamená, že je ideální pro hašení elektrických zařízení pod napětím. [13], [14]

CO_2 se často používá v přenosných hasicích přístrojích pro lokální hašení, v stabilních hasicích systémech pro objemové hašení, ale také v plynových hasicích automobilech. Hasební koncentrace závisí na druhu hořlavé látky a začíná na 30 % objemu CO_2 , přičemž koncentrace kyslíku musí klesnout pod 14 %, aby došlo k efektivnímu hašení. Vzhledem k malému ochlazovacímu účinku CO_2 existuje riziko opětovného vznícení, a proto není účinný na žhnoucí hořlavé materiály. CO_2 je také méně efektivní při hašení hořlavých prachů, protože může dojít k jejich rozvíření. [13], [14]

2.4.2 Dusík

Dusík je bezbarvý, nehořlavý plyn, který nemá zápach ani chuť. Je o něco lehčí než vzduch, nepůsobí dráždivě a je netoxický pro lidský organismus. V atmosféře tvoří přibližně 78,1 % vzduchu. Chemicky je dusík netečný, to znamená, že za běžných podmínek nereaguje s většinou látek. Získává se destilací zkapalněného vzduchu a následně se uchovává ve stlačeném stavu v tlakových nádobách, kde dosahuje tlaku až 150 barů. Tento způsob skladování má své limity, protože tlakové nádoby mohou obsahovat méně dusíku než jiné plyny, jako je například CO_2 . Dusík je také lehčí než vzduch, což způsobuje jeho tendenci k úniku netěsnostmi, což je další nevýhoda při jeho používání. [8], [13]

Dusík se široce využívá v různých průmyslových a technických aplikacích. V oblasti požární ochrany je vhodný pro hašení požárů v uzavřených prostorech, jako jsou reaktory, destilační kolony, nádrže, zásobníky nebo mlýny. Vzhledem k tomu, že je lehčí než vzduch, nemůže být použit v otevřených prostorech, kde by jeho koncentrace pro hašení nebyla dostatečná. Používá se také k vytváření inertní atmosféry při přečerpávání nebezpečných kapalin a pro ochranu zařízení během odstávek a oprav, zejména v chemickém či petrochemickém průmyslu. Dalším využitím dusíku je jeho role jako ochranného inertního plynu v laboratořích, kde zabráňuje oxidaci látek, které by snadno reagovaly s kyslíkem. Dusík je také klíčovým komponentem v některých hasicích systémech, například při transportu hasicích prášků v automobilových hasičských přístrojích. Jeho výhodou je schopnost vytvářet bezpečné a stabilní prostředí pro technologie, které mohou být rizikové, a to díky jeho netečnosti. [8], [13]

2.4.3 Argon

Argon je jeden ze vzácných plynů, které jsou ve vzduchu obsaženy z 1 %. Argon z toho tvoří 0,93 % a je jediným vzácným plynem, který lze využít pro hašení kvůli jeho finanční dostupnosti. Argon lze získávat výrobou pomocí frakční destilace zkapalněného vzduchu. Argon je inertní plyn, což znamená, že je chemicky velmi stabilní a nevede k žádným reakcím s jinými látkami. Je nejedovatý, bezbarvý, bez zápachu a málo rozpustný ve vodě. Argon je těžší než vzduch, což mu umožňuje zůstat ve specifických oblastech a efektivně potlačit hoření. [8], [13]

Použití argonu v hasicích systémech je obzvláště efektivní v malých uzavřených prostorech, kde nelze využít oxid uhličitý a dusík by měl nedostatečný účinek. Příkladem je například hašení reaktivních kovů, jako je zirkon nebo uran. Argon se také využívá k vytvoření inertní

atmosféry, kde je nutné pracovat s nebezpečnými nebo samozápalnými materiály. Kromě toho se argon používá při výrobě hasicí pěny s vysokým číslem napěnění, která je efektivní při hašení látek jako silany, borany nebo radioaktivní materiály. Tato pěna je kombinací argonu a dalších plynů, přičemž nejznámější směsí je Inergen. Vzhledem ke své stabilitě a netečnosti je argon ideální nejen pro speciální hasicí aplikace, ale i pro průmyslové a laboratorní procesy, kde je třeba udržet kontrolované, bezpečné prostředí. [8], [13]

2.4.4 Inergen

Je to směs plynů, která je složena z 52 % dusíku (N_2), 40 % argonu (Ar) a 8 % oxidu uhličitého (CO_2). Tato unikátní kombinace plynů vytváří zředovací efekt, který je účinný při potlačování požárů. Inergen má výhodu v tom, že neškodí životnímu prostředí, protože neovlivňuje ozonovou vrstvu ani nepřispívá ke globálnímu oteplování. Kromě toho má podobnou hustotu jako běžný vzduch, což zajišťuje efektivní rozptyl a rovnoměrné pokrytí chráněného prostoru. [14]

Jednou z hlavních výhod Inergenu je jeho schopnost zamezit hoření díky zředění kyslíku v ovzduší. Směs plynů však umožňuje lidem i v těchto podmínkách dýchat, což je zásadní pro bezpečnost osob v chráněných oblastech. Inergen je také nevodivý, což znamená, že je bezpečný pro použití v elektrických zařízeních, aniž by došlo k poškození citlivé techniky. Dále je nekorozivní a odolný vůči vysokým teplotám, což z něj činí ideální hasicí médium pro náročné průmyslové podmínky. [14]

Tento plyn je obvykle aplikován v koncentracích mezi 38 a 80 % objemu prostoru, což závisí na konkrétním požárním riziku – tedy podle toho, jaký typ a jaké množství hořlavých materiálů se v prostoru nachází a taktéž, jaký je celkový objem prostoru. Takovéto rozmezí koncentrace zajišťuje účinné hašení při minimalizaci rizika pro osoby v chráněné oblasti. Díky svým vynikajícím vlastnostem se Inergen osvědčil jako spolehlivá a šetrná volba pro prevenci a likvidaci požárů v mnoha různých oblastech. Inergen se používá především v stabilních hasicích zařízeních, kde poskytuje spolehlivou ochranu i v citlivějších prostředích, jako jsou chemické závody, lakovací kabiny, archivy, galerie a muzea, a taktéž elektrických zařízení a výpočetní techniky, kde je ochrana proti požáru nezbytná pro zachování hodnotných předmětů. [14]

2.5 Halotronové hasicí přístroje

Halotronová hasiva jsou moderní náhradou za dříve používané halonové hasicí prostředky, jejichž výroba byla ukončena kvůli negativním dopadům na životní prostředí, především na ozonovou vrstvu. Na rozdíl od původních halonů mají halotronová hasiva nižší potenciál poškozování ozonové vrstvy, a tedy přispívání ke globálnímu oteplování. Tato hasiva obsahují fluorované uhlovodíky, konkrétně tetrafluorhexan, který efektivně ochlazuje plameny a zabraňuje přístupu kyslíku k ohnisku požáru. [15]

Halotronová hasiva jsou ideální pro hašení různých materiálů, kromě pevných žhoucích látek. Vyznačují se vysokou účinností a šetrností k hašeným objektům, protože nezanechávají žádné zbytky hasiva, jako například práškové hasicí přístroje. To je činí vhodnými pro použití v prostředích s citlivou elektronikou, jako jsou počítačové servery, telekomunikační zařízení nebo jemná mechanika. Díky elektrické nevodivosti a absenci korozivních účinků mohou být použita pro hašení zařízení pod napětím až do 1 000 V, a to ze vzdálenosti minimálně 1 metru. Při použití halotronových hasiv je však důležité zajistit dostatečné větrání, protože při vysokých teplotách mohou uvolňovat toxické látky. Proto se nedoporučuje jejich použití v uzavřených prostorech bez ventilace. [15]

2.6 Aerosolové hasivo

Aerosolové hašení je moderní metodou požární ochrany, která využívá speciální generátory k výrobě hasicího aerosolu. Tento aerosol vzniká spalováním směsi anorganických solí přímo v generátoru. Princip jeho účinku je podobný klasickým hasicím práškům, avšak díky mnohem menším částicím dosahuje aerosol vyšší účinnosti, protože lépe proniká k ohnisku požáru a efektivněji přerušuje proces hoření. Aerosolové systémy jsou vhodné k hašení požárů pevných látek a hořlavých kapalin, tedy požárů tříd A a B. Aerosolové generátory se obvykle propojují s detekčními a řídicími systémy, čímž vzniká stabilní hasicí zařízení. Mezi hlavní výhody těchto systémů patří snadná a rychlá instalace, minimální nároky na údržbu a nízká spotřeba hasiva. Ačkoli aerosol není toxický, může dráždit sliznice dýchacích cest a očí. Viditelnost v prostoru, který je zasažen aerosolem, je prakticky nulová. Proto pobyt v takovém prostoru bez ochranných prostředků by neměl přesáhnout 10 sekund. Účinnost aerosolového hasiva je nejvyšší v uzavřených prostorech, a naopak v místech, kde je narušena těsnost (například netěsná okna, dveře nebo velké otvory), se efektivita systému výrazně snižuje. Aerosolový systém rovněž není vhodný pro hašení chemických výrobků, polymerních materiálů se sklonem ke žhnutí bez přístupu kyslíku,

ani pro materiály, které při požáru vytvářejí vnitřní žhnoucí dutiny, jako jsou vláknité, sypké nebo porézní látky. Jeho použití není vhodné také při hašení hybridních slitin kovů a lehkých kovů. [8], [16]

3 ZVUK

Zvuk je mechanické vlnění, které se šíří prostředím konečnou rychlostí. Jeho vznik je spojen s dočasnými změnami hustoty, tlaku a teploty prostředí, přičemž tyto změny jsou ve srovnání s běžnými hodnotami velmi malé. Zvukové vlny vznikají vzájemným působením pružnosti a setrvačnosti částic média, kdy pružnost způsobuje, že změna objemu média vede ke změně tlaku, zatímco setrvačnost částic těmto změnám klade odpor. Výsledkem tohoto procesu je šíření akustických vln. Rychlost šíření zvuku závisí na vlastnostech prostředí, zejména na jeho hustotě a pružnosti. V atmosférickém vzduchu dosahuje rychlost zvuku přibližně 340 m/s, zatímco ve vodě je podstatně vyšší, okolo 1500 m/s. Tento údaj se označuje jako rychlost zvuku a její hodnota se může měnit v závislosti na konkrétních podmínkách prostředí. [17], [18]

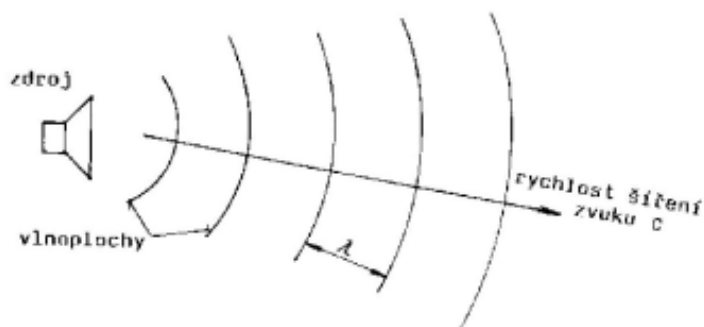
V následujících kapitolách bude podrobně rozebráno akustické vlnění, různé typy vlnění a jejich vlastnosti. Dále budou popsány klíčové parametry zvuku, například frekvence a vlnová délka, a pozornost bude věnována rovněž akustickému tlaku a intenzitě zvuku.

3.1 Akustické vlnění

Zvuk se šíří prostřednictvím akustického vlnění v plynech, kapalinách i pevných látkách. V homogenním izotropním prostředí postupuje vlnění přímočaře. Podle směru kmitání částic vůči směru šíření vlnění se rozlišuje podélné a příčné vlnění. Tyto typy vlnění se liší způsobem, jakým se šíří energie prostřednictvím kmitání částic prostředí, a také směrem, kterým částice kmitají vzhledem ke směru šíření vlny. U podélného vlnění kmitají částice ve směru šíření vlnění, zatímco u příčného vlnění kmitají kolmo k tomuto směru, přičemž je nutné definovat rovinu kmitání. Více o tomto ale v budoucí podkapitole 3.2. Pokud se kmity odehrávají v jediné rovině, jedná se o lineárně polarizované vlnění. [18]

Podstatným faktem je, že částice prostředí se spolu s vlněním nepohybují jednosměrně, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Přenos akustického vlnění je však vždy spojen s přenosem energie. V plynech a kapalinách může vznikat pouze podélné vlnění, protože tyto látky jsou pružné pouze v rámci objemové stlačitelnosti. Naopak elastické materiály umožňují jak podélné, tak příčné vlnění díky pružnosti nejen vůči tahu a tlaku, ale i vůči smykovým silám. Kombinace těchto vlastností může vést k ohybovému kmitání. [18]

Zvukové vlnění se šíří prostředím od zdroje zvuku ve formě vlnoploch, jak znázorňuje Obrázek 5. Vlnoplochy představují místa, kde je ve stejném okamžiku dosaženo identického akustického stavu. Kolmice na vlnoplochu se označuje jako akustický paprsek. [18]



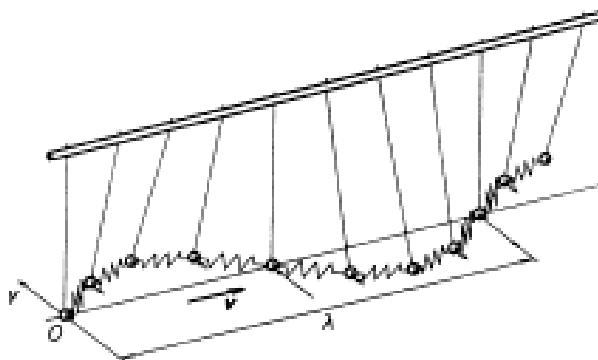
Obrázek 5 Schéma šíření zvuku od zdroje

(zdroj: [18])

Mezi pevnými látkami, kapalinami a plyny dochází ke kmitavému pohybu, tzn. každý hmotný element lze chápat jako oscilátor. Pokud je částice vychýlena z rovnovážné polohy, rovnováha sil je narušena a vznikají síly, které usilují o návrat částice do původního stavu. Proto jednoduché fyzikální oscilátory, jako je struna, ladička či pružina, mohou sloužit jako akustické generátory. [18]

3.2 Typy vlnění

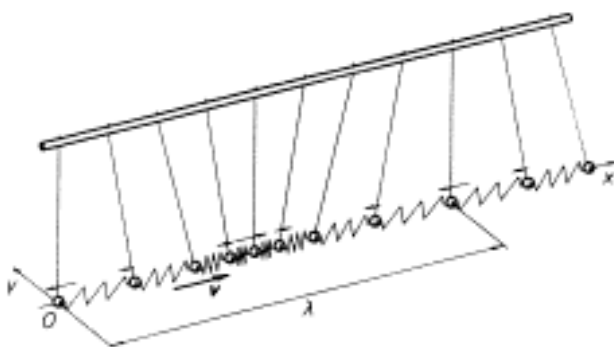
Postupné vlnění vzniká, když kmitající objekt předává část své energie částicím ve svém okolí. Tyto částice pak přenášejí energii dále, přičemž se vytváří vlna šířící se prostředím. Zdrojem vlnění může být například vibrující těleso nebo mechanický oscilátor. Směr, kterým zdroj kmitá, určuje, zda se jedná o příčné nebo podélné vlnění. U příčného vlnění zdroj kmitá kolmo na směr šíření vlny, viz Obrázek 6. Tento typ vlnění lze snadno vizualizovat jako sinusovou křivku. Jedním z charakteristických parametrů příčného vlnění je vlnová délka, označovaná symbolem λ a podrobněji popsána v podkapitole 3.5. Příčné vlnění se často objevuje například na hladině vody, kde částice vody kmitají nahoru a dolů, tedy kolmo k šíření vlny. [19]



Obrázek 6 Příčné vlnění

(zdroj: [20])

Na rozdíl od příčného vlnění se u podélného vlnění částice prostředí pohybují ve směru šíření vlny. Tento pohyb způsobuje střídání oblastí zhuštění a zředění. Takové uspořádání je typické právě pro zvukové vlny, které se šíří vzduchem. Charakteristickým prvkem podélného vlnění je, že během jedné vlnové délky dochází ke vzniku jednoho zhuštění a jednoho zředění, jak znázorňuje Obrázek 7. [19]



Obrázek 7 Podélné vlnění

(zdroj: [20])

Speciálním typem vlnění je stojaté vlnění, které vzniká, když se dvě vlny s opačnými směry šíření setkají a interferují. Typickým příkladem stojatého vlnění je struna hudebního nástroje, například kytary, která je upevněna na obou koncích. Stojaté vlnění se vyznačuje přítomností kmiten (míst s maximální amplitudou) a uzlů (míst bez pohybu). Tento jev vzniká odrazem vlnění na pevných koncích struny. Vlnění má široké uplatnění v mnoha oblastech vědy a techniky. Zvukové vlny, které jsou podélné, jsou klíčové pro akustiku a komunikaci. Příčné vlny se vyskytují u elektromagnetického záření, například světla, a jejich vlastnosti jsou základní pro optiku. [19]

Avšak je důležité podotknout, že zvuková vlna může kmitat pouze v prostředí, které umožňuje přenos mechanického vlnění. To znamená, že kmitání zvukové vlny vyžaduje médium, kterým může procházet, například vzduch, vodu, pevné látky nebo jiné hmotné prostředí. Zvukové vlny se šíří prostřednictvím hustotních změn v materiálu, tedy střídáním oblastí vyššího a nižšího tlaku. V prostředí, jako je vzduch, zvuková vlna vzniká tak, že částice vzduchu kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Tyto kmitající částice pak předávají energii svým sousedním částicím, což vytváří řetězovou reakci, která se šíří prostorem jako vlna. Tento proces se označuje jako podélné vlnění, protože částice kmitají ve směru šíření vlny. Pokud však chybí médium, jako je například ve vakuu, zvuková vlna se šířit nemůže, protože neexistují žádné částice, které by mohly přenášet vibrace. [18], [21], [22]

V pevných látkách se mohou zvukové vlny šířit jak podélně, tak příčně což umožňuje přenos komplexnějších forem zvukového vlnění. Naopak v plynech a kapalinách je přenos omezen pouze na podélné vlny, protože tyto látky neodolávají smykovému napětí potřebnému pro šíření příčných vln. Rychlost šíření zvuku závisí na vlastnostech média, jako je hustota, teplota a pružnost. Například zvuk se šíří rychleji v pevných látkách než v kapalinách a rychleji v kapalinách než v plynech, což je dáno rozdíly v molekulární hustotě a schopnosti částic efektivně přenášet energii. [18], [21], [22]

3.3 Lom a odraz vlnění

Zvukové vlnění se za běžných okolností šíří prostředím s konstantní hustotou rovnoměrně do všech směrů. V praxi však často naráží na prostředí s odlišnou hustotou nebo překážky, což ovlivňuje jeho šíření. Tento proces vysvětluje Huygensův princip, podle kterého lze každou zvukovou vlnu, která dopadá na překážku, považovat za zdroj dalšího vlnění. Vzniká tak nová vlnoplocha. [19]

Při odrazu zvukového vlnění platí podobný zákon jako u světelných paprsků, tedy úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. Na odraznou plochu však nedopadá pouze jediný paprsek, ale celá vlnoplocha. To způsobuje, že jeden její okraj dorazí na povrch dříve než druhý, což ovlivňuje výsledný tvar odražené vlny. Pokud vlna narazí na překážku, která je dostatečně pevná, odrazí se zpět s opačnou fází. Na místě kontaktu, kde dochází ke změně fáze, vzniká uzol, tj. bod, který zůstává v rovnovážné poloze. [19]

