

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ČESKÁ AKUSTICKÁ SPOLEČNOST

103. AKUSTICKÝ SEMINÁŘ

30. května – 1. června 2023

Jičín



Redakce sborníku:

Marek Brothánek, Radka Svobodová

Sborník 103. akustického semináře

Redakce sborníku: Ing. Marek Brothánek, Ph.D.
Mgr. Radka Svobodová

Vytištěno pro potřeby 103. akustického semináře,
konaného ve dnech 30. května – 1. června 2023 v Jičíně.

Příspěvky otištěné ve sborníku nebyly redakčně upravovány.

Copyright © České vysoké učení technické v Praze, 2023

ISBN 978-80-01-07149-6

Vydalo: České vysoké učení technické v Praze

Zpracovala: Fakulta elektrotechnická

Kontaktní adresa: Ondřej Jiříček, Technická 2, 166 27 Praha 6

 +420 22 435 2310

Náklad 200 výtisků, počet stran 36, pořadí vydání 1.

Tisk: ACAN, Družstevní 11, 252 06 Davle-Sloup

Obsah

Tomáš Hellmuth, Aleš Jirásk, David Kresl, Dana Použníková Novela Metodického návodu pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí	5
Martin Nevřela, Michal Weisz Simulating the absorption of acoustic lining for low frequencies using the poro-acoustic model	7
Jaroslav Plocek Příspěvek k měření akustického tlaku v tekutinách bez zřetelného ovlivnění měřených polí	15
Dana Potužníková, Tomáš Hellmuth, Pavel Junek, David Kresl Výstupy dlouhodobého monitoringu hluku z Dolu Turów	23
Karel Vokurka Studium frekvenčního zkreslení rázové vlny vyzářené bodovým zdrojem ve vodě	29



Novela Metodického návodu pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí

Tomáš Hellmuth, Aleš Jirásk, David Kresl, Dana Potužníková

Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě, NRL pro komunální hluk

Tvarkdova 1191, 562 01 Ústí nad Orlicí

tomas.hellmuth@zuova.cz

Abstract On December 17, 2022, an amendment of the Government Regulation No. 272/2011 Coll., on the protection of health against the adverse effects of noise and vibrations, entered into force. This amendment necessitated the amendment of the 2017 Methodological Guide for measuring and evaluating noise in the non-work environment. At the same time, it was necessary to respond to the amendments of some technical standards ČSN ISO.

Novela nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, ve znění pozdějších předpisů [1] a novelty ČSN ISO 1996-1 [2] a 2 [3] a ČSN 73 0532 [4] vyvolaly nutnost novelizace Metodického návodu pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí [5].

Oproti předchozímu vydání je tento Metodický návod (MN) koncipován tak, aby soustředil základní informace ohledně působení hluku na zdraví, jeho měření a hodnocení do jednoho praktického dokumentu. MN tak obsahuje vedle plných citací právních předpisů a technických norem i rozsáhlý komentovaný seznam pojmů používaných v rámci ochrany veřejného zdraví před hlukem.

MN není právním předpisem, tudíž není právně závazný pro osoby mimo rezort zdravotnictví. Těmto osobám se však doporučuje v případě pořizování podkladů pro rozhodování Organů ochrany veřejného zdraví (OOVZ) podle MN postupovat. Pokud budou postupovat jinak, bude OOVZ zkoumat jejich postup a výsledky z hlediska kompatibility s MN a vhodnosti použití pro ochranu veřejného zdraví před hlukem v mimopracovním (životním) prostředí. MN je již standardně citován ve svých rozhodnutích i soudy, které ho považují za správný postup.

Metodika měření a hodnocení obsažená v MN je v souladu s požadavky § 20 odst. 1 a 2 nařízení vlády č. 272/2011 Sb. [1] na přesnost a reprodukovatelnost získaných výsledků. Výsledky měření získané postupem podle MN se tak považují pro účely ochrany veřejného zdraví před hlukem za prokazatelné.

V souladu s § 20 odst. 2 nařízení vlády č. 272/2011 Sb. [1] metodický návod nevy-
lučuje použití řádně zdůvodněných přesnějších metod měření a hodnocení.

MN se nevztahuje na trvalý monitoring hluku a není určen pro účely strategického
hlukového mapování.

Způsob měření a hodnocení hluku z leteckého provozu je nadále obsažen v samo-
statném metodickém návodu.

V rámci prezentace budou představeny nejvýznamnější navrhované změny novely
Metodického návodu pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí [5].

REFERENCE

- [1] *Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vi-
brací, ve znění nařízení vlády č. 433/2022 Sb.* Sbírka zákonů ČR, 23. prosinec 2022;
částka 196.
- [2] ČSN ISO 1996-1:2017: *Akustika – Popis, měření a hodnocení hluku prostředí – Část 1:
Základní veličiny a postupy pro hodnocení.*
- [3] ČSN ISO 1996-2:2018: *Akustika – Popis, měření a hodnocení hluku prostředí – Část 2:
Určování hladin akustického tlaku.*
- [4] ČSN 73 0532:2020: *Akustika – Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických
vlastností stavebních konstrukcí a výrobků – Požadavky.*
- [5] *Metodický návod MZ ČR pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí,*
Věstník MZ ČR, částka 11/2017, ze dne 18. 10. 2017.



Simulating the absorption of acoustic lining for low frequencies using the poro-acoustic model

Martin Nevřela^a, Michal Weisz^b

^a VŠB-TU Ostrava, Centrum pokročilých inovačních technologií,
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba

^b VŠB-TU Ostrava, Katedra materiálů a technologií pro automobily,
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba

[martin.nevrela;michal.weisz]@vsb.cz

Abstract One of the most important parts for the design and implementation of semi-anechoic and anechoic chamber is the special acoustic absorption lining, which must be designed to reliably absorb acoustic waves in the frequency range under consideration. Absorption lining applied to walls and ceilings in semi-anechoic chambers and to all internal surfaces including the floor in anechoic chambers is one of the most important technological elements in terms of the acoustic properties to be achieved. A series of experiments were carried out to measure the acoustic, mechanical, and aesthetic properties of different types of lining. A new approach to the design of these tiles is mathematical modelling. Since this lining is usually made of porous material, it is advisable to choose a simulation that allows the simulation of sound propagation in these materials. This paper documents the procedure for measuring the properties of these linings and presents the mathematical model on which the properties are tested.

1 ACOUSTIC LININGS AND VERIFICATION OF THEIR PROPERTIES

The basic determining criterion for the design of the depth and technical design of the acoustic lining is the lowest frequency band in which a correct measurement of the noise inside the measuring room is required [1].

The lining depth design is based on the wavelength of the lowest measuring frequency (lower cutoff frequency) of the band. The relationship for the wavelength can be written as

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1)$$

where c ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) is the speed of sound propagation in air at 20°C , f (Hz) is the frequency of the lowest observed frequency and λ (m) is the wavelength of interest [2].

For effective dissipation of acoustic energy in the absorber lining for the relevant frequency band, it is necessary to satisfy conditions of the form:

$$\frac{H}{\lambda} \geq 0.25 \quad , \quad (2)$$

where H (m) is the depth of the absorption lining. The resulting depth of the absorber linings, depending on the lowest frequency band observed, is given in Table 1.

Center frequency of the one-third octave band, f_m (Hz)	Lower cutoff frequency of one-third octave band, f_l (Hz)	Acoustic absorption lining depth H (m)
63	57	1.50
80	71	1.20
100	88	0.97
125	113	0.75
160	141	0.60
200	225	0.48

Table 1. *Acoustic lining depth vs. frequency*

It is obvious from Table 1 that for correct measurements below 200 Hz, a large depth of acoustic lining is required, which cannot be achieved with standard flat tiles. One of the few possible solutions for an absorption lining of this depth is to construct it from wedge-shaped elements. The optimal wedge shape is the result of several compromises between knowledge of the mechanical and acoustic properties of porous materials.

Of the materials available on the market, mineral fibre boards bonded with artificial resin and supplied in various thicknesses and weights are the most suitable for absorption wedges in terms of dimensional stability and absorption effect.

The usual shape of absorber wedges is shown in Figure 1. Such shape-optimised wedges for absorbent lining are most commonly made of mineral wool with a bulk density of 50–100 kg·m⁻³. This material has proven to be the most suitable in practice for the implementation of such deep lining.

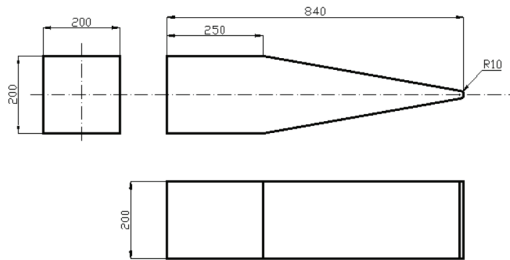


Figure 1. *The usual shape of absorption wedges*

1.1 Verification of lining properties

The verification of the expected properties of the acoustic linings is carried out according to the procedure described in EN ISO 3745 [1]. The behaviour of a anechoic or semi-anechoic chamber shall be assessed by comparing the spatial sound level decay radiated by the source under test in the chamber with the sound level decay at a distance from the source in accordance with the inverse square law states occurring in the actual free field or in the actual free field above the reflecting plane. The inverse square law states, in simplified terms, tells us that with a doubling of the distance from the noise source in the free sound field, the sound pressure level drops by 6 dB [2].