Podobně jako u světla dochází u zvukového vlnění také k lomu. Tento jev nastává při přechodu mezi dvěma prostředími s odlišnou hustotou. Při změně hustoty se mění nejen

směr šíření vlnění, ale také jeho rychlost. Lom zvukových vln lze popsat indexem lomu, který vyjadřuje poměr rychlostí vlnění ve dvou prostředích a úhlů dopadu a lomu. Dalším důležitým jevem je ohyb vlnění, který nastává při dopadu na malé překážky. Díky Huygensovu principu se každý bod vlnoplochy stává zdrojem elementárního záření, což umožňuje šíření vlnění i za překážku. [19]

3.4 Frekvence

Zvukové frekvence představují základní charakteristiku zvukových vln a jsou definovány jako počet cyklů za sekundu, které zvuková vlna dokončí. Tyto frekvence se označují jednotkou Hertz a určují výšku zvuku – čím vyšší je frekvence, tím vyšší tón slyšíme, a naopak. Frekvence zvukové vlny se může měřit také v kilohertzích nebo megahertzích, což se využívá v různých technických a vědeckých oborech. Zvukové vlny lze rozdělit do tří hlavních kategorií, a to slyšitelné, ultrazvukové a infrazvukové. Slyšitelné zvuky spadají do rozsahu 16 Hz až 20 kHz, což je rozmezí, které dokáže vnímat lidské ucho. Frekvence, které spadají pod hranici 16 Hz jsou známé jako infrazvuk, zatímco frekvence nad 20 kHz se označují jako ultrazvuk. [23]

V každodenním životě se setkáváme s různými zvukovými frekvencemi, například při poslechu hudby, ptačím zpěvu nebo zvuku automobilového klaksonu. Každý zvuk má svou jedinečnou frekvenci, která ovlivňuje jeho barvu a tón. Například v hudbě je dělení na oktávy příkladem práce s frekvencemi. Rozdíl mezi dvěma tóny vzdálenými jednu oktávu odpovídá poměru jejich frekvencí 2:1, tedy vyšší tón má dvojnásobnou frekvenci než tón nižší. [23]

Zvukové frekvence však nejsou jen záležitostí hudby nebo každodenních zvuků; mají také významný vliv na naše zdraví a pohodu. Například dlouhodobé vystavení hlasitým nebo vysokofrekvenčním zvukům může způsobit poškození sluchu, což může vést až ke ztrátě sluchu. Na druhou stranu, zvukové frekvence nacházejí uplatnění i v terapeutických metodách. Nízkofrekvenční zvuky jsou často využívány k navození stavu relaxace a uvolnění, zatímco vysokofrekvenční zvuky mohou stimulovat mozek a podporovat soustředění. [23]

3.5 Vlnová délka

Vlnová délka je vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body na vlně, které mají v daném okamžiku stejný akustický stav. Tato vzdálenost se také může popsat jako dráha, kterou zvuková vlna urazí během jednoho kmitu, tedy za dobu jedné periody. V praxi se vlnová

délka obvykle měří mezi dvěma snadno identifikovatelnými body, například mezi vrcholem a dalším vrcholem vlny nebo mezi dvěma dny. Vlnová délka je důležitým parametrem pro modelování zvukových vln, protože ovlivňuje šíření zvuku v různých prostředích. [18], [24]

Vlnová délka je úzce spjata s frekvencí vlny. Konkrétně je vlnová délka nepřímo úměrná frekvenci. Pokud dvě vlny mají stejnou rychlost šíření, vlna s vyšší frekvencí bude mít kratší vlnovou délku. Naopak vlna s nižší frekvencí bude mít delší vlnovou délku. To znamená, že čím vyšší je frekvence vlny, tím kratší vzdálenost mezi jejími sousedními body, vrcholy nebo dny, bude. [18], [24]

3.6 Zdroje zvuku

Zvuk vzniká díky různým typům zdrojů, které se liší svým chováním a tím, jak vytvářejí zvuková pole. Nejjednodušším typem zdroje zvuku je pulzující koule, známá jako monopól nebo kulový zářič. Tento zdroj vyzařuje zvuk rovnoměrně do všech směrů se stejnou amplitudou a fází. Vytváří tak pole kulových vln, kde akustická intenzita klesá s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje a akustický tlak klesá úměrně se vzdáleností. Tento model chování se vztahuje na většinu běžných zdrojů zvuku, jako jsou stroje nebo dokonce celé továrny, pokud je naše poloha ve větší vzdálenosti ve vztahu k jejich rozměrům. [25]

Dalším typem zvukového zdroje je dipól, který vzniká v případech, kdy dvě blízké součástky kmitají proti sobě. Taková konfigurace generuje směrově závislé zvukové pole. Největší intenzita zvuku se šíří ve směru osy dipólu, zatímco vyzařování do roviny kolmé na tuto osu je teoreticky nulové. Dipól tedy nevysílá zvuk rovnoměrně do všech stran, ale spíše v určitých směrech, což má vliv na to, jak daleko a jak hlasitě je zvuk slyšet. Tento typ zdroje se často vyskytuje v technických aplikacích nebo ve strojních konstrukcích. [25]

Specifickým typem je také liniový zdroj, který vzniká, když kmitá soufázově řada bodových zdrojů. Zvuková energie se v tomto případě šíří do všech směrů kolmých na řadu zdrojů a vytváří válcové zvukové vlny. Narozdíl od něj plošný zářič, jehož rozměry jsou podstatně větší než délka vyzařované zvukové vlny, generuje rovinné zvukové pole. Rovinné vlny se šíří beze změny intenzity nebo tlaku, což lze pozorovat například v uzavřených trubicích, kde se hladina zvuku měřená na začátku i konci prakticky neliší. [25]

V případech, kdy působí více zdrojů zvuku současně, vznikají složitá interferenční pole. Tyto situace jsou běžné například ve strojních konstrukcích nebo komplexních prostředích, kde jednotlivé zářiče svým vzájemným působením vytvářejí pole, ve kterém se zvuková energie šíří komplikovaněji. Zde neplatí jednoduché vztahy mezi vzdáleností, akustickým

tlakem a intenzitou, protože na výsledný zvuk má vliv složitá interference všech zdrojů. Tento přehled zdrojů zvuku poskytuje základní pochopení toho, jak se zvuk šíří v různých situacích a prostředích. Každý typ zdroje má své specifické vlastnosti, které ovlivňují výsledné zvukové pole a jeho šíření. [25]

3.7 Vibrace

Vibrace, jinak také kmitání mechanické soustavy, představují pohyb pružného tělesa nebo prostředí, kdy jeho jednotlivé body oscilují kolem rovnovážné polohy. Jsou definovány především amplitudou a frekvencí. Historicky se pro kmitání slyšitelných frekvencí lidského organismu používal termín „chvění“. Velikost vibrací lze vyjádřit několika způsoby – výchylkou, rychlostí nebo zrychlením. V současnosti je zrychlení nejčastěji používanou veličinou díky dostupnosti moderních akcelerometrů. Vibrace můžeme rozdělit na deterministické a náhodné. Deterministické vibrace mají přesně definovaný časový průběh, který umožňuje předpovědět jejich hodnotu v libovolném čase. Náhodné vibrace nelze předem určit, protože jejich okamžitá hodnota není jednoznačně závislá na předchozím průběhu. Speciální kategorii tvoří mechanické rázy, které vznikají náhlou změnou síly, polohy nebo zrychlení, a které vyvolávají přechodové jevy. Při přenosu vibrací na člověka se však hovoří spíše o otřesech než o rázech. Velikost vibrací lze charakterizovat různými veličinami, z nichž nejvýznamnější je efektivní hodnota. Tato veličina přímo souvisí s energií vibrací a jejich potenciálními zdravotními riziky. Dalším klíčovým parametrem je činitel výkmitu, což je poměr mezi špičkovou a efektivní hodnotou vibrací. V praxi se vibrace často popisují hladinovými hodnotami, které umožňují snadnější práci se širokým rozsahem jejich velikostí. Náhodné vibrace lze analyzovat buď prostřednictvím spektra, tedy závislosti velikosti vibrací na frekvenci, nebo pomocí efektivních hodnot v určitém frekvenčním pásmu. Spektrum může být spojité, čárové, nebo jejich kombinace. [25]

Mechanická impedance je klíčová veličina popisující vlastnosti mechanických soustav při přenosu vibrací. Rozlišujeme dva hlavní typy, a to vstupní impedanci, která popisuje vztah mezi silou a rychlostí měřenými ve stejném bodě a přenosovou impedanci, která charakterizuje přenos vibrací mezi různými body soustavy. Impedance se využívá k analýze rezonance a energie. Praktické měření této veličiny je však náročné a často omezené umístěním snímačů. Proto se v praxi obvykle používá činitel přenosu, který jednodušeji charakterizuje přenos vibrací v daném směru. [25]

3.8 Akustický tlak

Akustický tlak vzniká v důsledku změn hustoty molekul v prostředí během šíření zvukových vln. Tyto změny způsobují střídání míst s přetlakem a podtlakem, což ovlivňuje celkový statický tlak vzduchu. Celkový statický tlak je součtem středního barometrického tlaku a akustického tlaku. Barometrický tlak má přibližnou hodnotu 100 000 Pa, zatímco akustický tlak je ve srovnání s ním mnohonásobně nižší. Například práh slyšení lidského ucha odpovídá akustickému tlaku 20 μPa . Průběh akustického tlaku je z matematického hlediska totožný s průběhem akustické výchylky nebo akustické rychlosti. Tato podobnost umožňuje jednotný přístup při jejich výpočtech a interpretaci. [18]

3.8.1 Hladina akustického tlaku

Nejslabší zvuk, který je lidské ucho schopno zachytit, odpovídá akustickému tlaku 20 μPa , což je 0 dB. Lidský sluch je schopen vnímat akustické tlaky mnohem větší, než je tento práh. Zvýšení akustického tlaku na desetinásobek odpovídá nárůstu hladiny o 20 dB, zatímco zvýšení o 6 dB znamená zdvojnásobení akustického tlaku. Pro snadnější práci s hodnotami akustického tlaku se používá logaritmická stupnice s jednotkami decibel. Tato stupnice nejenže zajišťuje přehlednost, ale také lépe odpovídá subjektivnímu vnímání hlasitosti lidským uchem. Hladina akustického tlaku musí být vždy vztahována k určitému frekvenčnímu pásmu nebo konkrétnímu kmitočtu. Celková hladina akustického tlaku například zahrnuje celý slyšitelný frekvenční rozsah, zatímco hladina akustického tlaku v oktávovém pásmu se zaměřuje na konkrétní frekvenční rozsah o šíři jedné oktávy. [18]

3.8.2 Hladina intenzity zvuku

Při měření hladiny intenzity zvuku je nezbytné brát v úvahu šíři frekvenčního pásma, ke kterému se daný údaj vztahuje. Hodnota intenzity zvuku je přímo úměrná šíři pásma – například hladina intenzity zvuku v pásmu 10 Hz je o 10 dB vyšší než v pásmu 1 Hz. V technické praxi se běžně používají širší frekvenční pásma, jako jsou oktávová nebo třetinooktávová pásma. Tato pásma umožňují přesnější analýzu a popis zvuku. Hladiny intenzity zvuku a akustického tlaku je proto nutné vždy vztahovat ke konkrétnímu pásmu, aby poskytovaly smysluplné a srozumitelné výsledky. [18]

3.9 Akustické pole

Zvukový zdroj vytváří ve svém okolí akustické pole, jehož vlastnosti závisí na mnoha faktorech, jako je poloha zdroje, tvar jeho vyzařovacích ploch, počet zdrojů a jejich

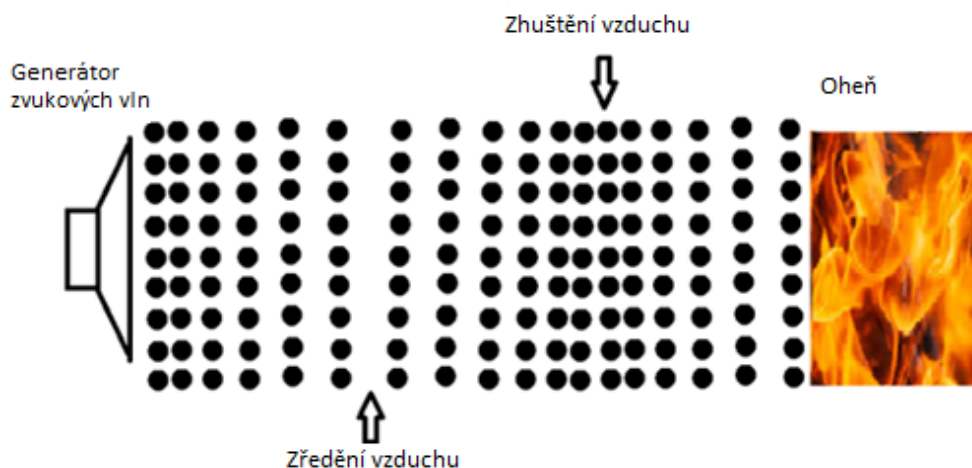
rozmístění. Tvar zvukového pole a vlnoploch se mění vlivem překážek, které se nacházejí v cestě šířícím se akustickým vlnám. Pokud je délka dopadající vlny kratší než rozměry překážky, dochází k odrazu zvukových vln. Podle povahy šíření vln lze akustická pole rozdělit na pole přímých a pole odražených vln. Pole přímých vln se vyznačuje tím, že akustická energie se šíří přímo postupnými vlnami. Naopak v poli odražených vln se část akustické energie odráží zpět od ploch, které vytvářejí překážky v prostoru. Zároveň lze akustická pole členit na dva základní typy, volné zvukové pole a difúzní pole. Volné zvukové pole je charakteristické tím, že v něm nedochází k odrazům, absorpci ani deformacím – zvuk se šíří výhradně přímými vlnami. Difúzní pole se naopak vyskytuje v uzavřených prostorech, kde dochází k mnohonásobným odrazům zvukových vln od stěn. Žádná ze stěn však není zcela pohltivá, což vede k rovnoměrnému rozložení akustického tlaku v prostoru. V každém bodě uzavřeného prostoru je tok energie ve všech směrech stejný, ale fáze jednotlivých vln je náhodná. Tento jev zajišťuje konstantní akustickou intenzitu v celém prostoru. [26]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 NÁVRH EXPERIMENTU

V této kapitole se pojednává o návrhu experimentu, jehož cílem je ověřit, zda lze pomocí zvukových vln o specifické frekvenci efektivně ovlivnit stabilitu plamene, případně jej zcela uhasit. Pro tento účel bude použit zdroj schopný generovat akustické vlny s nízkými frekvencemi. Plamen bude simulován pomocí svíčky, která bude umístěna v prostoru bez výrazných vnějších vlivů, aby bylo zajištěno co nejpřesnější měření. Experiment se zaměřuje na zjištění, jak různé frekvence zvukových vln ovlivňují chování plamene a za jakých podmínek může dojít k jeho úplnému uhašení. Získaná data by měla odpovědět na otázku, zda je hašení plamene pomocí zvuku reálně proveditelné a zda by tento princip mohl být v budoucnu využit jako alternativní metoda hašení požárů. Experiment bude zaznamenáván pomocí měření a vizuální dokumentace, což vytvoří základ pro případný další výzkum v této oblasti.

Nízkofrekvenční zvukové vlny mají na chování plamene největší vliv, protože při jejich šíření dochází ke střídavému zředění a zhuštění vzduchu. To vede ke změnám jeho hustoty, a tím i ke kolísání koncentrace kyslíku, jenž je nezbytný pro udržení procesu hoření. Jakmile je kolísání natolik výrazné, že plamen nemá dostatek kyslíku, zhasne. Toto je podrobněji vysvětleno v kapitole 1. [27]



Obrázek 8 Kolísání hustoty vzduchu a vliv na plamen

(zdroj: upraveno z [27])

4.1 Sledované veličiny a průběh měření

V průběhu experimentu budou sledovány následující fyzikální veličiny:

- frekvence [Hz],
- vzdálenost [cm],
- čas [s].

Kromě těchto hlavních veličin budou sledovány také doplňující veličiny, a to za účelem co nejpresnějšího určení podmínek, za kterých bylo měření prováděno:

- hladina akustického tlaku [dB(A) a dB],
- okolní teplota [°C],
- okolní barometrický tlak [hPa].

Frekvence je generována ve všech základních pokusech ve formě sinusového signálu. Vzdálenost je měřena od membrány reproduktoru k plamenu svíčky. Čas je zaznamenáván od okamžiku zapnutí reproduktoru, tedy od začátku působení zvukových vln na plamen, až po jeho úplné uhasnutí. Náklon reproduktoru směrem ke svíčce je ve všech pokusech konstantní – 13°. Jedná se o maximální dosažitelný náklon, jehož bylo možné dosáhnout s použitým reproduktorem a přídatným zařízením využitým v tomto experimentu.

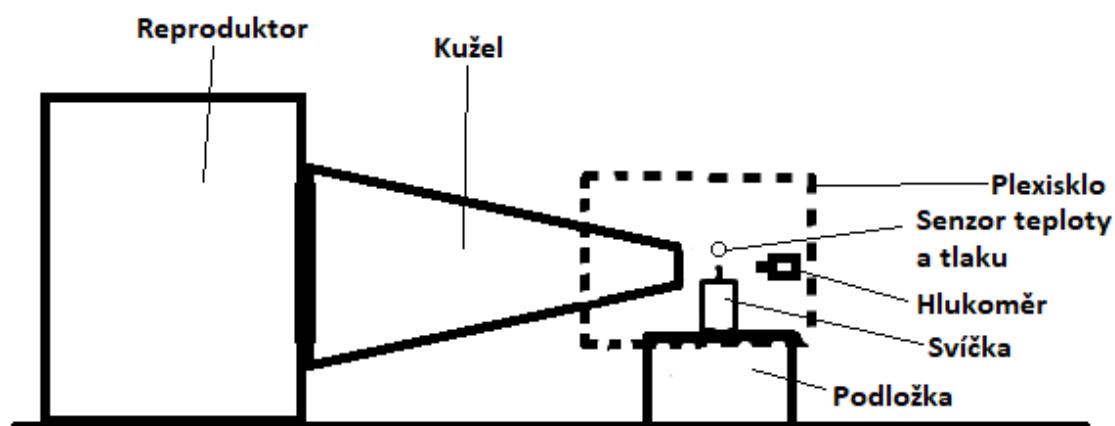
Pro každou frekvenci bude provedeno několik měření. Základní princip je založen na opakování pěti měření při dané frekvenci a určité vzdálenosti. Po úspěšném uhašení plamene je vzdálenost zvýšena o 5 cm. Následně se opět provede pět měření při stejné frekvenci, ale na nové vzdálenosti. Tento postup je opakován, dokud není dosaženo situace, kdy zvukové vlny dané frekvence již nemají dostatečnou energii k uhašení plamene. Měření byla realizována v rozsahu frekvencí 30 až 100 Hz s krokem 5 Hz, což umožnilo získat dostatečně detailní charakteristiku dynamického chování plamene během experimentu a zároveň zachovat experimentální opakovatelnost při ručním provádění testů. Jakmile bude na základě tohoto postupu určena frekvence s nejvýraznějším účinkem na plamen, bude provedeno dodatečné měření pro další čtyři frekvence v jejím okolí, a to dvě nižší a dvě vyšší. Cílem je dosažení přesnějšího určení ideální frekvence. Po nalezení optimální frekvence bude dále testováno, zda má na rychlost a úspěšnost uhašení vliv také tvar křivky zvukové vlny.

4.2 Hypotézy

Předpokládá se, že stabilita plamene svíčky může být ovlivňována zvukovými vlnami s různými frekvencemi odlišně. Frekvence, která má být nejúčinnější pro uhašení plamene, se podle očekávání bude pohybovat v rozmezí 40–50 Hz [27]. Domnívá se, že příliš nízkým nebo naopak velmi vysokým frekvencím nebude přisuzována dostatečná energie k tomu, aby mohly být vyvolány změny v hustotě vzduchu a koncentraci kyslíku natolik, aby mohl být plamen úspěšně uhašen. Dalším důležitým předpokladem je, že úspěšnost uhašení bude ovlivňována vzdáleností zdroje zvuku od plamene. Touto vzdáleností může být ovlivňována nejen rychlost uhašení, ale především jeho samotná úspěšnost. Předpokládá se rovněž, že rychlost uhašení může být ovlivňována také tvarem křivky generovaných zvukových vln.

4.3 Použité zařízení a materiály

Jako zdroj plamene, který bude předmětem hašení, bude sloužit svíčka. Ta představuje bezpečný a znovupoužitelný zdroj ohně. Tato svíčka bude umístěna v prostoru na podložce, kolem níž bude z obou bočních stran a zadní strany umístěné plexisklo. Úkolem plexiskla je chránit svíčku před vnějšími vlivy, například před nežádoucím prouděním vzduchu, které by výsledky mohlo ovlivnit. Na plexiskle budou ve výšce 10 cm připevněny dva senzory BMP280 od značky Bosch, které měří okolní teplotu a atmosférický tlak. Tyto senzory budou napojeny na výpočetní jednotku Arduino Uno R3, která bude zpracovávat údaje ze senzorů a vypisovat je. Zdroj zvuku zajišťuje výkonný reproduktor Hartke HD50, na který je připojen kužel. Jelikož reproduktor šíří zvuk do prostoru do všech směrů, zvukové vlny tak nejsou soustředěny na jedno místo, nejsou koncentrované, a tedy ani účinné k hašení. Kužel tak slouží k usměrnění zvukových vln a soustřeďuje je do jednoho místa, čímž zvyšuje jejich efektivitu k uhašení plamene. Frekvence, kterou bude reproduktor generovat, bude nastavována v prostředí softwaru Audacity. Toto prostředí umožňuje nastavovat a generovat tak tóny o specifické frekvenci, kterou si určíme. Dále bude využit hlukoměr UNI-T UT353, který měří hladinu akustického tlaku podle křivky A. Schéma konstrukce využitě pro hašení zvukovými vlnami je vyobrazeno na Obrázku 9.

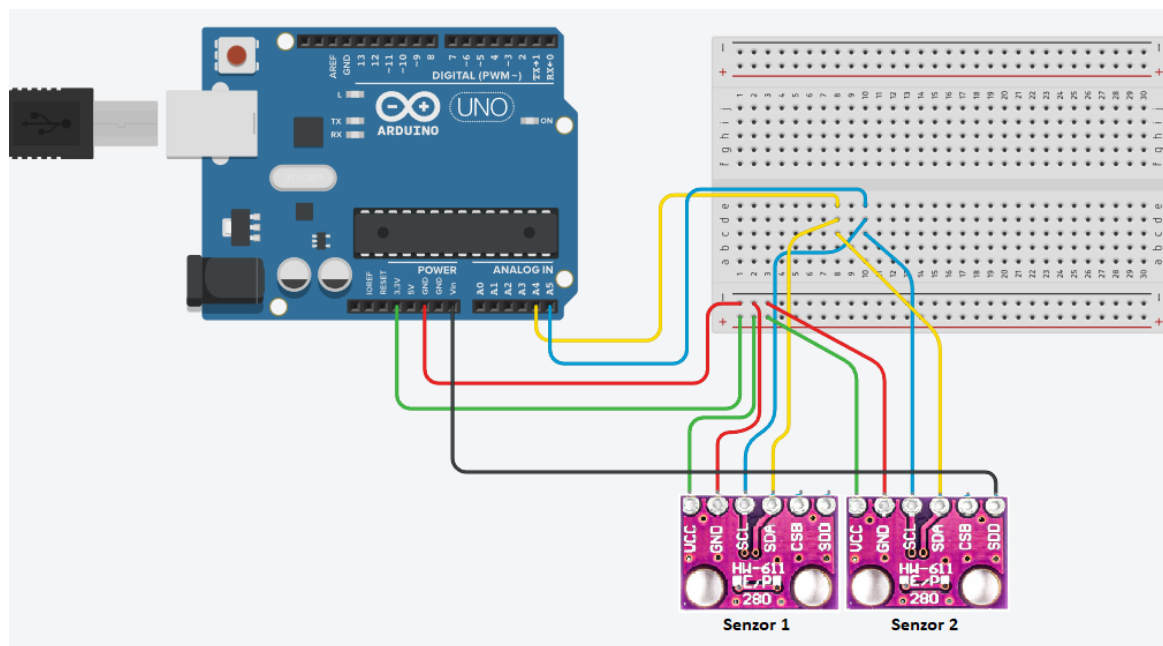


Obrázek 9 Schéma konstrukce pro hašení zvukovými vlnami

(zdroj: vlastní)

4.4 Zapojení senzorů k mikropočítači

Hlavním důvodem pro volbu mikropočítače Arduino Uno R3 byla jeho praktičnost a jednoduché ovládání, které z něj činí ideální volbu pro tento typ projektu. Výhodou je i široká podpora ze strany komunity, množství dostupných knihoven a velmi dobrá kompatibilita s nejrůznějšími senzory. Cílem projektu bylo vytvořit jednoduchý program, jehož úkolem bude pravidelně číst data ze senzorů a zobrazovat je v reálném čase prostřednictvím sériové linky ve vývojovém prostředí Arduino IDE. Jak bylo uvedeno v předchozí podkapitole 4.3, pro měření teploty a tlaku byly použity senzory BMP280, které jsou známé svou přesností a spolehlivostí. Při měření teploty poskytují hodnoty s odchylkou přibližně $\pm 0,5$ °C, což je pro účely tohoto projektu dostačující. Každý z nich má celkem šest vývodů, avšak jejich zapojení se mírně liší. První senzor byl připojen pomocí čtyř vývodů, zatímco druhý využívá vývodů pět. Důvodem tohoto rozdílu je nutnost rozlišit adresy jednotlivých senzorů na I2C sběrnici, aby bylo možné číst data z obou senzorů nezávisle. BMP280 má ve výchozím stavu nastavenou adresu 0x76, takže u prvního senzoru není třeba vývod SDO nijak připojovat. U druhého senzoru však bylo nutné tuto adresu změnit. Toho bylo dosaženo připojením jeho vývodu SDO na pin Vin na desce Arduino, čímž se adresa senzoru nastavila na 0x77. Tím bylo zajištěno, že Arduino dokáže senzory správně rozlišit a komunikovat s nimi odděleně. [28]



Obrázek 10 Schéma zapojení senzorů BMP280 k Adruino Uno R3

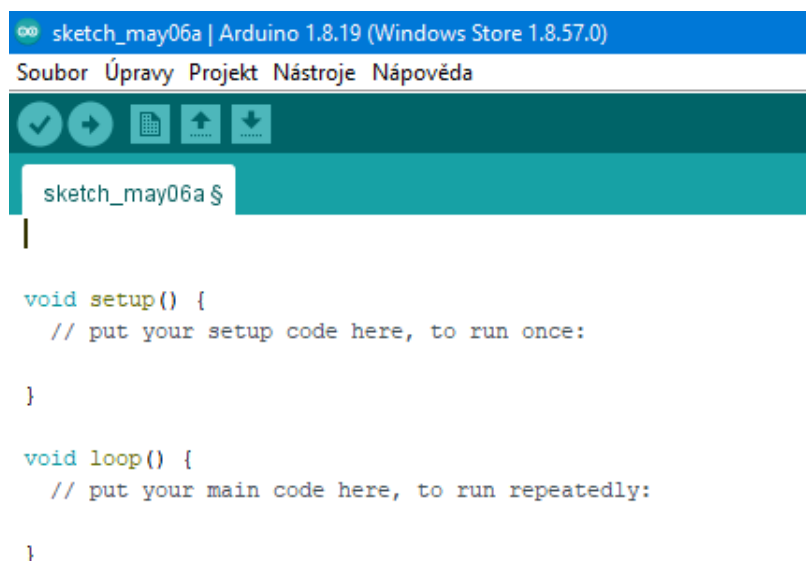
(zdroj: vlastní)

Schéma vyobrazené na Obrázku 10 lze slovním popisem popsat následovně. Sensory jsou připojeny k mikropočítači pomocí vodičů a nepájivého pole neboli breadboardu. Pro propojení a komunikaci mikropočítače s prostředím Arduino IDE je využit propojovací USB kabel s PC. Zelený vodič, který byl určen pro napájení, vede z pinu 3,3 V na desce Arduino Uno do napájecí lišty na nepájivém poli. Odtud je pomocí dalších dvou zelených vodičů napájení přeneseno do obou senzorů přímo na jejich pin VCC. Červený vodič, který znázorňuje zem, vede z GND pinu desky Arduino do zemní lišty nepájivého pole, odkud vedou dva červené vodiče na piny GND obou senzorů. Modrý vodič vede z pinu A5 mikropočítače, a připojuje se do horní řady nepájivého pole. Odtud jsou signály rozvedeny do pinů SCL na obou senzorech. Obdobně je řešeno připojení pinu A4, které je realizováno žlutým vodičem. Vodič z tohoto pinu vede do další řady na nepájivém poli, a následně k pinům SDA senzorů. Pro změnu adresy druhého senzoru je využit černý vodič, který propojuje pin Vin Arduina s vývodem SDO druhého senzoru, čímž je jeho adresa nastavena na požadovanou hodnotu. [28]

4.5 Zdrojový kód programu

K vývoji programu bylo využito vývojové prostředí Arduino IDE, které pracuje s jazykem založeným na programovacím jazyku C++. Toto prostředí je moderní a přehledné,

což výrazně usnadňuje samotné programování i následné ladění kódu. Ukázka prostředí je vyobrazena na Obrázku 11. Celý kód je obsažen v Příloze P I.



Obrázek 11 Prostředí Arduino IDE

(zdroj: vlastní)

Pro zahájení komunikace mikropočítače se senzory je před spuštěním hlavní smyčky programu nutné provést několik důležitých kroků. Prvním krokem je připojení potřebných knihoven `Adafruit_Sensor.h` a `Adafruit_BMP280.h`, které jsou nezbytné pro správnou komunikaci mezi zařízeními. Následuje nastavení adres senzorů, o čemž již byla řeč v podkapitole 4.4. Poté proběhne inicializace senzorů a definice konstanty určující korekci tlaku. Tato korekce má hodnotu 32. Její aplikace je nutná, protože senzory měří atmosférický tlak vztažený k hladině moře. Jelikož se měření provádí v nadmořské výšce několika stovek metrů, je třeba hodnotu upravit, aby výsledky odpovídaly reálným podmínkám. Korekce byla stanovena na základě porovnání údajů ze senzorů s daty z meteorologické stanice. Následně je v programu vykonána funkce `setup`. Nejprve je inicializována sériová komunikace rychlostí 9600 baudů. Poté mikropočítač inicializuje jednotlivé senzory. Pokud dojde k chybě, například v důsledku špatného zapojení nebo vadného senzoru, je na sériový monitor vypsána chybová hláška a program se zastaví. Tímto opatřením se předejde zpracovávání a zobrazování chybných dat. V hlavní smyčce `loop` probíhá čtení hodnot z obou senzorů a jejich následné odeslání na sériový port. Při tom se zároveň aplikuje korekce a hodnota tlaku se dělí 100, aby se výsledky převedly z jednotek Pa na hPa, což je běžně používaná jednotka atmosférického tlaku. Hodnoty se vždy vypisují nejprve pro první senzor, následně pro druhý, a nakonec se zobrazí jejich průměrná hodnota. Výstup

je rozdělen do tří částí kvůli lepší přehlednosti a snadnější čitelnosti dat. Toto rozdělení zároveň slouží jako kontrolní mechanismus, který usnadňuje odhalení případného selhání senzoru. V takovém případě je možné vadný senzor snadno identifikovat a vyměnit. Ukázka výstupu na sériovém monitoru je zobrazena na Obrázku 12. Na závěr každého cyklu se vypíše na sériový monitor prázdný řádek, aby byly jednotlivé bloky dobře odděleny, a program pozastaví na jednu sekundu pomocí příkazu `delay(1000)`. [28]

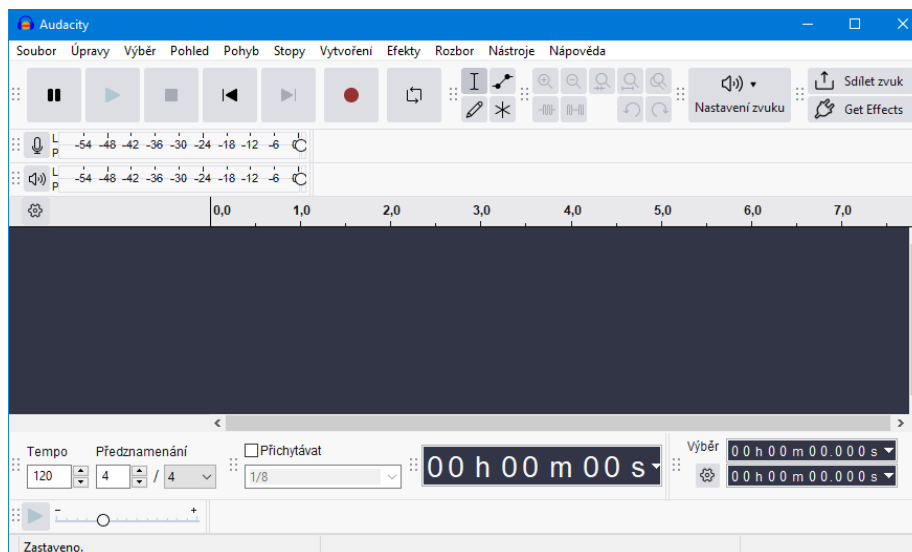
```
=== Senzor 1 ===  
Teplota: 26.42 °C  
Tlak: 1017.47 hPa  
=== Senzor 2 ===  
Teplota: 26.32 °C  
Tlak: 1017.97 hPa  
=== Průměrné hodnoty ===  
Průměrná teplota: 26.37 °C  
Průměrný tlak: 1017.72 hPa
```

Obrázek 12 Výpis hodnot na
sériový monitor

(zdroj: vlastní)

4.6 Generace frekvence programem Audacity

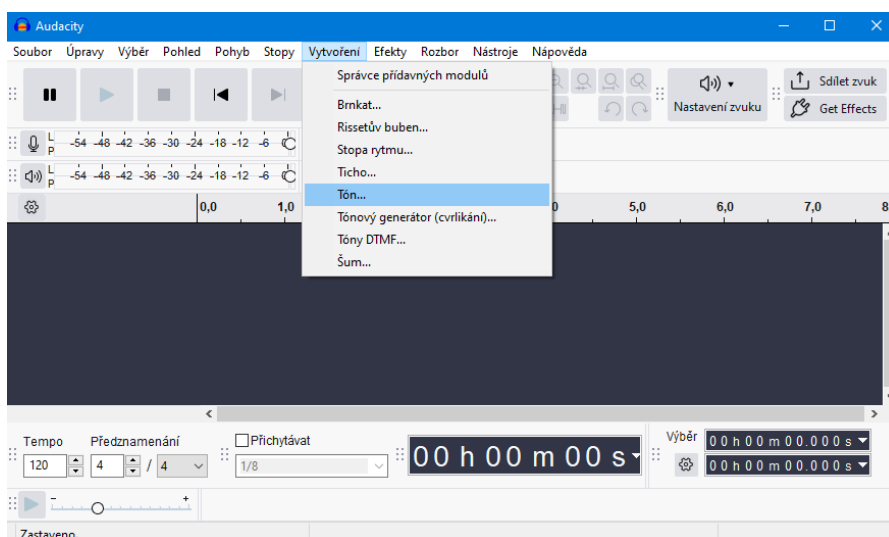
Jak bylo již uvedeno v podkapitole 4.3, pro generaci zvukových vln o určitých frekvencích bude sloužit bezplatný open-source program Audacity. Jde o jednoduchý, avšak plně dostačující nástroj pro účely tohoto experimentu. Výstup zvuku je kvalitní, bez známek zkreslení i při vysoké hlasitosti. Prvním krokem byla instalace programu. Po jejím dokončení a spuštění se zobrazí uživatelské rozhraní programu, které je zobrazené na Obrázku 13.



Obrázek 13 Prostředí programu Audacity

(zdroj: vlastní)

Aby mohl být pomocí softwaru Audacity generován tón o požadované frekvenci, je nejprve nutné tuto frekvenci nastavit. Postup je následující. V horní liště s kartami je vybrána záložka „Vytvoření“ a z rozbalovacího menu je zvolena možnost „Tón“. Celý postup je znázorněn na Obrázku 14.

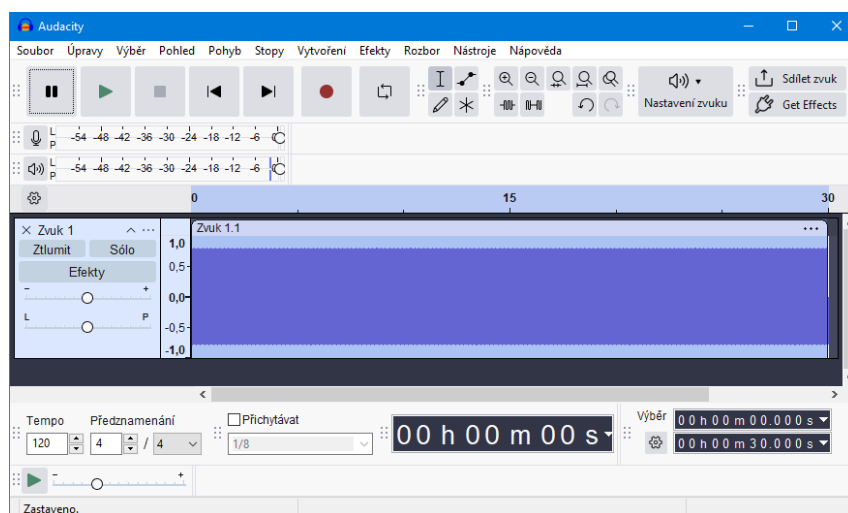


Obrázek 14 Vytvoření generace tónu

(zdroj: vlastní)

Následně je zobrazeno dialogové okno, ve kterém mohou být nastaveny jednotlivé parametry generovaného tónu. V první řadě může být zvolen tvar křivky, který lze nastavit na sinusový průběh, čtvercovou vlnu, pilový zub, čtverec bez vyhlazování nebo trojúhelníkový průběh. Dále je možné nastavit frekvenci, která může být libovolná. Hodnotu

frekvence lze zadat ručně do políčka. Kromě frekvence a tvaru křivky lze upravit také úroveň amplitudy, která určuje intenzitu generovaného tónu. Amplituda se zadává jako desetinné číslo v rozsahu od 0 do 1. Posledním nastavením je doba trvání tónu, tedy jak dlouho bude signál generován. Po potvrzení nastavení kliknutím na tlačítko „Vytvoření“ se v Audacity vytvoří a zobrazí akustická stopa. Ta může být přehrána stisknutím tlačítka „Přehrát“. Prostředí programu Audacity s vytvořenou stopou připravenou k přehrávání je znázorněno na Obrázku 15.