Another possibility to verify the effectiveness of the lining used is to determine its absorption or reverberation time in the individual one-third octave bands. The absorption of an absorbing acoustic lining is the basic property that produces a free sound field in a chamber. In the frequency band in which the conditions for free field formation are met, it is necessary that the absorption coefficient is very close to 1.

1.2 Measurement of lining properties in the anechoic chamber

In the anechoic chamber with a lining depth of 1.00 m and a lining depth of 0.80 m, the reverberation times were measured, and the sound absorption coefficient of the acoustic lining was determined using Eyring Equation

$$T_{60} = 0.164 \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_m)} \quad (3)$$

In equation (3), V is the volume of the chamber (m^3), S is the sum of all the areas enclosing the chamber (m^2), and α_m is the mean sound absorption coefficient (–). Since in an anechoic chamber a lining of the same absorption is installed on all

Frequency f_m (Hz)	Acoustic lining depth			
	$H = 0.80$ m	$H = 1.00$ m	$H = 0.80$ m	$H = 1.00$ m
	Reverberation time T_{60} (s)		Sound absorption coeff. α (–)	
63	0.061	0.059	0.950	0.955
125	0.054	0.038	0.966	0.992
250	0.039	0.031	0.991	0.997
500	0.022	0.020	~1.000	~1.000
1000	0.009	0.008	~1.000	~1.000
2000	0.006	0.006	~1.000	~1.000
4000	0.005	0.005	~1.000	~1.000
8000	0.003	0.003	~1.000	~1.000

Table 2. Reverberation times and sound absorption coefficients for octave bands

surfaces, the mean sound absorption coefficient for this case is directly equal to the sound absorption coefficient of the acoustic lining. Table 2 shows the observed reverberation times for each depth of acoustic lining and the sound absorption coefficients of these linings for each octave band, which will be compared with the simulation.

2 SIMULATION OF THE ABSORPTION OF ACOUSTIC LININGS IN COMSOL

In the COMSOL there is a Poroacoustics model for solving similar problems. It defines a domain with a porous material simulated in a homogenized way using the equivalent fluid model. Several poro-acoustic models can be selected to describe the behaviour of sound waves in porous material. The models available are Delany-Bazley-Miki, Zwikker-Kosten, Attenborough, Wilson, Johnson-Champoux-Allard, Johnson-Champoux-Allard-Lafarge, Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge, Williams EDFM and Wood. All of these models are empirical, based on evaluated measurements. More details about each model are given in [5].

The Delany-Bazley-Miki model, which is designed for mineral wool with high porosity, proved to be the most suitable for this simulation. In this model, the environment is defined by the flow resistance ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) and the constants C_1 to C_8 , which are already assigned to the model.

Air resistance describes how much the vibration rate of air decreases as it passes through a material. Information on the acquisition and meaning of this parameter can be found in the literature. For the material used in the linings tested, a value for the airflow resistance of 42 000 to 50 000 $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ can be found in the manufacturers technical data sheets.

A 2D geometric model was created in COMSOL and prepared so that the necessary analyses could be applied to it (Figure 2). In the Pressure Acoustics domain, an acoustic wave with wave vector k is generated, incident on an acoustic lining (Poroacoustics domain) of depth H at a variable angle θ . The geometric model is prepared parametrically so that the lining depth H can be varied.

At the top of the model is the PML (perfectly matched layer) domain, which is added to the acoustic model to simulate

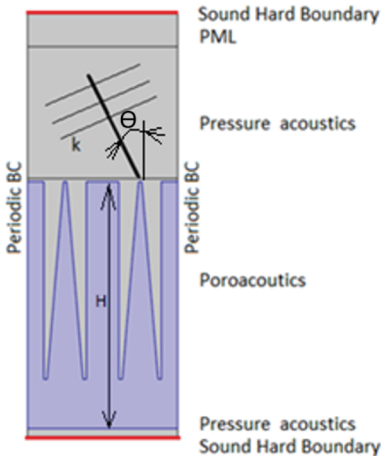


Figure 2. Model for simulation

an open infinite space where there are no reflections – it is a perfectly absorbing space. PML works with all types of waves, not just plane waves, and works for all angles of incidence.

The finite element model is shown in Figure 3. The model contains 3500–6800 quad elements and 1250–2820 triangles, depending on the depth of the lining.

The analysis in the frequency domain was realized in the central frequencies of the one-third octave bands from 10 Hz to 500 Hz. The geometric model was created as parametric, and the analysis can be performed for each lining depth.

The analysis was performed for lining depths of 0.5 m to 1.5 m with 0.1 m increments. The angle of incidence Θ can also be varied parametrically and simulations were performed for angles of 90°, 60°, 45°, 30° and 0°. The flow resistance to material was 50 000 Pa·s·m⁻² in the analyses.

The result of the analyses is the sound pressure and sound pressure level at the cross-section of the acoustic lining for different depths of the lining and different angles of incidence of the sound wave. The values for a cladding depth of 1.0 m, angles of incidence of 0° and 45° and frequencies of 50 to 500 Hz with a frequency step of 10 Hz were selected as reference values for which the results are shown in Figures 4 to 6.

Graph 1 shows the frequency dependence of the sound absorption coefficient from the simulations for lining depths from 0.5 to 1.5 m and the angle of incidence $\Theta = 0^\circ$, the values for the individual lining depths can be compared with the measured data (Table 3).

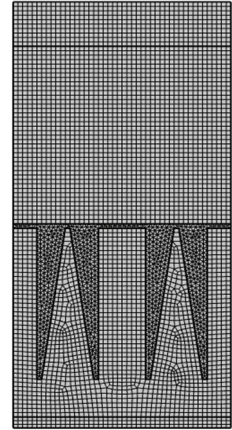


Figure 3.
Finite element model

Frequency f_m (Hz)	$H = 0.80$ m	$H = 1.00$ m	$H = 0.80$ m	$H = 1.00$ m	$H = 0.80$ m	$H = 1.00$ m
	Sound absorption coefficient α (–) from measurements		Sound absorption coefficient α (–) from simulation		Percentage difference (%)	
63	0.950	0.955	0.869	0.958	8.53	–0.31
125	0.966	0.992	0.989	0.996	–2.38	2.62
250	0.991	0.997	~1.000	~1.000	–0.91	–0.30
500	~1.000	~1.000	~1.000	~1.000	0.00	0.00

Table 3. *Comparison of measurement and simulation data*

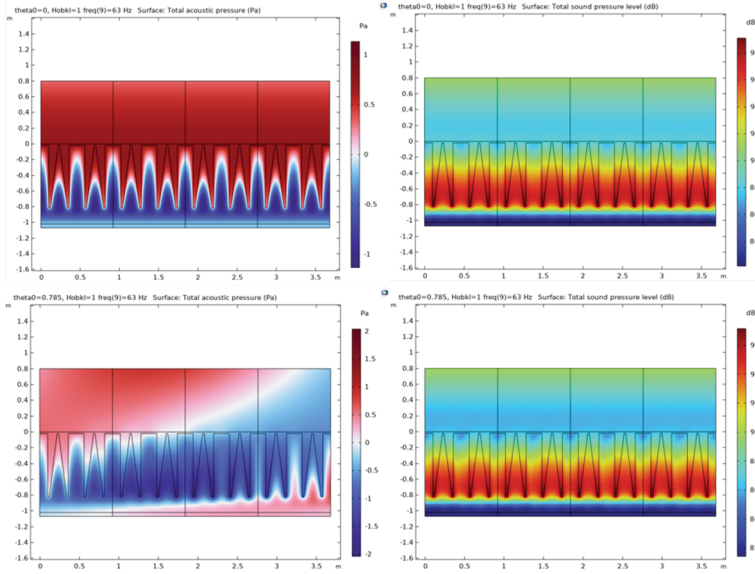


Figure 4. Acoustic pressure and sound pressure level for 63 Hz, $H = 1.0$ m, $\Theta = 0^\circ$ and 45°

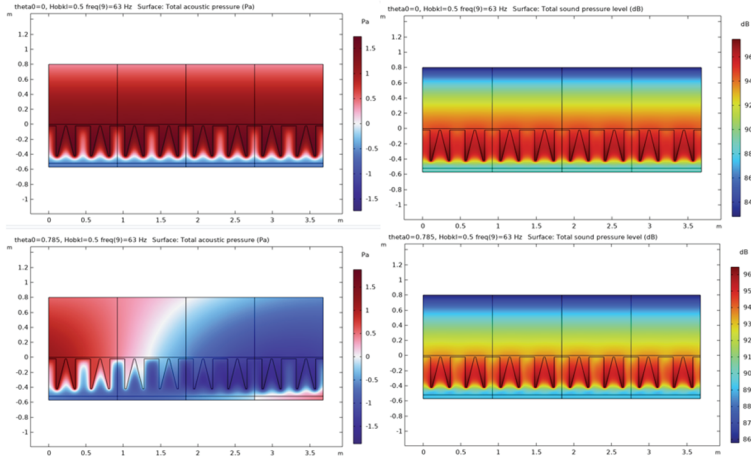


Figure 5. Acoustic pressure and sound pressure level for 63 Hz, $H = 0.5$ m, $\Theta = 0^\circ$ and 45°