Obrázek 15 Stopa připravená k přehrávání

(zdroj: vlastní)

Počítač, na kterém program poběží, bude připojen propojovacím kabelem k reproduktoru Hartke HD50. Jedná se o kompaktní, 10" baskytarové kombo, které se vyznačuje vysoce kvalitním a výrazným zvukem. Disponuje funkcemi, jež umožňují přizpůsobení zvuku podle individuálních potřeb. Ovšem, na základě deklarovaných technických parametrů tento reproduktor nesplňuje ideální požadavky pro potřeby tohoto experimentu. Reprodukter je totiž navržen spíše pro vysokou kvalitu hudebního basového projevu, kde se frekvence pohybují nad 100 Hz, nikoliv pro generaci nízkých frekvencí potřebných pro tento experiment. Avšak, jedná se o nejlepší možnou volbu, která byla dostupná. Použití tohoto typu reproduktoru tak prozkoumá další odvětví a možnosti využití různých reproduktorů jako generátorů frekvence k hašení požárů zvukovými vlnami. [29]

4.7 Měření akustického tlaku

Jelikož již dříve zmíněný hlukoměr UNI-T UT353, zmíněný v podkapitole 4.3, sice měří hladinu akustického tlaku, zobrazuje ji však ve formátu dB(A) [30]. Naměřené hodnoty totiž

převádí podle váhové křivky A, která odpovídá fyziologickému vnímání zvuku lidským uchem [31]. Hodnota zobrazovaná hlukoměrem lépe odpovídá tomu, jak je hlasitost vnímána. Pro získání skutečného, neváženého akustického tlaku v dB musí být tato hodnota dopočítána. Pomocí tabulky [32] určené pro výpočet A-váhových hladin lze určit odpovídající neváženou hladinu akustického tlaku. Tabulka obsahuje korekční faktory přiřazené jednotlivým frekvencím. Na základě zvolené frekvence se vybere příslušný A-váhový korekční faktor, který se dosadí do rovnice pro výpočet nevážené hladiny akustického tlaku v dB.

$$dB = dB(A) - A \text{ váhový faktor} \quad (1)$$

Tímto způsobem bude přepočítávána a zaznamenávána každá naměřená hodnota hlukoměrem UNI-T UT353.

5 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Všechna měření probíhala za průměrné okolní teploty 23,6 °C a průměrného okolního tlaku 1018,6 hPa. Při zahájení měření byla jako první zvolena frekvence 30 Hz. Jakmile začal reproduktor generovat zvuk o této frekvenci, bylo možné pozorovat patrný vliv na stabilitu plamene. Došlo k jeho rozkmitání, což naznačuje, reakci plamene na zvukové vlny. Avšak i přesto nebylo rozkmitání plamene, a tedy působení frekvence, natolik výrazné, aby plamen úplně uhasl. Podobná situace byla zaznamenána i při následném testování o něco vyšších frekvencí, konkrétně 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz a 60 Hz. V každém z těchto případů bylo opět pozorovatelné narušení stability plamene, které se projevovalo jeho kolísáním či kmitáním. Ani jedna z těchto frekvencí však nedosáhla dostatečné intenzity, která by vedla k uhašení plamene. Výsledky tedy ukazují, že ačkoliv tyto frekvence působí na plamen viditelně, nejsou samy o sobě dostačující k jeho úplnému uhašení. Je zde však určitá pravděpodobnost, že v úspěšnosti uhašení plamene při těchto frekvencích mohly hrát roli právě již zmiňované specifikace reproduktoru, o kterých bylo psáno v podkapitole 4.6. Patřičnou roli v úspěšnosti uhašení hraje i náklon reproduktoru, který byl uveden a vysvětlen v podkapitole 4.1. Je velice pravděpodobné, že pro tyto frekvence by bylo vhodnější tento úhel náklonu zvětšit. Zvukové vlny by tak lépe vytěsňovaly kyslík od okolí plamene, a pravděpodobně by se podařilo plamen zhasit i těmito frekvencemi.

Prvních pozitivních výsledků v úspěšném uhašení plamene bylo dosaženo až při frekvenci 65 Hz, kdy úroveň akustického tlaku dosahovala 118,9 dB. Pro tuto frekvenci se úspěšné uhašení plamene zaznamenalo pouze ve dvou vzdálenostech, ve kterých tak bylo provedeno měření. Tabulka 1 znázorňuje jednotlivé časy uhašení plamene při vzdálenosti 60 cm, kdy průměrný čas uhašení byl 8,48 sekund. Průběh hašení zobrazuje Obrázek 16.

Tabulka 1 Hašení při frekvenci 65 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	65	60	93,2	118,9	23,6	1018,6	8,62
2	65	60	93,3	118,9	23,7	1018,6	8,80
3	65	60	93,2	118,9	23,6	1018,7	8,25
4	65	60	93,2	118,9	23,6	1018,6	8,03
5	65	60	93,2	118,9	23,6	1018,6	8,71

(zdroj: vlastní)



Obrázek 16 Průběh hašení svíčky při frekvenci 65 Hz a vzdálenosti 60 cm

(zdroj: vlastní)

Hodnoty, které byly naměřeny pro vzdálenost 65 cm jsou zobrazeny v Tabulce 2. Na první pohled je patrné, že i malé zvýšení vzdálenosti o 5 cm výrazně ovlivnilo dobu potřebnou k uhašení plamene. Ve srovnání s kratší vzdáleností vzrostl čas přibližně šestinásobně, a průměrný čas uhašení činil 46,39 sekund. Toto je znázorněno taktéž na Obrázku 17.

Tabulka 2 Hašení při frekvenci 65 Hz ve vzdálenosti 65 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	65	65	93,2	118,9	23,6	1018,6	45,85
2	65	65	93,2	118,9	23,6	1018,6	38,85
3	65	65	93,2	118,9	23,6	1018,6	55,60
4	65	65	93,2	118,9	23,6	1018,6	48,28
5	65	65	93,2	118,9	23,6	1018,7	43,39

(zdroj: vlastní)



Obrázek 17 Průběh hašení svíčky při frekvenci 65 Hz a vzdálenosti 65 cm

(zdroj: vlastní)

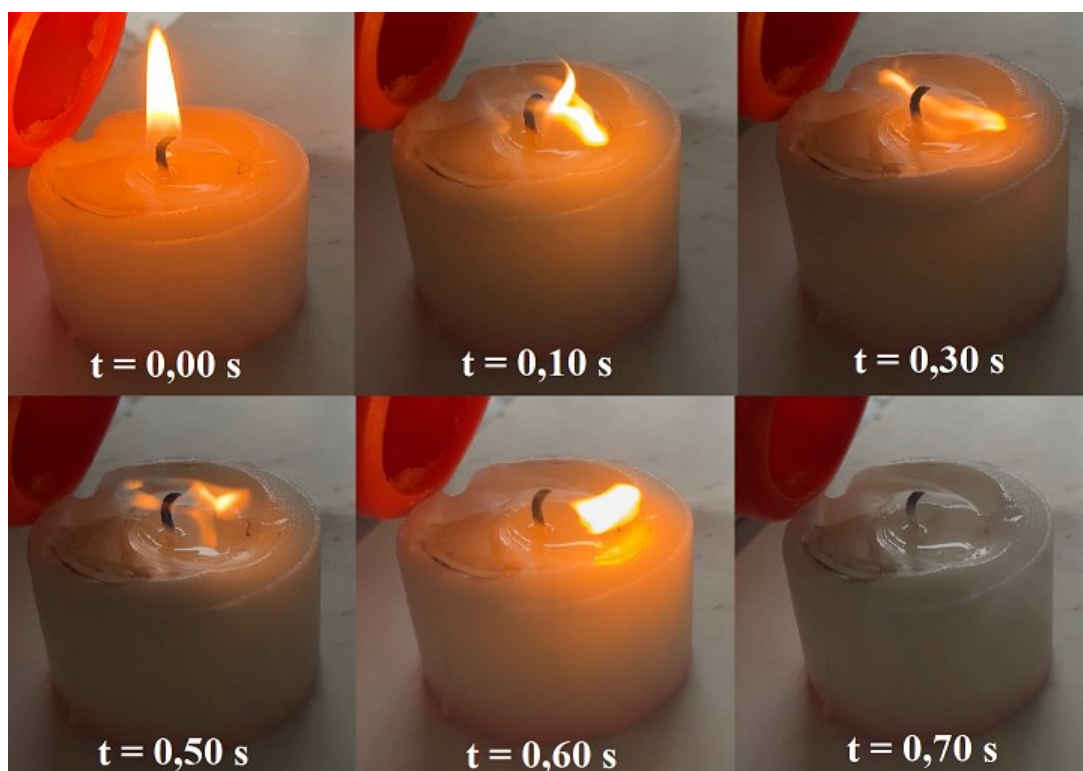
Další série měření byla provedena při frekvenci 70 Hz, kde byl dosažen akustický tlak 118,3 dB. V tomto případě měření proběhly taktéž ve dvou vzdálenostech. Tabulka 3 spolu

s Obrázkem 18 dokumentuje výsledky pro vzdálenost 60 cm, přičemž průměrná doba potřebná k uhašení plamene činila 0,81 sekund. Jedná se o výrazný posun v rychlosti uhašení oproti předcházející frekvenci. Rychlost uhašení vzrostla téměř desetinásobně.

Tabulka 3 Hašení při frekvenci 70 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	70	60	93,8	118,3	23,7	1018,6	1,17
2	70	60	93,8	118,3	23,6	1018,7	0,89
3	70	60	93,8	118,3	23,6	1018,6	0,66
4	70	60	93,8	118,3	23,6	1018,6	0,70
5	70	60	93,8	118,3	23,6	1018,6	0,64

(zdroj: vlastní)



Obrázek 18 Průběh hašení svíčky při frekvenci 70 Hz a vzdálenosti 60 cm

(zdroj: vlastní)

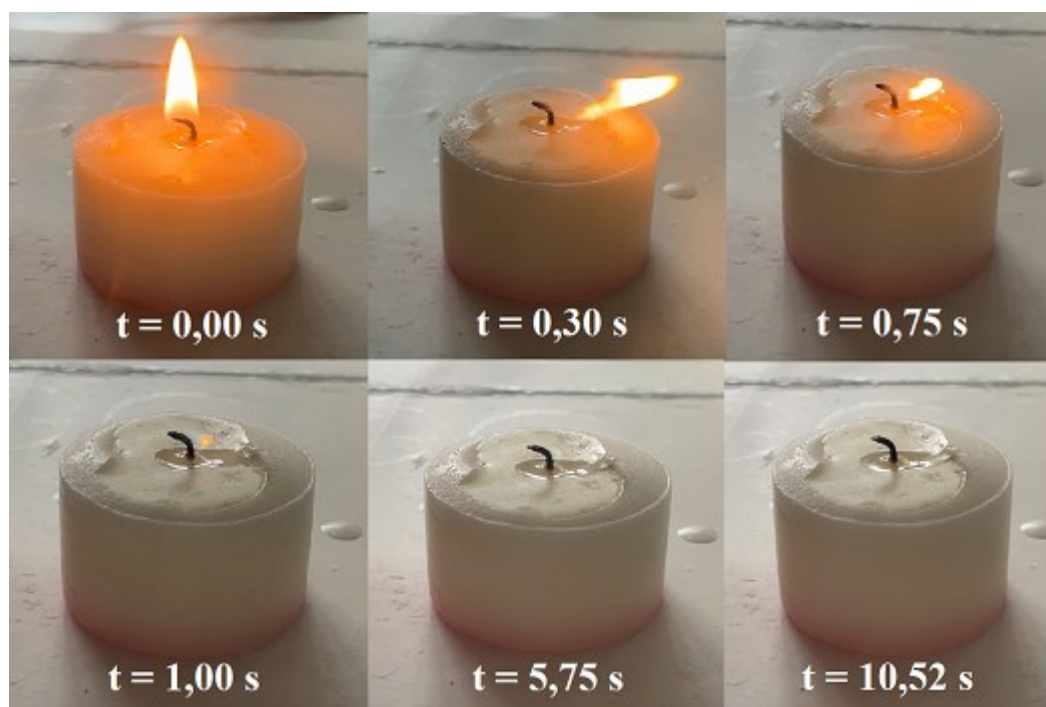
Další měření proběhlo pro vzdálenost 65 cm při stejné frekvenci. Tabulka 4 ukazuje, že prodloužení vzdálenosti se opět výrazně projevilo na čase potřebném k uhašení. Průměrná doba vzrostla na 9,92 sekund, což potvrzuje souvislost mezi vzdáleností a účinností hašení, jak rovněž potvrzuje grafické znázornění v Obrázku 19. Lze si rovněž povšimnout poměrně

výrazných rozdílů v časech uhašení. Tyto odchylky mohou být způsobeny řadou faktorů, které jsou popsány v následující podkapitole 5.1.

Tabulka 4 Hašení při frekvenci 70 Hz ve vzdálenosti 65 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	70	65	93,8	118,3	23,6	1018,6	10,52
2	70	65	93,8	118,3	23,6	1018,6	9,56
3	70	65	93,8	118,3	23,6	1018,6	13,01
4	70	65	93,8	118,3	23,6	1018,6	7,85
5	70	65	93,8	118,3	23,6	1018,7	8,68

(zdroj: vlastní)



Obrázek 19 Průběh hašení svíčky při frekvenci 70 Hz a vzdálenosti 65 cm

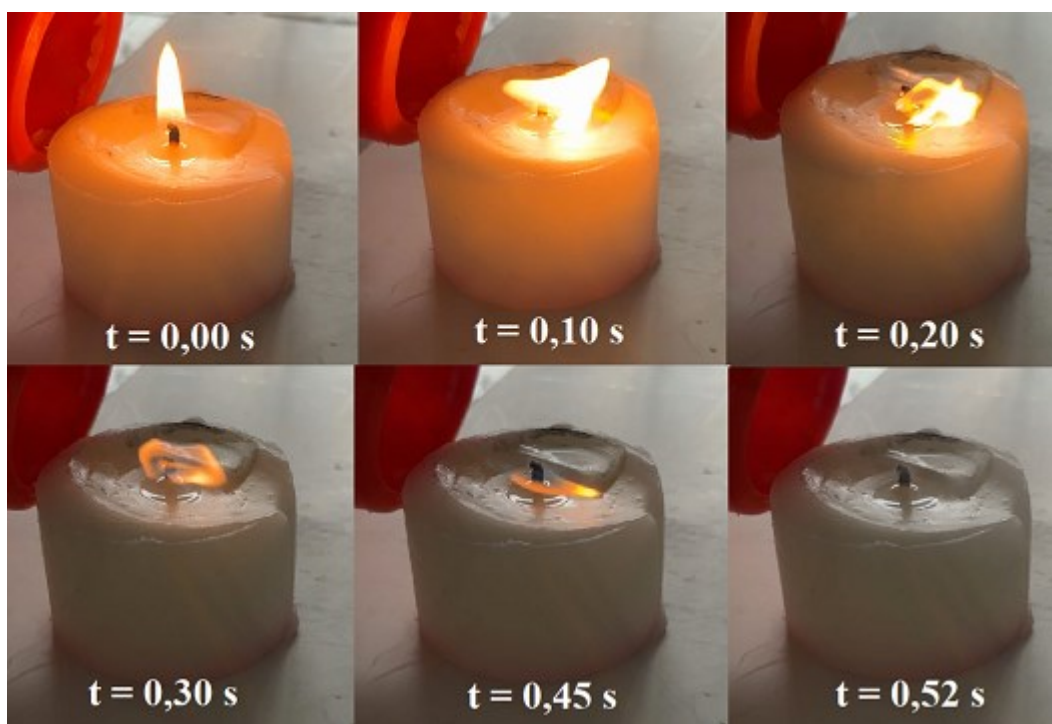
(zdroj: vlastní)

Další sada měření byla zkoumána při frekvenci 75 Hz. Úroveň akustického tlaku zde byla naměřena 118 dB a měření se podařilo uskutečnit opět pouze při dvou vzdálenostech. Tabulka 5 zachycuje naměřené časy hašení plamene při vzdálenosti 60 cm. Průměrná doba potřebná k uhašení dosáhla hodnoty 0,53 sekund, přičemž výsledky jednotlivých pokusů vykazují relativně konzistentní průběh. Chování plamene během hašení vizualizuje Obrázek 20.

Tabulka 5 Hašení při frekvenci 75 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	75	60	94,6	118	23,7	1018,6	0,66
2	75	60	94,6	118	23,7	1018,6	0,46
3	75	60	94,6	118	23,6	1018,7	0,41
4	75	60	94,6	118	23,6	1018,6	0,60
5	75	60	94,6	118	23,6	1018,6	0,52

(zdroj: vlastní)



Obrázek 20 Průběh hašení svíčky při frekvenci 75 Hz a vzdálenosti 60 cm

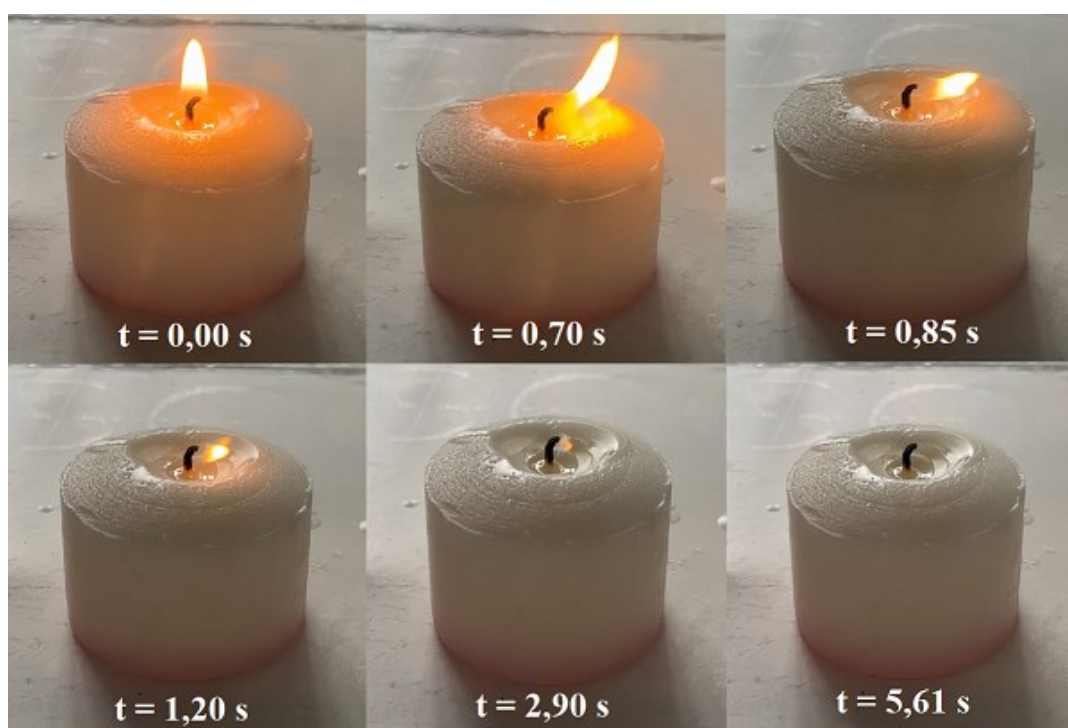
(zdroj: vlastní)

Při vzdálenosti 65 cm, zaznamenané v Tabulce 6, se i v tomto případě projevila větší vzdálenosti na dobu uhašení. Čas nutný pro zhasnutí plamene se snížil na průměrnou hodnotu 6,10 sekund. Průběh měření je zachycen na Obrázku 21. Jedná o mnohem lepší posun oproti předchozí frekvenci, avšak stále to není úplně dokonalá hodnota, která by byla vhodná pro použití v praxi. Odchyly mezi jednotlivými měřeními mohou být opět zapříčiněny faktory, které jsou popsány v podkapitole 5.1.

Tabulka 6 Hašení při frekvenci 75 Hz ve vzdálenosti 65 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	75	65	94,6	118	23,6	1018,6	6,67
2	75	65	94,6	118	23,6	1018,7	5,94
3	75	65	94,6	118	23,7	1018,6	5,86
4	75	65	94,6	118	23,6	1018,6	6,43
5	75	65	94,6	118	23,6	1018,7	5,61

(zdroj: vlastní)



Obrázek 21 Průběh hašení svíčky při frekvenci 75 Hz a vzdálenosti 65 cm

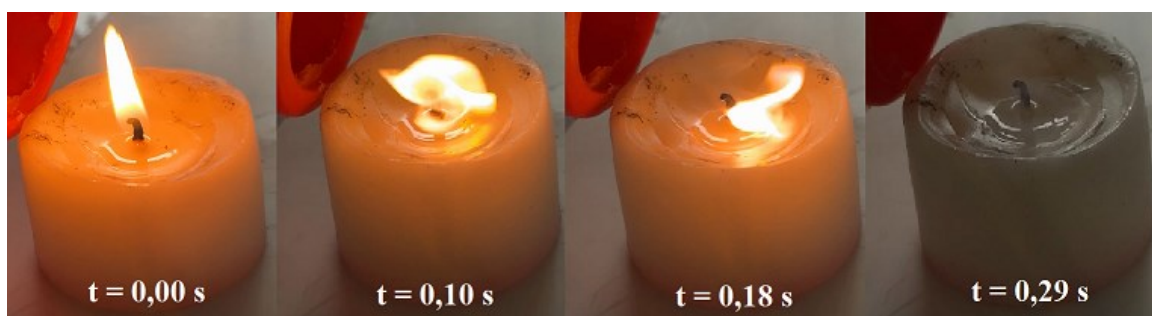
(zdroj: vlastní)

Testování bylo dále rozšířeno o frekvenci 80 Hz, při které byl naměřen akustický tlak na úrovni 117,6 dB. Stejně jako u předchozích frekvencí byla měření realizována ve dvou vzdálenostech. Tabulka 7 uvádí naměřené časy hašení plamene při kratší vzdálenosti, a tedy 60 cm. Naměřené hodnoty vykazují poměrnou konzistenci, přičemž průměrný čas uhašení činil 0,34 sekund. Výsledek měření je graficky znázorněn na Obrázku 22.

Tabulka 7 Hašení při frekvenci 80 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	80	60	95,2	117,6	23,7	1018,6	0,36
2	80	60	95,2	117,6	23,6	1018,6	0,22
3	80	60	95,2	117,6	23,6	1018,7	0,43
4	80	60	95,2	117,6	23,6	1018,6	0,29
5	80	60	95,2	117,6	23,6	1018,6	0,38

(zdroj: vlastní)



Obrázek 22 Průběh hašení svíčky při frekvenci 80 Hz a vzdálenosti 60 cm

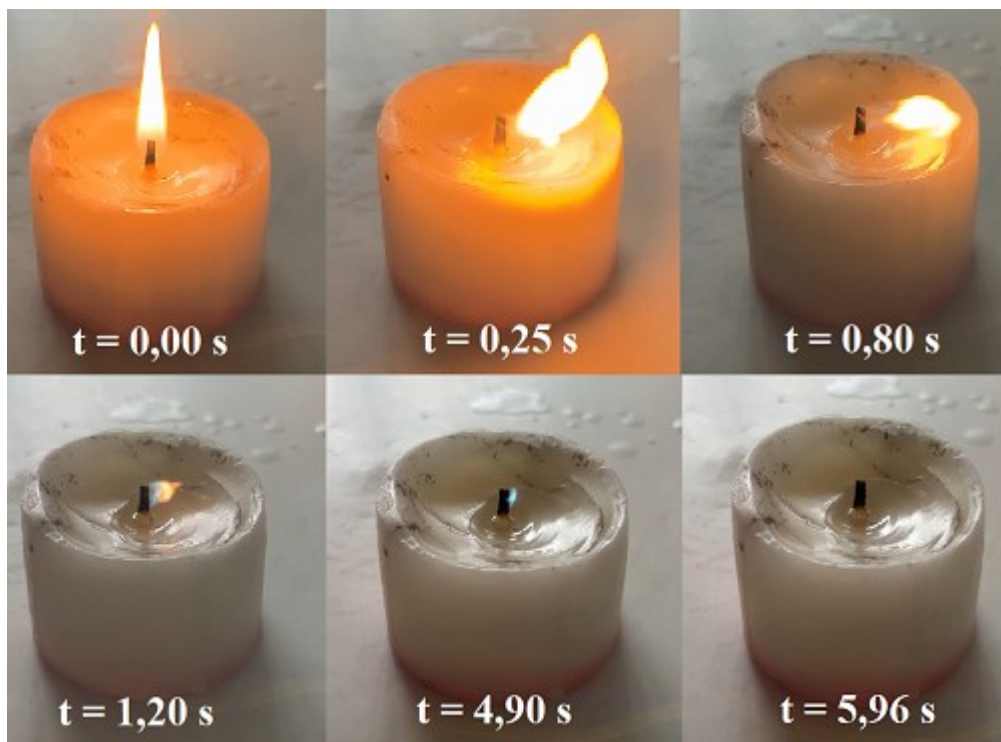
(zdroj: vlastní)

Naopak při vzdálenosti 65 cm došlo, podobně jako u předchozích frekvencí, ke znatelnému prodloužení doby uhašení. Výsledky uvedené v Tabulce 8 dokonce ukazují, že rychlost uhašení na vzdálenost 65 cm je u frekvencí 75 Hz a 80 Hz téměř totožná. Průměrná rychlost uhašení je 5,81 sekund a rychlost uhašení u vyšší frekvence je pouze o 0,21 sekund rychlejší než u frekvence předchozí. Tento fakt rovněž ukazuje Obrázek 23.

Tabulka 8 Hašení při frekvenci 80 Hz ve vzdálenosti 65 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	80	65	95,2	117,6	23,6	1018,6	6,73
2	80	65	95,2	117,6	23,6	1018,6	5,96
3	80	65	95,2	117,6	23,7	1018,6	5,36
4	80	65	95,2	117,6	23,7	1018,6	5,29
5	80	65	95,2	117,6	23,6	1018,6	6,13

(zdroj: vlastní)



Obrázek 23 Průběh hašení svíčky při frekvenci 80 Hz a vzdálenosti 65 cm

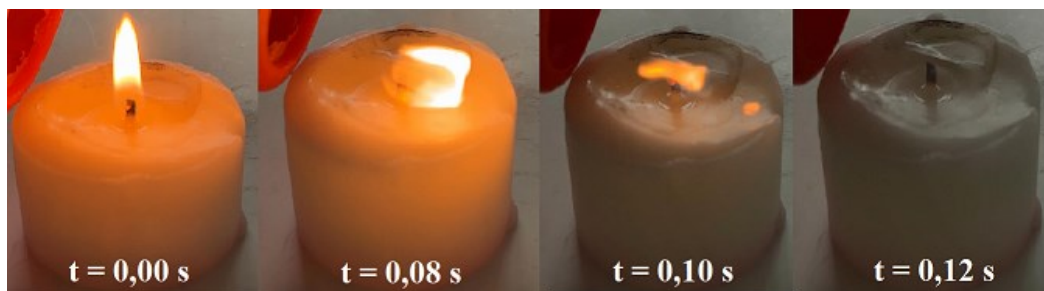
(zdroj: vlastní)

Výsledky měření při frekvenci 85 Hz již jednoznačně ukazují výrazné zlepšení účinnosti hašení. Při akustickém tlaku 117,1 dB, ve srovnání s předchozími frekvencemi, se doby uhašení výrazně zkrátily, a to ve všech testovaných vzdálenostech. Tabulka 9 nabízí naměřené výsledky pro vzdálenost 60 cm, kdy byly zaznamenány konzistentní výsledky napříč všemi pokusy ve velice rychlém čase. Průměrně to bylo 0,12 sekund, a naměřené hodnoty byly konstantní. Konkrétní výsledek je zachycen na Obrázku 24. Jedná se o doposud nejrychlejší úspěšné uhašení plamene. Tento výsledek lze vnímat jako první skutečně výrazné zlepšení v dosavadním průběhu měření.

Tabulka 9 Hašení při frekvenci 85 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	85	60	95,6	117,1	23,6	1018,7	0,12
2	85	60	95,6	117,1	23,6	1018,6	0,13
3	85	60	95,6	117,1	23,6	1018,6	0,12
4	85	60	95,6	117,1	23,6	1018,6	0,12
5	85	60	95,6	117,1	23,6	1018,6	0,13

(zdroj: vlastní)



Obrázek 24 Průběh hašení svíčky při frekvenci 85 Hz a vzdálenosti 60 cm

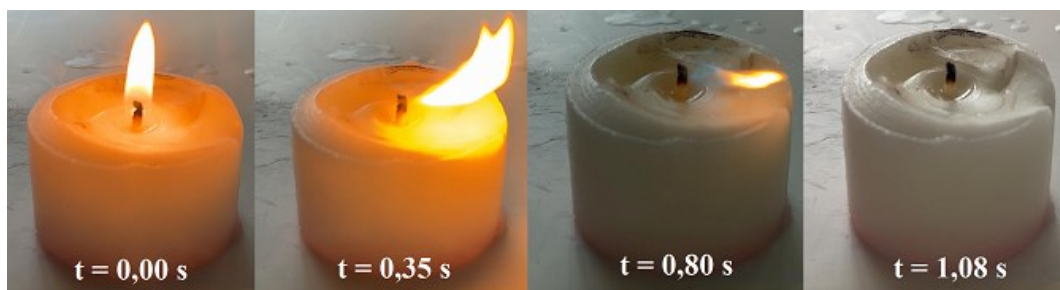
(zdroj: vlastní)

Se zvyšující se vzdáleností byl sice zaznamenán postupný nárůst doby uhašení, avšak hodnoty zůstávají i nadále velmi nízké. Hodnoty uvedené v Tabulce 10 ukazují, že při vzdálenosti 65 cm byl plamen zhasnut v průměru během 1,77 sekundy. Tato hodnota je oproti předcházejícím frekvencím při totéž vzdálenosti opravdu výrazným zlepšením, jak ukazuje také Obrázek 25.

Tabulka 10 Hašení při frekvenci 85 Hz ve vzdálenosti 65 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	85	65	95,6	117,1	23,6	1018,6	1,98
2	85	65	95,6	117,1	23,7	1018,6	1,68
3	85	65	95,6	117,1	23,6	1018,6	2,37
4	85	65	95,6	117,1	23,6	1018,6	1,08
5	85	65	95,6	117,1	23,7	1018,7	1,72

(zdroj: vlastní)



Obrázek 25 Průběh hašení svíčky při frekvenci 85 Hz a vzdálenosti 65 cm

(zdroj: vlastní)

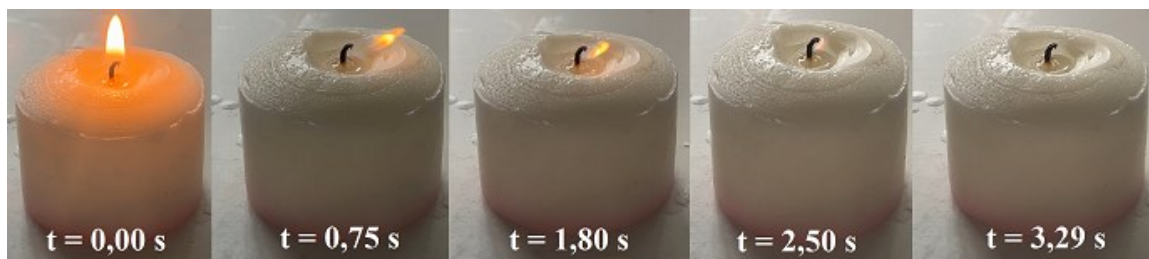
Při této frekvenci se podařilo plamen uhasit i při větších vzdálenostech, oproti předcházejícím frekvencím. Tabulka 11 nabízí výsledky měření při vzdálenosti 70 cm,

kdy plamen podařilo uhasit v průměru za 3,3 sekundy. Tabulka 12 ukazuje hodnoty při nejdelší vzdálenosti 75 cm, kdy se úspěšně podařilo plamen uhasit průměrně za 7,68 sekundy. Grafické zpracování těchto dat je uvedeno na Obrázku 26 a Obrázku 27. Lze si ale povšimnout větších rozdílů v časech jednotlivých měření. Tak jako v předchozích případech, mohly zde sehrát roli faktory popsané v podkapitole 5.1. Tyto výsledky potvrzují, že frekvence 85 Hz představuje výrazně efektivnější oblast působení než hodnoty testované před ní, a její účinnost zůstává relativně vysoká i při větší vzdálenosti od zdroje zvuku.

Tabulka 11 Hašení při frekvenci 85 Hz ve vzdálenosti 70 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	85	70	95,6	117,1	23,7	1018,6	4,18
2	85	70	95,6	117,1	23,6	1018,6	2,44
3	85	70	95,6	117,1	23,6	1018,6	2,68
4	85	70	95,6	117,1	23,6	1018,6	3,91
5	85	70	95,6	117,1	23,7	1018,6	3,29

(zdroj: vlastní)



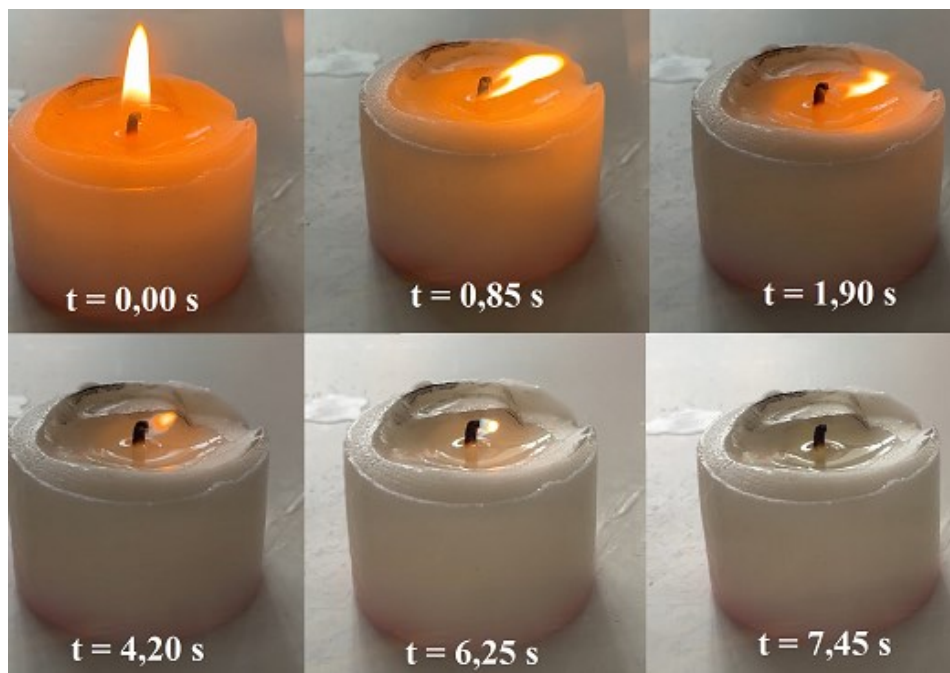
Obrázek 26 Průběh hašení svíčky při frekvenci 85 Hz a vzdálenosti 70 cm

(zdroj: vlastní)

Tabulka 12 Hašení při frekvenci 85 Hz ve vzdálenosti 75 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	85	75	95,6	117,1	23,6	1018,6	7,39
2	85	75	95,6	117,1	23,6	1018,6	6,95
3	85	75	95,6	117,1	23,6	1018,6	9,52
4	85	75	95,6	117,1	23,7	1018,6	7,45
5	85	75	95,6	117,1	23,6	1018,7	7,07

(zdroj: vlastní)



Obrázek 27 Průběh hašení svíčky při frekvenci 85 Hz a vzdálenosti 75 cm

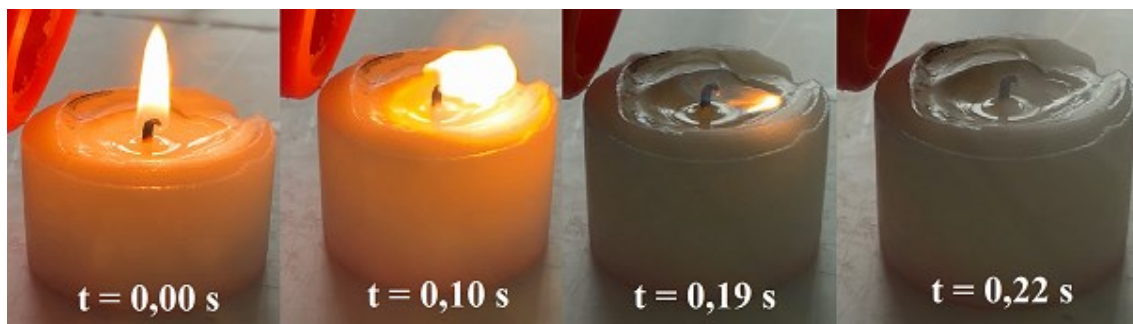
(zdroj: vlastní)

Měření pokračovalo otestováním frekvence 90 Hz, při které bylo dosaženo akustického tlaku 116,8 dB. Tón generovaný o této frekvenci měl dostatečnou energii na zhašení plamene ve třech rozdílných vzdálenostech. Tabulka 13 prezentuje data získaná při vzdálenosti 60 cm, a jak lze z tabulky vyčíst, oproti předchozí frekvenci dochází k mírnému nárůstu v čase, za jak dlouho plamen po působení zvukových vln uhasl. Průměrná doba hašení je 0,26 sekund. Tato frekvence je v hašení ale stále o něco rychlejší, v porovnání s frekvencí 80 Hz. Zaznamenané výsledky jsou doplněny i vizuálně na Obrázku 28.

Tabulka 13 Hašení při frekvenci 90 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	90	60	96,2	116,8	23,6	1018,6	0,33
2	90	60	96,2	116,8	23,6	1018,6	0,32
3	90	60	96,2	116,8	23,6	1018,7	0,22
4	90	60	96,2	116,8	23,6	1018,6	0,18
5	90	60	96,2	116,8	23,6	1018,7	0,24

(zdroj: vlastní)



Obrázek 28 Průběh hašení svíčky při frekvenci 90 Hz a vzdálenosti 60 cm

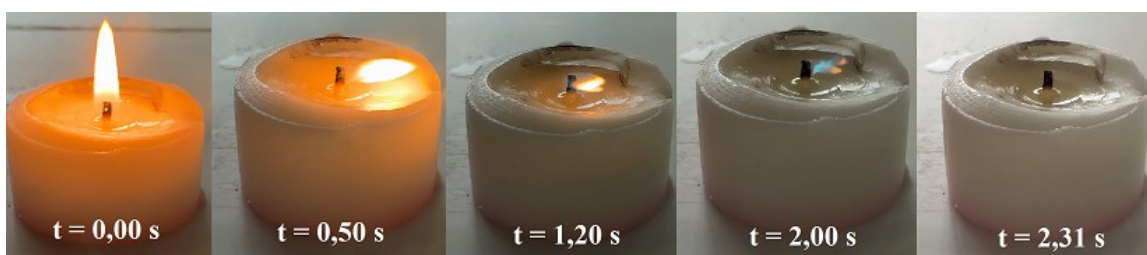
(zdroj: vlastní)

Zvýšení vzdálenosti na 65 cm, zaznamenané také v Tabulce 14, vedlo k očekávanému prodloužení času potřebného k uhašení, v průměru šlo o 2,25 sekund. V tomto případě se čas uhašení oproti menší vzdálenosti prodloužil osminásobně. Průběh měření zobrazuje Obrázek 29.