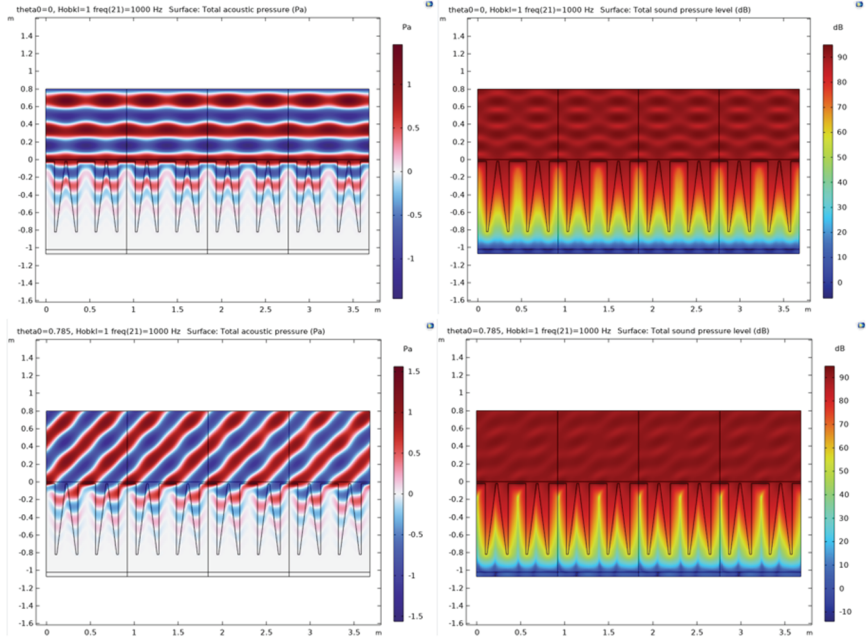
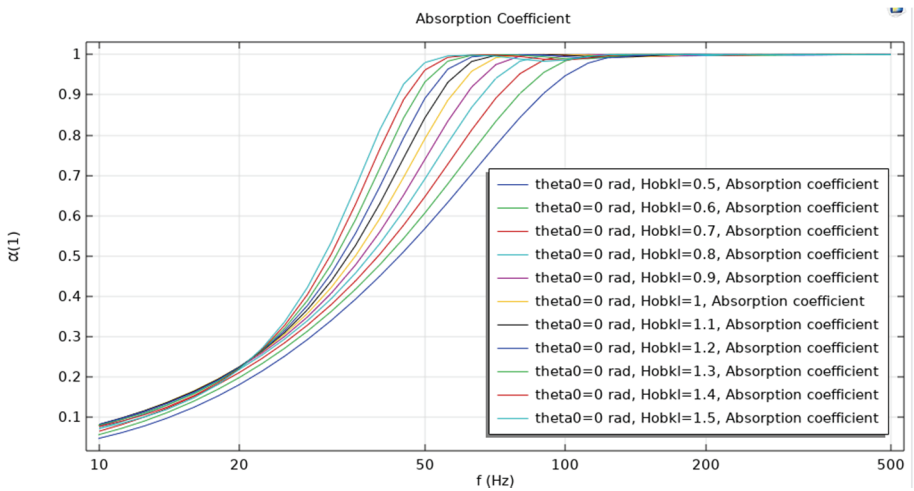


Figure 6. Acoustic pressure and sound pressure level for 500 Hz, $H = 1.0$ m, $\Theta = 0^\circ$ and 45°



Graph 1. The frequency dependence of the sound absorption coefficient for lining depths from 0.5 to 1.5 m and incident angle $\Theta = 0^\circ$ from COMSOL simulation

3 CONCLUSIONS

The design of deep acoustic linings for low frequencies is based on experience with their use and usually a proven design and material is chosen. In the event of changes in design or changes in lining material, it is difficult to predict the acoustic properties of the proposed lining. Modern calculation methods make it possible to perform numerical simulations using the finite element method, which can be used to partly predict the expected properties of these linings. These simulations are particularly sensitive to the choice of the type of poro-acoustic model used and the individual material constants, which are usually unknown for the mineral wool type materials used. Therefore, it is beneficial for practice to verify these models for multiple shapes and material types to simplify the procedure of further simulations. By the choice of appropriate material constants, it is possible to approach the measurement-verified parameters of the linings with enough accuracy.