Tabulka 14 Hašení při frekvenci 90 Hz ve vzdálenosti 65 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	90	65	96,2	116,8	23,6	1018,6	1,45
2	90	65	96,2	116,8	23,7	1018,6	2,58
3	90	65	96,2	116,8	23,6	1018,6	2,65
4	90	65	96,2	116,8	23,6	1018,6	2,31
5	90	65	96,2	116,8	23,7	1018,6	2,25

(zdroj: vlastní)



Obrázek 29 Průběh hašení svíčky při frekvenci 90 Hz a vzdálenosti 65 cm

(zdroj: vlastní)

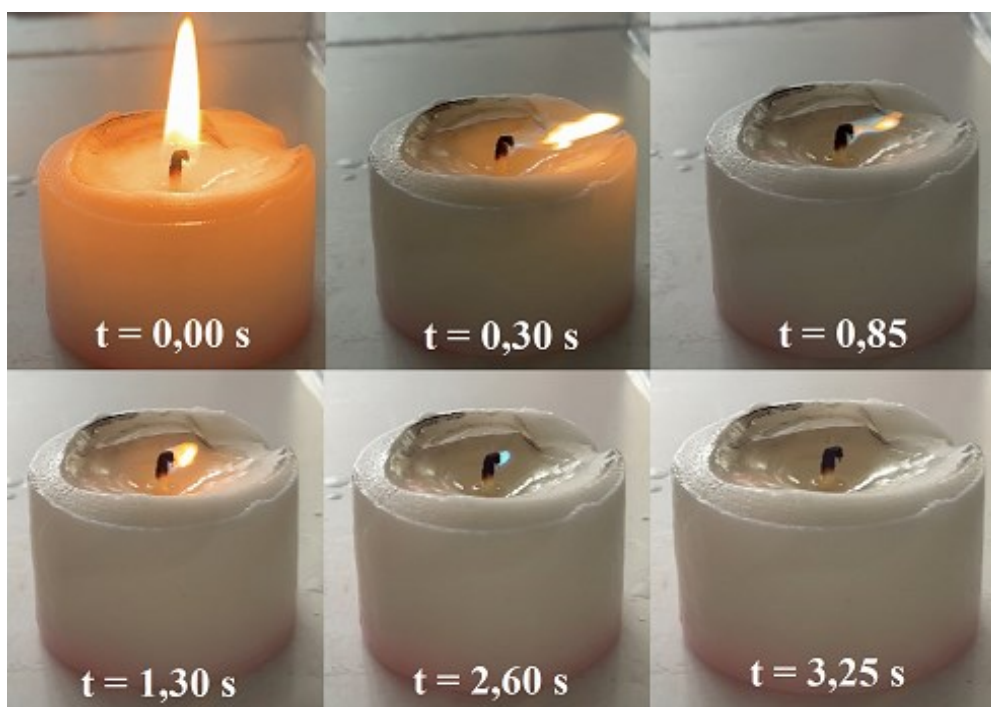
Výsledky při vzdálenosti 70 cm, uvedené v Tabulce 15, potvrzují mírné zpomalení oproti předchozím vzdálenosti. Toto zpomalení je možné sledovat na Obrázku 30. Při této

vzdálenosti je uhašení jen o 1,26 sekundy pomalejší, a čas se zvedl pouze na 1,5násobek. Rovněž je tento čas porovnatelný s hodnotou při frekvenci 85 Hz stejné vzdálenosti.

Tabulka 15 Hašení při frekvenci 90 Hz ve vzdálenosti 70 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	90	70	96,2	116,8	23,6	1018,6	3,77
2	90	70	96,2	116,8	23,6	1018,6	3,87
3	90	70	96,2	116,8	23,6	1018,6	3,25
4	90	70	96,2	116,8	23,6	1018,6	3,08
5	90	70	96,2	116,8	23,6	1018,6	3,57

(zdroj: vlastní)



Obrázek 30 Průběh hašení svíčky při frekvenci 90 Hz a vzdálenosti 70 cm

(zdroj: vlastní)

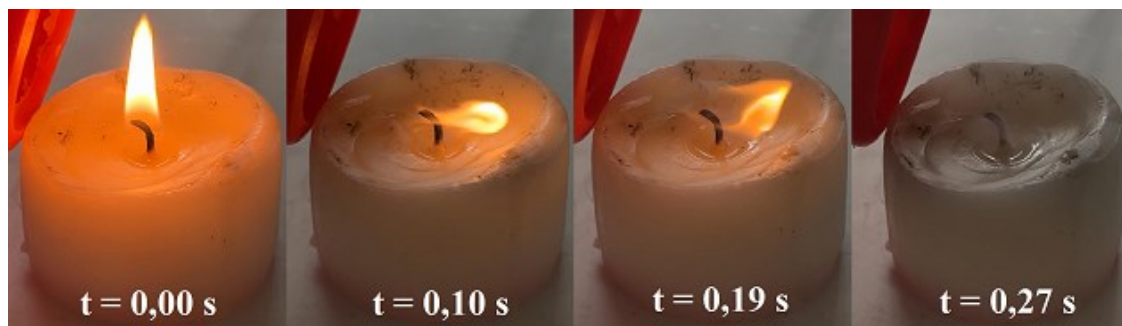
Zvýšením frekvence o dalších 5 Hz bylo dosaženo hodnoty 95 Hz. Při této frekvenci byl naměřen akustický tlak o velikosti 116,6 dB. Z údajů uvedených v Tabulce 16, která zachycuje výsledky měření ve vzdálenosti 60 cm, si lze povšimnout, že doba uhašení plamene zůstala téměř shodná s hodnotami naměřenými při předchozí frekvenci při stejné vzdálenosti. Průměrná doba uhašení činí 0,29 sekund, a oproti předchozí frekvenci je pomalejší o pouhých 0,03 sekund, což můžeme nazvat jako zanedbatelný rozdíl. Z toho

plyne, že rozdíly v účinnosti mezi těmito dvěma frekvencemi jsou téměř nulové. Tuto shodu ilustruje také Obrázek 31.

Tabulka 16 Hašení při frekvenci 95 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	95	60	96,7	116,6	23,6	1018,6	0,27
2	95	60	96,7	116,6	23,7	1018,6	0,36
3	95	60	96,7	116,6	23,6	1018,6	0,38
4	95	60	96,7	116,6	23,6	1018,7	0,25
5	95	60	96,7	116,6	23,6	1018,7	0,23

(zdroj: vlastní)



Obrázek 31 Průběh hašení svíčky při frekvenci 95 Hz a vzdálenosti 60 cm

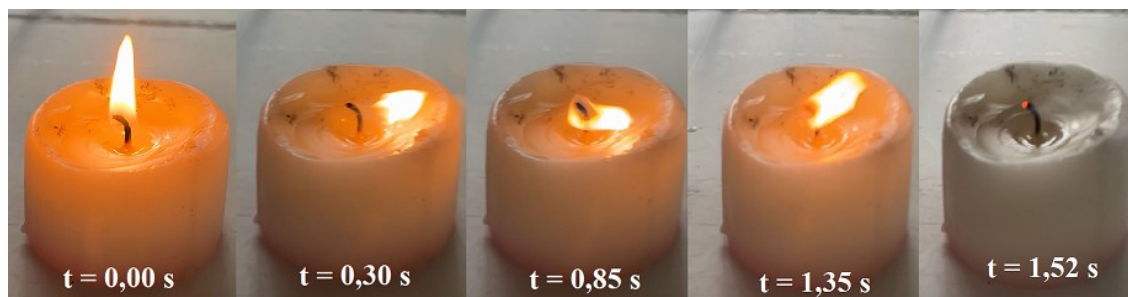
(zdroj: vlastní)

Při zvýšení vzdálenosti na 65 cm se účinek akustické vlny opět snížil. Naměřené hodnoty zaznamenané v Tabulce 17 ukazují mírné prodloužení průměrné doby uhašení na 2,33 sekund. Hodnoty jsou opět téměř totožné s předcházející frekvencí při stejné vzdálenosti, což je patrné i z Obrázku 32.

Tabulka 17 Hašení při frekvenci 95 Hz ve vzdálenosti 65 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	95	65	96,7	116,6	23,7	1018,6	2,15
2	95	65	96,7	116,6	23,7	1018,7	1,52
3	95	65	96,7	116,6	23,6	1018,6	1,59
4	95	65	96,7	116,6	23,6	1018,6	1,37
5	95	65	96,7	116,6	23,6	1018,6	1,07

(zdroj: vlastní)



Obrázek 32 Průběh hašení svíčky při frekvenci 95 Hz a vzdálenosti 65 cm

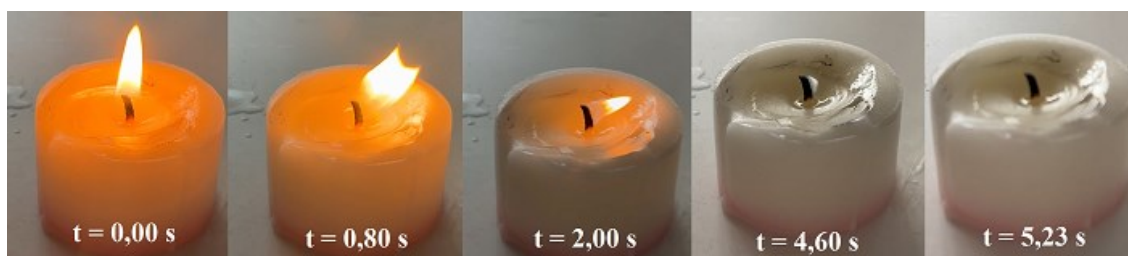
(zdroj: vlastní)

Výsledky zachycené v Tabulce 18 ukazují, že účinnost 95 Hz při vzdálenosti 70 cm značně klesá. Oproti předcházející frekvenci 90 Hz je tento rozdíl již patrný. Průměrná rychlost uhašení činí 4,79 sekund, kdy je tato frekvence o 1,28 sekund pomalejší. Dá se tedy konstatovat, že s rostoucí vzdáleností frekvence 95 Hz výrazněji ztrácí účinnost k uhašení plamene, jak lze rovněž vysledovat z Obrázku 33.

Tabulka 18 Hašení při frekvenci 95 Hz ve vzdálenosti 70 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	95	70	96,7	116,6	23,6	1018,6	5,23
2	95	70	96,7	116,6	23,7	1018,6	5,02
3	95	70	96,7	116,6	23,6	1018,6	4,36
4	95	70	96,7	116,6	23,6	1018,6	3,97
5	95	70	96,7	116,6	23,6	1018,6	5,39

(zdroj: vlastní)



Obrázek 33 Průběh hašení svíčky při frekvenci 95 Hz a vzdálenosti 70 cm

(zdroj: vlastní)

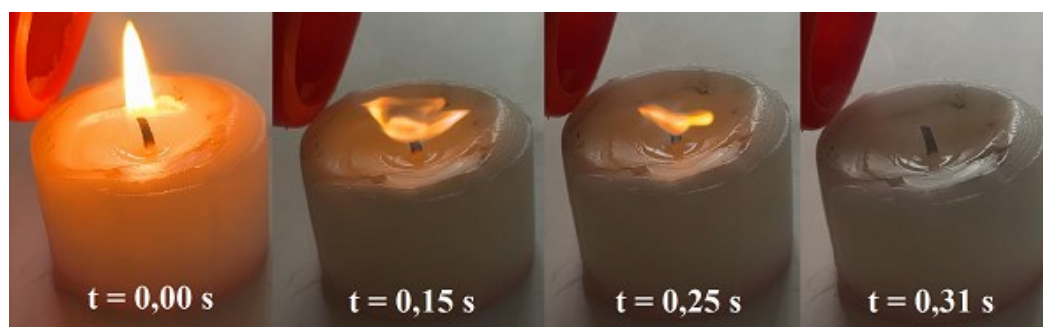
Poslední sledovanou frekvencí bylo 100 Hz. Při této hodnotě hladina akustického tlaku dosahovala 116 dB a plamen se podařilo zhasit ve dvou vzdálenostech. První vzdálenost, 60 cm, reprezentuje Tabulka 19. Průměrným časem uhasnutí bylo 0,38 sekund.

Lze si tedy povšimnout, že od frekvence 85 Hz se doby uhašení se s rostoucí frekvencí opět prodlužují. To potvrzuje také Obrázek 34.

Tabulka 19 Hašení při frekvenci 100 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	100	60	96,9	116	23,7	1018,6	0,38
2	100	60	96,9	116	23,7	1018,7	0,19
3	100	60	96,9	116	23,6	1018,6	0,31
4	100	60	96,9	116	23,6	1018,6	0,59
5	100	60	96,9	116	23,6	1018,6	0,42

(zdroj: vlastní)



Obrázek 34 Průběh hašení svíčky při frekvenci 100 Hz a vzdálenosti 60 cm

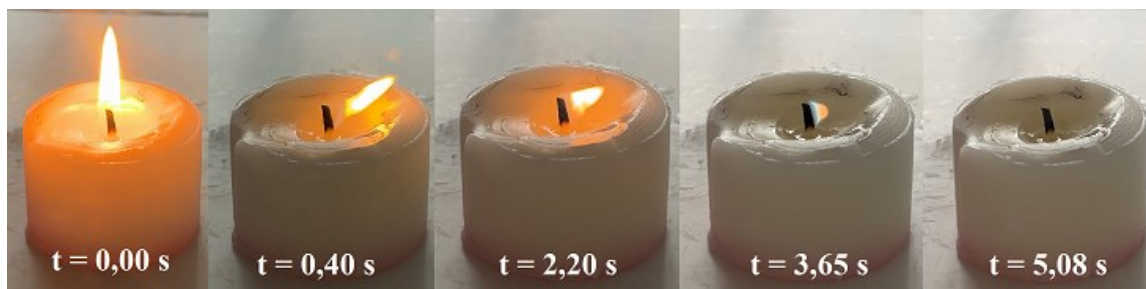
(zdroj: vlastní)

Jak ukazuje Tabulka 20, časy uhašení se při této vzdálenosti už výrazně prodloužily, a to na průměrnou dobu 6,10 sekund. Toto vyobrazuje také Obrázek 35. Při návratu k nižším frekvencím bylo stejné hodnoty dosaženo také při frekvenci 75 Hz ve vzdálenosti 65 cm. To naznačuje již výrazné slábnutí účinnosti této frekvence na větší vzdálenosti.

Tabulka 20 Hašení při frekvenci 100 Hz ve vzdálenosti 65 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	100	65	96,9	116	23,6	1018,6	5,08
2	100	65	96,9	116	23,6	1018,6	7,51
3	100	65	96,9	116	23,6	1018,6	6,59
4	100	65	96,9	116	23,7	1018,7	4,94
5	100	65	96,9	116	23,6	1018,7	6,32

(zdroj: vlastní)



Obrázek 35 Průběh hašení svíčky při frekvenci 100 Hz a vzdálenosti 65 cm

(zdroj: vlastní)

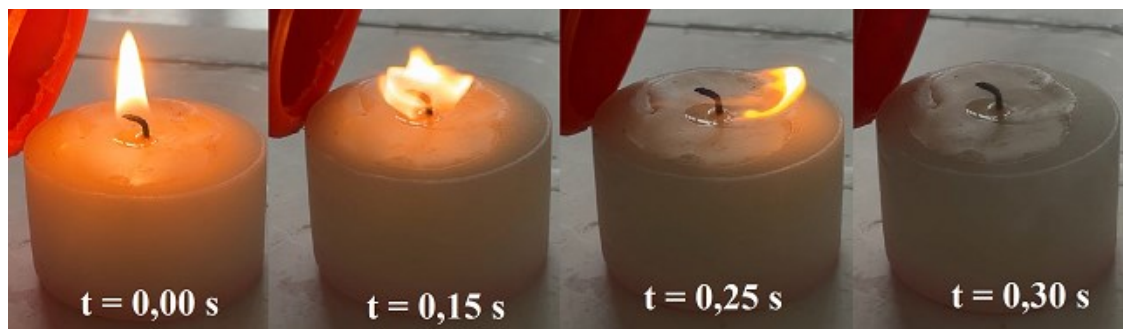
Z provedených měření jasně vyplývá, že nejefektivnější frekvencí pro hašení plamene pomocí zvukových vln byla 85 Hz. Ve srovnání s ostatními frekvencemi totiž vykazovala znatelně lepší účinnost a tím rychlejší dobu uhašení. Jak bylo uvedeno v podkapitole 4.1, po určení této optimální frekvence následovalo podrobnější měření v jejím blízkém okolí, abychom ověřili, zda se zde nenachází ještě účinnější hodnota. Další testování tedy proběhlo pro frekvence 83 Hz, 84 Hz, 86 Hz a 87 Hz.

Jako první bylo provedeno měření pro frekvenci 83 Hz při nejmenší vzdálenosti 60 cm, pro níž výsledky zachycuje Tabulka 21. Akustický tlak dosahoval hodnoty 117,3 dB a uhašení plamene bylo dosaženo za průměrný čas 0,32 sekund. Tento výsledek, vyobrazený na Obrázku 36, byl pomalejší než u referenční frekvence 85 Hz, a proto nebyla provedena další měření.

Tabulka 21 Hašení při frekvenci 83 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	83	60	95,5	117,3	23,6	1018,6	0,25
2	83	60	95,5	117,3	23,6	1018,6	0,37
3	83	60	95,5	117,3	23,6	1018,6	0,38
4	83	60	95,5	117,3	23,6	1018,6	0,30
5	83	60	95,5	117,3	23,7	1018,6	0,32

(zdroj: vlastní)



Obrázek 36 Průběh hašení svíčky při frekvenci 83 Hz a vzdálenosti 60 cm

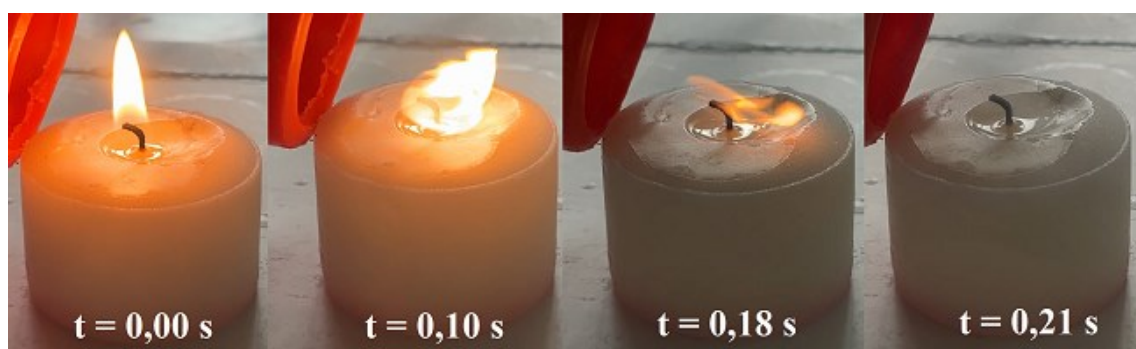
(zdroj: vlastní)

Následovalo testování frekvence 84 Hz, opět s akustickým tlakem 117,3 dB. Jak dokládá Tabulka 22 a Obrázek 37, plamen byl uhašen za průměrných 0,19 sekundy – tedy o 0,07 sekundy pomaleji než při 85 Hz. Proto ani v tomto případě měření pro větší vzdálenosti nepokračovalo.