REFERENCES

- [1] ČSN EN ISO 3745: *Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Přesné metody pro bezodrazové a polo-bezodrazové místnosti*, 09/2012, Praha: Evropský výbor pro normalizaci, 2012.
- [2] Crocker, M. J. (ed.): *Handbook of noise and vibration control*, John Wiley & Sons, 2007, ISBN 9780471395997.
- [3] Smetana, C.: *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*, 1. vydání, Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [4] Nový, R.: *Hluk a chvění*, 4. přepracované vydání. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2019, ISBN 9788001065549.
- [5] COMSOL Multiphysics Reference Manual, Burlington, USA, 2019, [vid. 28. 4. 2023], Dostupné také z: https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf



Příspěvek k měření akustického tlaku v tekutinách bez zřetelného ovlivnění měřených polí

Jaroslav Plocek

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická,

Technická 2, 166 27 Praha 6

plocek@fel.cvut.cz

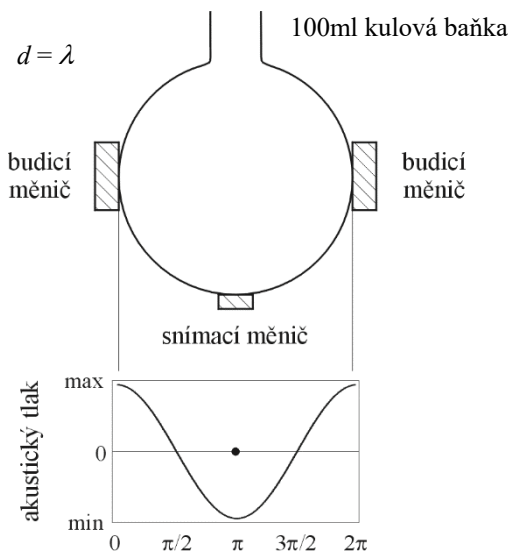
Abstract The possibilities of measuring sound pressure in liquids without obvious influence of the measured fields are discussed. A new type of sensor is presented that allows point measurements, practically does not affect the measured acoustic fields and at the same time allows to easily distinguish useful signals from background disturbances.

1 ÚVOD

Při detailním mapování akustických polí v kapalinách nebo plynech se zvláště v oblasti vyšších kmitočtů setkáváme s vlivem konečného rozměru použitého snímače na měřené pole. Obzvláště významně se tento vliv projevuje v systémech s výraznou rezonancí, jejíž parametry nemají být měřením narušeny.

Konkrétním příkladem může být experimentální uspořádání pro výzkum jednobublínkové kavitace, kde je kapalina v kulové baňce přivedena vnějším buzením do rezonance s maximem akustického tlaku ve středu baňky, obvykle při frekvenci okolo 28 kHz (obr. 1.).

V tomto a v obdobných případech je pro vlastní studium kavitující bublinky důležité zjistit hodnotu akustického tlaku v maximu, popř. i jeho průběh podle průměru baňky. Akustické pole je však na zavedení snímače do centra baňky velmi citlivé – činitel jakosti rezonátoru nabývá hodnot ca 400–800 a na objekty o průměru větším než ca 1,5 mm reaguje výrazným poklesem. Navíc je (v tomto případě) prostor uvnitř baňky silně zasažen střídavým elektrickým polem z budicího signálu měničů (stovky V), jehož indukce do systému snímače může měření silně ovlivnit nebo i zcela znemožnit.



Obrázek 1. *Uspořádání experimentu pro jednobublinkovou kavitaci*

2 VHODNÉ SNÍMAČE

Jako potenciálně vhodné snímače se pro podobná měření až dosud nabízejí:

– jehlový snímač s PVDF folií [1, 2]

Tento snímač využívá piezoelektrických vlastností termoplastického fluoropolymeru polyvinylidenfluorid. PVDF folie je opatřena na obou stranách vodivými elektrodami a je umístěna na konci tenké kovové trubičky. Jeden z přívodů tvoří tělo trubičky, druhý přívod vodič vedený dutinou trubičky. Konec trubičky s folií je opatřen uzavírací kontaktní a stínicí vrstvou. Deformace PVDF folie akustickým tlakem vyvolává na elektrodách elektrický signál, který je úměrný časovému průběhu a velikosti deformace. Vzhledem k malé kapacitě, vysoké impedanci a malé citlivosti snímače musí být bezprostředně za spojovacím kabelem použit zesilovač. Nejmenší realizovatelné snímače tohoto typu mají průměr 0,5 mm s tloušťkou folie 9 μm a jsou použitelné v kmitočtovém pásmu ca 1–100 MHz.

Pro aplikace v kmitočtové oblasti jednotek až desítek kHz však nejsou vhodné především pro nízkou citlivost a silnou nevyváženost kmitočtové charakteristiky [3]. Vysoká impedance zdroje signálu daná malou kapacitou snímacího prvku pak způsobuje vyšší náchylnost k elektromagnetickému rušení. Polarizace podmiňující

funkci snímače je vlastností PVDF folie. Nelze ji tedy vypnout k odlišení užitečného signálu od vnějšího rušení.

– **piezoelektrické snímače s tenkovrstvou polykrystalickou keramikou [4]**

U tohoto typu snímačů je na kovový substrát, například na titanový drátek o průměru 0,6 mm, speciálním postupem čelně nanесena vrstva piezokeramického materiálu a ta je opatřena další vodivou elektrodou. Drátek s piezokeramickou vrstvou je spojen s vnitřním vodičem přívodního koaxiálního kabelu. Po stranách je opatřena nejprve izolační vrstvou a dále pak uzavírací kontaktní a stínicí vrstvou, která je spojena s opláštěním přívodního koaxiálního kabelu. Deformace piezoelektrické vrstvy akustickým tlakem vyvolává na jejích elektrodách elektrický signál, úměrný časovému průběhu a velikosti deformace. Takto vzniklý miniaturní snímač lze využívat v širokém kmitočtovém pásmu od jednotek do sta MHz.

Pro aplikace v kmitočtové oblasti jednotek až desítek kHz mají tyto snímače stejné nevýhody jako snímače s PVDF folií.

– **optoelektrický snímač se světlovodným vláknem – reflexní [5]**

Využívá skleněného optického vlákna ponořeného jedním koncem do kapaliny, v níž je snímán akustický tlak. Do vlákna je zavedeno světlo vhodné vlnové délky. Množství světla odraženého od konce vlákna závisí na indexu lomu kapaliny. Index lomu je závislý na hustotě kapaliny, která je ovlivněna akustickým tlakem. Odražené světlo je na druhém konci vlákna převedeno na elektrický signál, úměrný akustickému tlaku. Reflexní snímače bývají dále zdokonalovány vrstvami různých materiálů na snímacím konci vlákna, sloužícími ke zvýšení odrazu světla a jeho závislosti na akustickém tlaku. Výhodou tohoto snímače je necitlivost vůči elektromagnetickému rušení. Jeho nevýhodou je velmi nízká citlivost, použitelnost pouze v kapalinách a extrémní technická a finanční náročnost.

– **optoelektrický snímač se světlovodným vláknem – Fabry-Perotův [6]**

Zde je na čele vlákna nanесením další opticky propustné vrstvy zakončené zrcadlovou plochou vytvořena interferometrická komůrka. Deformace, zde změna délky této komůrky způsobená akustickým tlakem, vyvolává fázové změny koherentní světelné vlny, vracějící se zpět vláknem po průchodu komůrkou. Tyto fázové změny jsou v připojeném optoelektrickém zařízení převedeny na elektrický signál. Výhodou je výrazně vyšší citlivost ve srovnání s reflexním snímačem i schopnost práce s nižšími kmitočty v řádu desítek kHz a stejně jako u reflexního snímače necitlivost vůči elektromagnetickému rušení. Nevýhodou pak je nižší citlivost, použitelnost pouze v kapalinách a rovněž tak – jako u reflexního typu – extrémní technická a finanční náročnost.

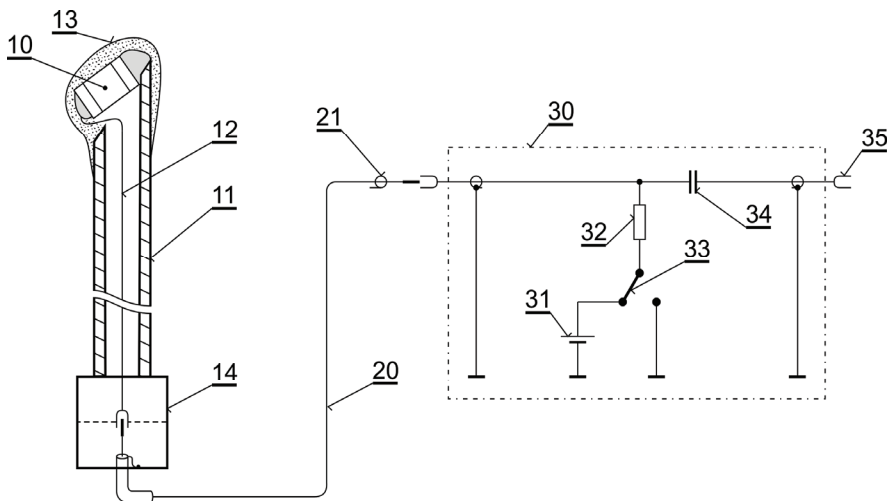
3 NOVÝ TYP SNÍMAČE PODLE NAŠEHO NÁVRHU

Z uvedeného přehledu je zřejmé, že prakticky není k dispozici jednoduchý a finančně nenáročný snímač vyhovující potřebám těchto měření. Navrhli a realizovali jsme proto nový snímač, jehož popis a některé vlastnosti jsou uvedeny dále.