Tabulka 22 Hašení při frekvenci 84 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	84	60	95,5	117,3	23,6	1018,6	0,13
2	84	60	95,5	117,3	23,7	1018,6	0,18
3	84	60	95,5	117,3	23,6	1018,6	0,23
4	84	60	95,5	117,3	23,6	1018,6	0,19
5	84	60	95,5	117,3	23,6	1018,7	0,21

(zdroj: vlastní)



Obrázek 37 Průběh hašení svíčky při frekvenci 84 Hz a vzdálenosti 60 cm

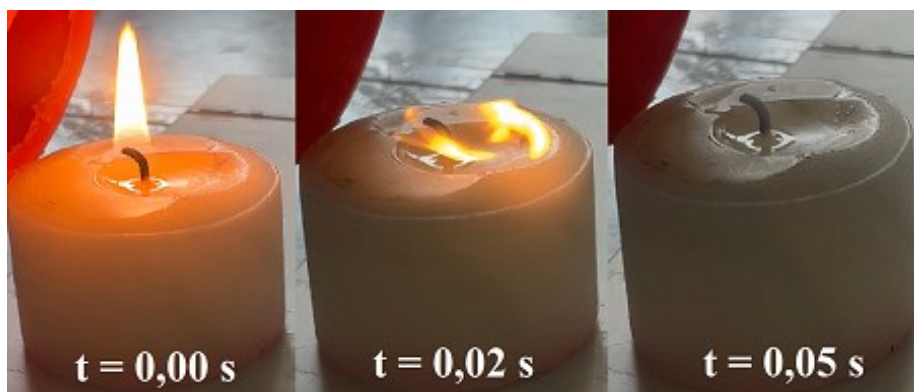
(zdroj: vlastní)

Při následující frekvenci je překročena referenční hodnota, a je tak je dosaženo 86 Hz. Tato hodnota, která by se mohla zdát jako nepatrný rozdíl oproti frekvenci 85 Hz, přinesla velké překvapení. Při akustickém tlaku 117,5 dB byly naměřeny překvapivé hodnoty. Tabulka 23 znázorňující měření při vzdálenost 60 cm ukazuje dosud nejrychlejší zaznamenané uhašení. Tato frekvence dokázala uhasit plamen v průměru za 0,10 sekundy, což je zatím nejrychlejší zaznamenaný výsledek. Nejkratší jednotlivé uhašení dokonce trvalo jen 0,05 sekundy. To je zachyceno na Obrázku 38. Na základě tohoto překvapivého výsledku byla provedena měření i ve větších vzdálenostech, aby bylo možné zjistit, jak si frekvence povede ve srovnání s frekvencí 85 Hz.

Tabulka 23 Hašení při frekvenci 86 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	86	60	95,7	117	23,6	1018,6	0,12
2	86	60	95,7	117	23,7	1018,7	0,11
3	86	60	95,7	117	23,6	1018,6	0,09
4	86	60	95,7	117	23,7	1018,6	0,13
5	86	60	95,7	117	23,6	1018,7	0,05

(zdroj: vlastní)



Obrázek 38 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 60 cm

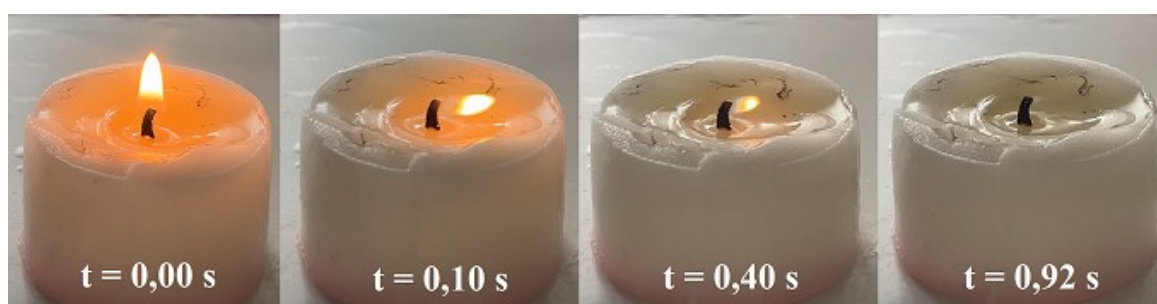
(zdroj: vlastní)

Při vzdálenosti 65 cm byl plamen uhašen v průměru za 0,92 sekundy, což představuje téměř celou sekundu zrychlení oproti referenční frekvenci 85 Hz, jak uvádí Tabulka 24. Jak dokládá i Obrázek 39, tento výsledek naznačuje, že frekvence 86 Hz si udržuje svou výraznou účinnost i při větších vzdálenostech.

Tabulka 24 Hašení při frekvenci 86 Hz ve vzdálenosti 65 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	86	65	95,7	117	23,6	1018,6	1,07
2	86	65	95,7	117	23,6	1018,6	0,59
3	86	65	95,7	117	23,7	1018,7	0,92
4	86	65	95,7	117	23,6	1018,7	0,71
5	86	65	95,7	117	23,6	1018,6	1,29

(zdroj: vlastní)



Obrázek 39 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 65 cm

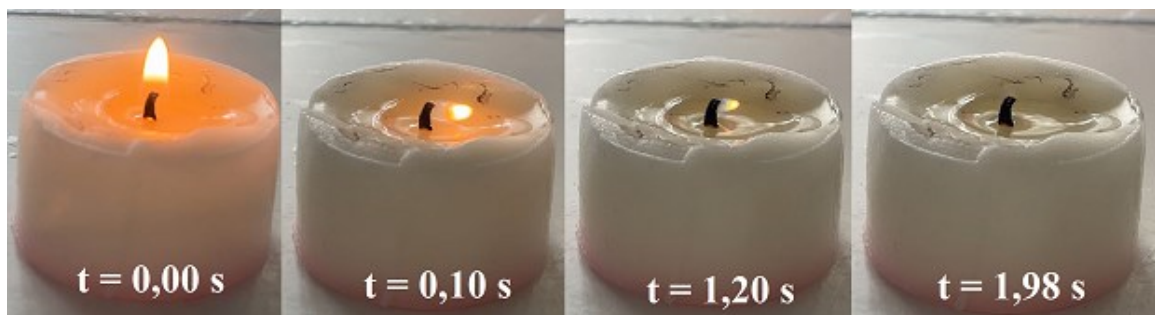
(zdroj: vlastní)

Ještě větší rozdíl se projevil při měření na vzdálenost 70 cm, jehož výsledky jsou uvedeny v Tabulce 25. Průběh měření pro tuto frekvenci zachycuje Obrázek 40. Zde činil průměrný čas uhašení 2,27 sekundy, což je přesně o jednu sekundu rychleji než v případě frekvence 85 Hz. Tento posun opět potvrzuje, že tato frekvence není jen účinnější v blízkosti zdroje, ale svou účinnost si zachovává i při vzdálenějším odstupu.

Tabulka 25 Hašení při frekvenci 86 Hz ve vzdálenosti 70 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	86	70	95,7	117	23,6	1018,6	2,65
2	86	70	95,7	117	23,7	1018,6	1,98
3	86	70	95,7	117	23,6	1018,7	1,75
4	86	70	95,7	117	23,6	1018,6	1,91
5	86	70	95,7	117	23,6	1018,7	3,07

(zdroj: vlastní)



Obrázek 40 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 70 cm

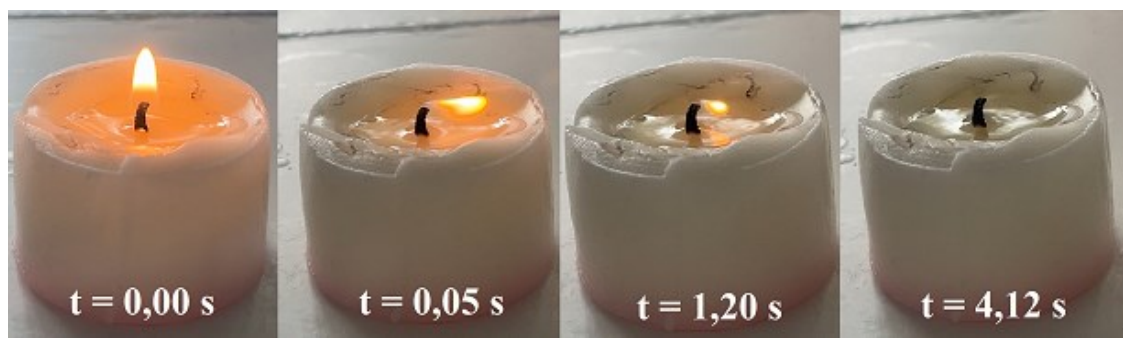
(zdroj: vlastní)

Při měření na vzdálenost 75 cm, viz Tabulka 26, je rozdíl již patrný a nemůže být přehlédnut. Průměrná doba potřebná k uhašení byla 4,44 sekund, což je o celých 3,24 sekund rychleji než u referenční frekvence. Tento rozdíl není jen číselně zajímavý, ale může mít i skutečný dopad v praxi. Potvrzuje, že frekvence 86 Hz zásadně převyšuje 85 Hz ve schopnosti rychle a efektivně eliminovat plamen i ve větší vzdálenosti. Tento fakt jasně znázorňuje i Obrázek 41.

Tabulka 26 Hašení při frekvenci 86 Hz ve vzdálenosti 75 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	86	75	95,7	117	23,6	1018,6	5,03
2	86	75	95,7	117	23,6	1018,6	4,16
3	86	75	95,7	117	23,6	1018,6	3,94
4	86	75	95,7	117	23,6	1018,6	4,12
5	86	75	95,7	117	23,6	1018,6	4,95

(zdroj: vlastní)



Obrázek 41 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 75 cm

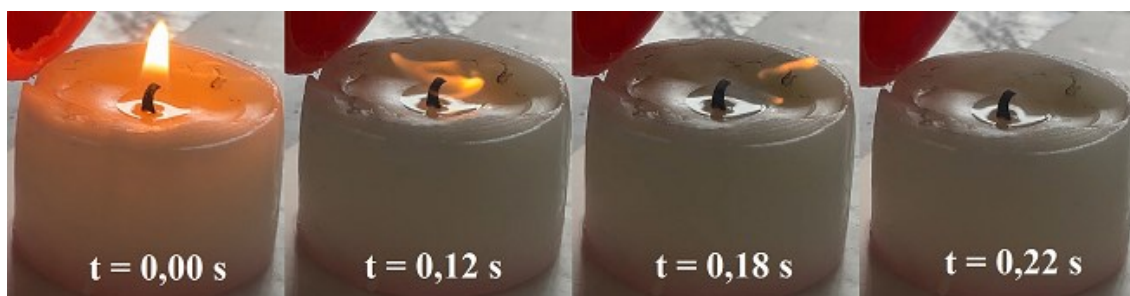
(zdroj: vlastní)

Poslední testovanou frekvencí byla hodnota 87 Hz. Jak ukazuje Tabulka 27, průměrný čas potřebný k uhašení plamene při této frekvenci činil 0,20 sekund. Tento výsledek zachycený na Obrázku 42 naznačuje, že účinnost opět mírně klesá ve srovnání s předchozími hodnotami. Proto již další měření nebyla potřeba realizovat.

Tabulka 27 Hašení při frekvenci 87 Hz ve vzdálenosti 60 cm

Číslo měření	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
1	87	60	96	117,3	23,6	1018,6	0,17
2	87	60	96	117,3	23,6	1018,7	0,22
3	87	60	96	117,3	23,6	1018,6	0,19
4	87	60	96	117,3	23,6	1018,6	0,22
5	87	60	96	117,3	23,6	1018,6	0,18

(zdroj: vlastní)



Obrázek 42 Průběh hašení svíčky při frekvenci 87 Hz a vzdálenosti 60 cm

(zdroj: vlastní)

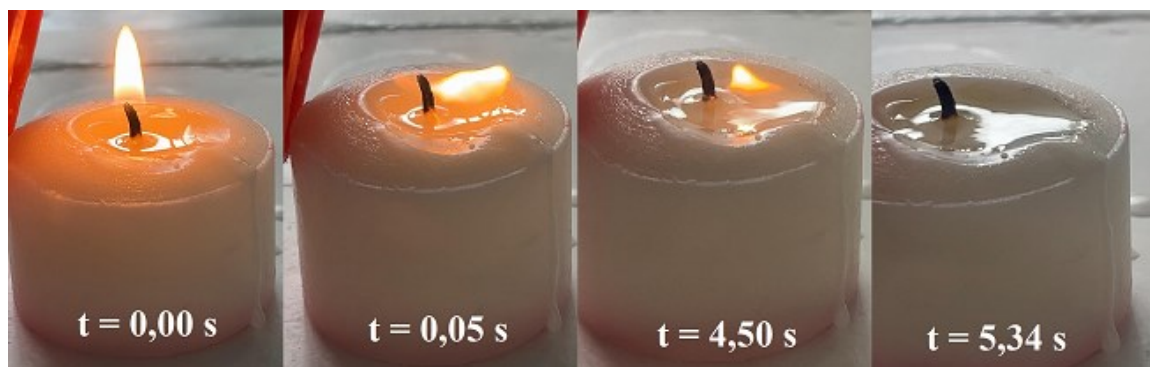
Užší testování frekvencí v blízkosti 85 Hz odhalilo, že frekvence 86 Hz vykazuje vyšší účinnost při hašení plamene než původní referenční hodnota 85 Hz. Z tohoto důvodu byla tato frekvence použita také při ověřování vlivu tvaru akustické křivky na úspěšnost uhašení plamene. Tato měření, zaznamenaná v Tabulce 28, byla provedena pouze při nejkratší vzdálenosti 60 cm a pouze jedenkrát. Testovány byly dva tvary signálu, a to čtvercová a trojúhelníková vlna. Z tabulky vyplývá, že akustický tlak trojúhelníkové vlny je téměř totožný s akustickým tlakem základního sinusového průběhu, a to 116,7 dB. Avšak u čtvercové vlny byla naměřena výrazně vyšší hodnota akustického tlaku, konkrétně 132,9 dB. Tato hodnota již překračuje běžně tolerované limity a pobyt v blízkosti zdroje takového tónu je značně nepříjemný. Navzdory vysoké intenzitě byl čas uhašení plamene při čtvercovém průběhu nejdelší, činil 5,34 sekundy. U trojúhelníkového průběhu byla doba

uhašení výrazně kratší, konkrétně 0,28 sekund. Jak ukazují Obrázky 43 a 44, tvar signálu má na chování plamene zjevný vliv. Z těchto výsledků ale zároveň vyplývá, že sinusový průběh zůstává nejvhodnější volbou pro generování tónů dané frekvence s cílem efektivního hašení plamene.

Tabulka 28 Vliv tvaru signálu na rychlost uhašení plamene

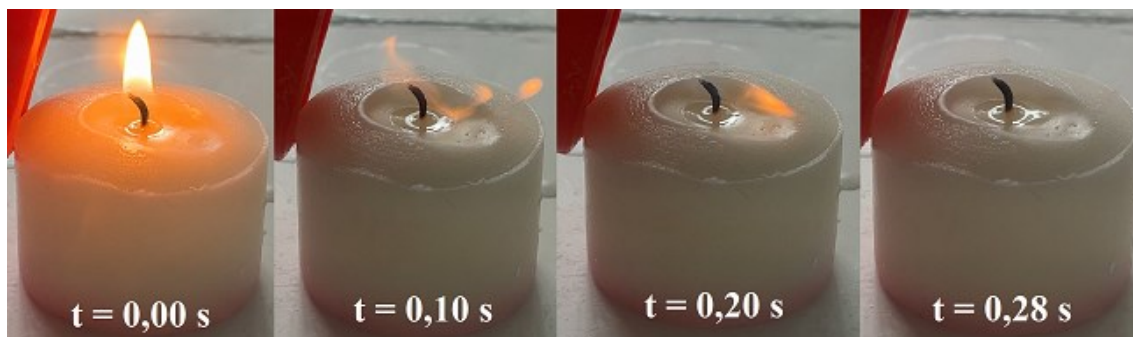
Tvar křivky	Frekvence [Hz]	Vzdálenost [cm]	Akustický tlak [dB(A)]	Akustický tlak [dB]	Teplota okolí [°C]	Barometrický tlak okolí [hPa]	Čas [s]
Sinus	86	60	95,7	117	23,6	1018,6	0,10
Čtverec	86	60	111,6	132,9	23,6	1018,7	5,34
Trojúhelník	86	60	95,6	116,7	23,7	1018,6	0,28

(zdroj: vlastní)



Obrázek 43 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 60 cm při čtvercovém průběhu signálu

(zdroj: vlastní)



Obrázek 44 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 60 cm při trojúhelníkovém průběhu signálu

(zdroj: vlastní)

5.1 Faktory ovlivňující úspěšnost hašení plamene

Během experimentu bylo zaznamenáno hned několik faktorů, které měly vliv na rychlost a v některých případech i na samotnou úspěšnost uhašení plamene pomocí zvukových vln. Ukázalo se, že jedním z nejvýznamnějších vlivů bylo množství roztaveného vosku, které ovlivňovalo stabilitu a odolnost plamene. Na tento faktor navazovala i délka knotu, čím delší knot, tím větší a těžší plamen na uhašení. Aby se předešlo zkreslení výsledků, byly při měření používány více svíček se stejnými parametry, což pomohlo eliminovat rozdíly v množství vosku a zajistit tak přesnější výsledky. Rovněž byla průběžně sledována délka knotu. Pokud došlo k jeho výraznému zkrácení nebo zlomení, byla daná svíčka vyřazena. Navzdory ochrannému plexisklu mohly experiment ovlivnit i vnější podmínky, například drobné proudění vzduchu shora, jelikož plexisklo z bezpečnostních důvodů nemělo vrchní kryt. Nelze vyloučit ani drobné rozdíly ve vzdálenosti kuželu od svíčky nebo vliv náklonu reproduktoru, jež byl specifikován v podkapitole 4.1. Lze předpokládat, že při větším náklonu reproduktoru by bylo hašení plamene účinnější. Hypoteticky mohlo roli sehrát i proudění zvukových vln uvnitř kuželu připojeného k reproduktoru. Je možné, že docházelo k nežádoucí rezonanci, která snižovala účinnost vln. Tento předpoklad však není podložen žádnými relevantními daty a jedná se o pouhou domněnku. Všechny tyto faktory společně vytvářely složité podmínky, v nichž se efektivita hašení ukázala být velmi citlivá i na drobné odchylky.

5.2 Srovnání s běžně používanými hasivy

Hašení pomocí zvukových vln se výrazně liší od běžně používaných metod, jako je hašení využívající vodu, pěnu, nebo například prášek. Tato metoda se dosud ukazuje jako účinná zejména při hašení malých a stabilních plamenů. Jednou z největších předností této technologie je její neinvazivní charakter. Tradiční metody, které hasí požáry na principu fyzikálního ochlazení hořlaviny, vytěsnění kyslíku nebo přerušování chemické reakce hoření, zasahují invazivně. To znamená, že mohou zanechávat rezidua a poškodit okolní prostředí nebo vybavení. Navíc v některých specifických situacích, například při hašení elektrických zařízení nebo požárů olejů a tuků, mohou představovat bezpečnostní riziko. Navzdory tomu jsou ale efektivní a v mnoha situacích univerzální. Oproti tomu hašení pomocí zvukových vln nezanechává žádná rezidua, a tudíž nepoškozuje citlivé materiály ani zařízení. Tím, že působí na plamen neinvazivně, by tato metoda mohla najít uplatnění právě tam, kde jsou tradiční hasiva nevhodná nebo potenciálně nebezpečná. Avšak velkou nevýhodou

hašení zvukovými vlnami je prozatím nižší univerzálnost, vysoká náročnost na přesné technické nastavení a citlivost na faktory okolního prostředí. Experimentální ověření dokazuje, že při správných podmínkách může být tato metoda poměrně rychlá a v určitých případech se svou účinností může vyrovnat tradičním způsobům hašení. Aby bylo možné považovat tuto technologii za plnohodnotnou alternativu, musí projít dalším vývojem a důkladným testováním.

5.3 Možná aplikovatelnost návrhu

Jak již nastínila podkapitola 5.2, experimentální testování této metody ukázalo, že hašení pomocí zvukových vln má slibný potenciál a mohlo by se v budoucnu uplatnit v oblasti požární ochrany. Ačkoli se zatím nachází pouze ve fázi testování, princip fungování metody i dosažené výsledky naznačují, že při správné optimalizaci a technickém doladění by tato technologie mohla výrazně rozšířit možnosti současných hasicích metod. Z praktického hlediska by tato metoda mohla najít uplatnění v kuchyních různých domácností. Právě zde často vznikají požáry způsobené samovznícením olejů či tuků. V těchto případech může být použití nevhodného hasiva (např. vody) velmi nebezpečné. Vnikne totiž prudká reakce mezi horkým olejem a vodou, která způsobí rozstříknutí oleje a rozšíření požáru. Technologie hašení zvukovými vlnami by zde mohla nabídnout účinné a zároveň bezpečnější řešení. Je však třeba zmínit, že ani při neinvazivním zásahu nelze zcela vyloučit riziko rozstříknutí hořlavé kapaliny. Existují však studie, které prokázaly možnost uhašení ohně u hořlavých kapalin (např. ropných produktů) pomocí akustických vln. Při těchto pokusech nebylo zaznamenáno rozptýlení hořlavé kapaliny [33]. Na základě těchto poznatků lze předpokládat, že by tato technologie mohla být vhodná i pro hašení kuchyňských olejů. Přímé experimentální důkazy pro tento konkrétní typ požáru ale zatím chybí. Další výzkum a technické zdokonalování by však v budoucnu mohly vést k účinnému a bezpečnému způsobu hašení i v těchto situacích. Do budoucna se nabízí možnost vývoje automatizovaného zařízení, které by v případě detekce vzplanutí oleje aktivovalo směrované zvukové vlny k potlačení plamene. Takový systém by mohl být integrován přímo do kuchyňského vybavení, například do digestoře, nebo umístěn v blízkosti varné desky.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo ověření možnosti hašení požárů zvukovými vlnami. Práce se nejprve zaměřila na popis průběhu hoření, jeho vzniku, mechanismu přerušení a také na klasifikaci požárů. Dále byl popsán současný stav v oblasti hašení požárů, včetně běžně využívaných metod. V praktické části byl navržen experiment zaměřený na ověření funkčnosti této netradiční metody. Získané výsledky byly vyhodnoceny a porovnány s běžně dostupnými hasicími prostředky. Zároveň byla naznačena možná budoucí aplikovatelnost této technologie. V současnosti však metoda ještě není připravena k plnohodnotnému nasazení v praxi a je třeba ji chápat spíše jako teoretický koncept s potenciálem do budoucna, a to za předpokladu dalšího výzkumu, vývoje a optimalizace.

Experimentální měření probíhalo pro několik frekvencí, přičemž se ukázalo, že rozhodujícími parametry jsou právě frekvence a vzdálenost, na kterou má zvuk účinek. Z výsledků vyplynulo, že různé frekvence mají odlišný vliv na chování plamene, a to jak z hlediska účinnosti, tak i vzdálenosti, na kterou dokážou plamen uhasit. Z rozmezí frekvencí, které byly podrobeny testování se jako nejefektivnější ukázala frekvence 86 Hz, která oproti ostatním vykazovala výraznější účinek. Projevilo se to zejména ve zkrácení doby potřebné k uhašení a ve schopnosti působit na větší vzdálenosti. Co se týče tvaru generovaného signálu, nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití sinusového průběhu, který se ukázal jako nejvhodnější pro daný typ aplikace. Na základě výsledků experimentu lze konstatovat, že hašení plamene pomocí zvukových vln je za určitých podmínek realizovatelné. Metoda se ukázala jako účinná především při menších vzdálenostech a při malém stabilním plamenu.

Závěrem lze konstatovat, že práce přinesla přínosné poznatky v oblasti výzkumu alternativních hasicích metod. Bylo prokázáno, že zvukové vlny jsou schopny za určitých podmínek ovlivnit nebo potlačit hoření. Přestože metoda zatím není připravena k širokému nasazení, její potenciál byl potvrzen a nabízí prostor pro dalšího rozvoj. Práce tak může být vnímána jako výchozí bod pro další výzkum, který by mohl vést k vývoji nových, šetrnějších a modernějších technologií v oblasti požární bezpečnosti. Je však třeba mít na paměti, že experiment probíhal v laboratorních podmínkách, které se výrazně liší od reálných situací při skutečných požárech. Plamen byl testován v malém měřítku a bez přítomnosti dalších faktorů, jako je proudění vzduchu, rozmanitost hořlavých materiálů či kolísání teploty okolí. Tyto faktory mohou účinnost zvukových vln výrazně ovlivnit. Do budoucna by proto bylo vhodné experiment dále rozšířit, například o testování vlivu zvuku na různé typy hořlavin

nebo o měření prováděná v podmínkách simulujících reálné požáry. Takový přístup by umožnil lépe posoudit praktickou použitelnost této metody.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KVARČÁK, Miloš. *Základy požární ochrany. SPBI Spektrum. Červená řada*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005. ISBN 80-86634-76-0.
- [2] ŠENOVSKÝ, Michail. *Základy požárního inženýrství. SPBI Spektrum. Červená řada*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2004. ISBN 80-86634-50-7
- [3] KALOUSEK, Jaroslav. *Základy fyzikální chemie hoření, výbuchu a hašení*. 2. vyd. SPBI Spektrum. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1999. ISBN 80-86111-34-2.
- [4] PALOCH, Radim. Hasební látky způsoby přerušení hoření. Online. Hasiči vzdělávání. Dostupné z: https://hasici-vzdelavani.cz/download/bravansky/pdf/hasebni_latky.pdf. [cit. 2025-04-28].
- [5] Teorie hašení a principy hašení [online]. Hasiči vzdělávání. Dostupné z: https://www.hasici-vzdelavani.cz/repository/IVS_prednasky/1_hasebni_latky/2_teorie_haseni_principy_haseni/. [Cit. 2025-01-01].
- [6] ŠTAJNCOVÁ, Kateřina a SUCHARDA, Jakub. Požár jedlých tuků a olejů v domácnosti. Online. Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR. Dostupné z: <https://hzscr.gov.cz/clanek/pozar-jedlych-tuku-a-oleju-v-domacnosti.aspx>. [cit. 2025-04-28].
- [7] ANDRÁŠKO, Petr. Jak pomáhají drony českým hasičům v kritických situacích? Online. Red Bull. 2020. Dostupné z: <https://www.redbull.com/cz-cs/tech-drony-a-cesti-hasici-hzs-vyuziti-zachrana>. [cit. 2025-04-28].
- [8] ORLÍKOVÁ, Kateřina a ŠTROCH, Petr. *Hasiva klasická a moderní. SPBI Spektrum*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2002. ISBN 80-86111-93-8. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:5b351a70-7160-11ee-9a22-5ef3fc9bb22f>.
- [9] MACHT, Karel. Hašení vodou, vodní proudy, proudnice. Online. In: . Praha, s. 17. Dostupné z: https://www.hasici-vzdelavani.cz/download/konspekty/1_3_01.pdf. [cit. 2025-04-28].

- [10] Hasicí pěny. Online. Hasiči vzdělávání. Dostupné z: https://www.hasici-vzdelavani.cz/repository/IVS_prednasky/1_hasebni_latky/4_hasici_peny/html5.html. [cit. 2025-04-28].
- [11] Hasicí prášky. Online. Hasiči vzdělávání. Dostupné z: https://www.hasici-vzdelavani.cz/repository/IVS_prednasky/1_hasebni_latky/5_hasici_prasky/html5.html. [cit. 2025-04-28].
- [12] Hasicí prášky. Online. Pozarniochrana.netstranky.cz. Dostupné z: https://www.hasici-vzdelavani.cz/repository/IVS_prednasky/1_hasebni_latky/5_hasici_prasky/html5.html. [cit. 2025-04-28].
- [13] Inertní plyny jako hasební látka. Online. Hasiči vzdělávání. 2012. Dostupné z: https://www.hasicivzdelavani.cz/repository/IVS_prednasky/1_hasebni_latky/6_inertni_plyny_jako_hasebni_latka/html5.html. [cit. 2025-04-28].
- [14] Hasební látky: Inertní plyny. Online. Hasiči vzdělávání. Dostupné z: https://www.hasici-vzdelavani.cz/download/bravansky/pdf/hasebni_latky-inertni_plyny.pdf. [cit. 2025-04-28].
- [15] Halotronové hasicí přístroje. Online. Hasici-pristroje.net. C2006. Dostupné z: <https://www.hasici-pristroje.net/halotronove/>. [cit. 2025-04-28].
- [16] KOUBKOVÁ, Ilona. Stabilní hasicí zařízení, 2. část. Online. ČVUT. Dostupné z: <https://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125pbzb/prednasky/125pbzb-04.pdf>. [cit. 2025-04-28].
- [17] FAHY, Frank. Foundations of engineering acoustics. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2001. ISBN 0-12-247665-4. Dostupné také z: <http://www.loc.gov/catdir/description/els031/00103464.html>.
- [18] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02246-3.
- [19] DITRICH, Vít. Problematika záznamu zvuku se zaměřením na vzdělávání. Online, Bakalářská práce. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2011. Dostupné z: https://theses.cz/id/arwv69/Ditrich_bakalarska_prace_Problematika_zaznamu_zvuku.pdf. [cit. 2025-01-04].

- [20] Vlnění, zvuk a akustika. Online. Itnetwork.cz. 2025. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/maturitni-otazky-z-fyziky-vlneni-zvuk-a-akustika>. [cit. 2025-04-09].
- [21] KRÁLOVÁ, Magda. Šíření zvuku. Online. Techmania Science Centrum. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/sireni-zvuku>. [cit. 2025-01-05].
- [22] Šíření akustického vlnění. Online. WikiSkripta. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Šíření_akustického_vlnění. [cit. 2025-01-05].
- [23] Zvukové frekvence a jaký na nás mají vliv podle vědců? Online. TECHNET. 2023. Dostupné z: <https://tech-net.cz/zvukove-frekvence-a-jaky-na-nas-maji-vliv-podle-vedcu/>. [cit. 2025-01-05].
- [24] Vlnová délka. Online. TechLib. Dostupné z: <https://tech-lib.eu/definition/wavelength.html>. [cit. 2025-04-28].
- [25] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [26] PROCHÁZKA, Michael. Zvukově pohltivé materiály používané v automobilech. Online, Bakalářská práce. Liberec: TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, 2012. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/86d432e6-af7d-44d5-8d15-a3457ecfe72d/content>. [cit. 2025-01-05].
- [27] MEI, J. a CHENG, K. W. E. A Study on Influencing Factors of Low Frequency Sound Wave Fire Extinguisher. Online. In: 2020 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). IEEE, 2020, s. 1-4. ISBN 978-1-7281-9382-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/PESA50370.2020.9343973>. [cit. 2025-04-28].
- [28] Senzor Tlaku a Teploty BMP280. Online. Drátek návody. Dostupné z: <https://navody.drateg.cz/navody-k-produktum/senzor-tlaku-a-teploty-bmp280.html>. [cit. 2025-05-06].
- [29] HD50. Online. Hartke. C2025. Dostupné z: <https://www.hartke.com/products/combos/hd-series-combos/hd50/>. [cit. 2025-05-07].

- [30] Hlukoměr UNI-T UT353. Online. Tipa. C1995-2025. Dostupné z: <https://www.tipa.eu/cz/hlukomer-uni-t-ut353/d-174949/>. [cit. 2025-05-16].
- [31] ŠVIHÁLEK, Filip. Automatizace měření hluků se zvukoměrem XL2. Online, Bakalářská práce. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2016. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=130337. [cit. 2025-05-16].
- [32] A-weighting Table. Online. Acoustical Engineer. C2019. Dostupné z: <https://acousticalengineer.com/a-weighting-table/>. [cit. 2025-05-16].
- [33] VOVCHUK, T. S.; WILK-JAKUBOWSKI, J. L.; TELELIM, V. M.; LOBOICHENKO, V. M.; SHEVCHENKO, R. I. et al. Investigation of the use of the acoustic effect in extinguishing fires of oil and petroleum products. Online. SOCAR Proceedings. 2021, č. SI2, s. 24-31. ISSN 22186867. Dostupné z: <https://doi.org/10.5510/OGP2021SI200602>. [cit. 2025-05-23].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Trojúhelník hoření.....	13
Obrázek 2 Plný proud	20
Obrázek 3 Tříšťený proud	20
Obrázek 4 Mlhový proud.....	21
Obrázek 5 Schéma šíření zvuku od zdroje.....	29
Obrázek 6 Příčné vlnění.....	30
Obrázek 7 Podélné vlnění	30
Obrázek 8 Kolísání hustoty vzduchu a vliv na plamen	38
Obrázek 9 Schéma konstrukce pro hašení zvukovými vlnami	41
Obrázek 10 Schéma zapojení senzorů BMP280 k Arduino Uno R3	42
Obrázek 11 Prostředí Arduino IDE	43
Obrázek 12 Výpis hodnot na sériový monitor	44
Obrázek 13 Prostředí programu Audacity	45
Obrázek 14 Vytvoření generace tónu	45
Obrázek 15 Stopa připravená k přehrání	46
Obrázek 16 Průběh hašení svíčky při frekvenci 65 Hz a vzdálenosti 60 cm.....	49
Obrázek 17 Průběh hašení svíčky při frekvenci 65 Hz a vzdálenosti 65 cm.....	49
Obrázek 18 Průběh hašení svíčky při frekvenci 70 Hz a vzdálenosti 60 cm.....	50
Obrázek 19 Průběh hašení svíčky při frekvenci 70 Hz a vzdálenosti 65 cm.....	51
Obrázek 20 Průběh hašení svíčky při frekvenci 75 Hz a vzdálenosti 60 cm.....	52
Obrázek 21 Průběh hašení svíčky při frekvenci 75 Hz a vzdálenosti 65 cm.....	53
Obrázek 22 Průběh hašení svíčky při frekvenci 80 Hz a vzdálenosti 60 cm.....	54
Obrázek 23 Průběh hašení svíčky při frekvenci 80 Hz a vzdálenosti 65 cm.....	55
Obrázek 24 Průběh hašení svíčky při frekvenci 85 Hz a vzdálenosti 60 cm.....	56
Obrázek 25 Průběh hašení svíčky při frekvenci 85 Hz a vzdálenosti 65 cm.....	56
Obrázek 26 Průběh hašení svíčky při frekvenci 85 Hz a vzdálenosti 70 cm.....	57
Obrázek 27 Průběh hašení svíčky při frekvenci 85 Hz a vzdálenosti 75 cm.....	58
Obrázek 28 Průběh hašení svíčky při frekvenci 90 Hz a vzdálenosti 60 cm.....	59
Obrázek 29 Průběh hašení svíčky při frekvenci 90 Hz a vzdálenosti 65 cm.....	59
Obrázek 30 Průběh hašení svíčky při frekvenci 90 Hz a vzdálenosti 70 cm.....	60
Obrázek 31 Průběh hašení svíčky při frekvenci 95 Hz a vzdálenosti 60 cm.....	61
Obrázek 32 Průběh hašení svíčky při frekvenci 95 Hz a vzdálenosti 65 cm.....	62
Obrázek 33 Průběh hašení svíčky při frekvenci 95 Hz a vzdálenosti 70 cm.....	62
Obrázek 34 Průběh hašení svíčky při frekvenci 100 Hz a vzdálenosti 60 cm.....	63

Obrázek 35 Průběh hašení svíčky při frekvenci 100 Hz a vzdálenosti 65 cm	64
Obrázek 36 Průběh hašení svíčky při frekvenci 83 Hz a vzdálenosti 60 cm	65
Obrázek 37 Průběh hašení svíčky při frekvenci 84 Hz a vzdálenosti 60 cm	65
Obrázek 38 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 60 cm	66
Obrázek 39 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 65 cm	67
Obrázek 40 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 70 cm	68
Obrázek 41 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 75 cm	68
Obrázek 42 Průběh hašení svíčky při frekvenci 87 Hz a vzdálenosti 60 cm	69
Obrázek 43 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 60 cm při čtvercovém průběhu signálu	70
Obrázek 44 Průběh hašení svíčky při frekvenci 86 Hz a vzdálenosti 60 cm při trojúhelníkovém průběhu signálu	70

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Hašení při frekvenci 65 Hz ve vzdálenosti 60 cm	48
Tabulka 2 Hašení při frekvenci 65 Hz ve vzdálenosti 65 cm	49
Tabulka 3 Hašení při frekvenci 70 Hz ve vzdálenosti 60 cm	50
Tabulka 4 Hašení při frekvenci 70 Hz ve vzdálenosti 65 cm	51
Tabulka 5 Hašení při frekvenci 75 Hz ve vzdálenosti 60 cm	52
Tabulka 6 Hašení při frekvenci 75 Hz ve vzdálenosti 65 cm	53
Tabulka 7 Hašení při frekvenci 80 Hz ve vzdálenosti 60 cm	54
Tabulka 8 Hašení při frekvenci 80 Hz ve vzdálenosti 65 cm	54
Tabulka 9 Hašení při frekvenci 85 Hz ve vzdálenosti 60 cm	55
Tabulka 10 Hašení při frekvenci 85 Hz ve vzdálenosti 65 cm	56
Tabulka 11 Hašení při frekvenci 85 Hz ve vzdálenosti 70 cm	57
Tabulka 12 Hašení při frekvenci 85 Hz ve vzdálenosti 75 cm	57
Tabulka 13 Hašení při frekvenci 90 Hz ve vzdálenosti 60 cm	58
Tabulka 14 Hašení při frekvenci 90 Hz ve vzdálenosti 65 cm	59
Tabulka 15 Hašení při frekvenci 90 Hz ve vzdálenosti 70 cm	60
Tabulka 16 Hašení při frekvenci 95 Hz ve vzdálenosti 60 cm	61
Tabulka 17 Hašení při frekvenci 95 Hz ve vzdálenosti 65 cm	61
Tabulka 18 Hašení při frekvenci 95 Hz ve vzdálenosti 70 cm	62
Tabulka 19 Hašení při frekvenci 100 Hz ve vzdálenosti 60 cm	63
Tabulka 20 Hašení při frekvenci 100 Hz ve vzdálenosti 65 cm	63
Tabulka 21 Hašení při frekvenci 83 Hz ve vzdálenosti 60 cm	64
Tabulka 22 Hašení při frekvenci 84 Hz ve vzdálenosti 60 cm	65
Tabulka 23 Hašení při frekvenci 86 Hz ve vzdálenosti 60 cm	66
Tabulka 24 Hašení při frekvenci 86 Hz ve vzdálenosti 65 cm	67
Tabulka 25 Hašení při frekvenci 86 Hz ve vzdálenosti 70 cm	67
Tabulka 26 Hašení při frekvenci 86 Hz ve vzdálenosti 75 cm	68
Tabulka 27 Hašení při frekvenci 87 Hz ve vzdálenosti 60 cm	69
Tabulka 28 Vliv tvaru signálu na rychlost uhašení plamene	70

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°C	Stupeň Celsia
λ	Lambda
Ar	Argon
C++	Programovací jazyk vycházející z jazyka C
cm	Centimetr
CO ₂	Oxid uhličitý
dB	Decibel
dB(A)	Decibel s váhovým filtrem A
GND	Ground
hPa	Hektopascal
Hz	Hertz
I2C	Inter-Integrated Circuit
kHz	Kilohertz
m/s	Metr za sekundu
μPa	Mikropascal
N ₂	Dusík
Pa	Pascal
PC	Personal Computer
s	Sekunda
SCL	Serial Clock Line
SDA	Serial Data Line
SDO	Serial Data Line
USB	Universal Serial Bus
V	Volt
VCC	Voltage Common Collector

SEZNAM PŘÍLOH

Elektronická příloha P I: Zdrojový kód