Náš snímač sice využívá osvědčeného kapacitního principu, avšak realizuje ho pomocí mnohovrstvého keramického SMD kondenzátoru o kapacitě v řádu jednotek mikrofaradů. Akustický tlak v prostředí, v němž se snímač nachází (tedy v kapalném či plynném prostředí), vyvolává časově proměnné deformace mnohovrstvého keramického SMD kondenzátoru, které ovlivňují jeho kapacitu. Při přiloženém polarizačním napětí pak na tomto kondenzátoru vzniká střídavé napětí, které je úměrné jeho deformaci, a tedy i časovému průběhu akustického tlaku. Vypnutím polarizačního napětí lze odlišit užitečný signál od rušivého pozadí.

3.1 Detailní popis realizovaného snímače a souvisejících obvodů

Miniaturní snímač akustického tlaku v kapalinách a plynech, uvedený na obr. 2. se skládá z mnohovrstvého keramického SMD kondenzátoru 10 (velikost 0402, kapacita 2,2 μF , napětí 35 V), umístěného na špičce kovové duté jehly 11 (vnější průměr 0,45 mm, délka 80 nebo 160 mm). Jeden přívod SMD kondenzátoru je vodičve spojení s jehlou, druhý přívod SMD kondenzátoru je připojen k připojovacímu vodiči 12, který prochází dutinou jehly. Špička jehly s SMD kondenzátorem a připojovacím vodičem je pokryta tenkou nepropustnou elektroizolační vrstvou 13. Tato vrstva musí být co nejtenčí, aby nebránila průchodu akustických vln a zároveň aby dokázala



Obrázek 2. Uspořádání snímače a připojovacího adaptéru

spolehlivě elektricky izolovat SMD kondenzátor od kapaliny, v níž bude snímač případně použit. Druhý konec jehly a připojovací vodič jsou připojeny k tenkému propojovacímu koaxiálnímu kabelu (20), kterým se odvádí užitečný signál k dalšímu zpracování a přivádí potřebné polarizační napětí. Propojovací koaxiální kabel je pomocí dalšího konektoru 21 připojen k elektricky stíněnému adaptéru 30, obsahujícímu miniaturní baterii 31 sloužící jako zdroj polarizačního napětí 35 V, oddělovací rezistor 32, přepínač polarizačního napětí 33 a výstupní oddělovací kondenzátor 34. Adaptér je vybaven výstupním BNC konektorem 35, umožňujícím připojení k následnému zařízení, které je voleno podle aplikace snímače. K dalšímu zpracování lze využít měřicí či zobrazovací zařízení, jako je AC (případně selektivní) voltmetr, osciloskop, převodník s počítačem a záznamovým či vyhodnocovacím zařízením a podobně.

Zdroj polarizačního napětí musí být uzavřen ve stíněném adaptéru, neboť jakékoliv připojení externího zdroje způsobuje pronikání rušivých signálů do systému. Jeho rozměry musí být co nejmenší, aby se omezila i indukce z magnetických polí, tedy aby i uzavřená smyčka obsahující zdroj polarizačního napětí byla co nejmenší. Stávající snímač má například v oblasti 20–30 kHz citlivost cca 35 nV/Pa, takže zpracovávané signály leží v oblasti mikrovoltů až jednotek milivoltů a je tedy třeba udržet přiměřený odstup signál/šum + rušení. Velikost polarizačního napětí baterie je shora omezena povoleným napětím použitelného SMD kondenzátoru na 35 V. Řešením je sada miniaturních lithiových článků.

Přepínač polarizačního napětí miniaturní baterie umožňuje deaktivaci snímače a společně s tím i odlišení rušivých signálů od užitečného signálu vyvolaného akustickým tlakem.

3.2 Některé vlastnosti realizovaného snímače

Základní parametry, potřebné pro měření v aplikacích, jakými jsou kmitočtová závislost absolutní citlivosti snímače a jeho směrové vlastnosti, byly získány kalibrací ve vodní nádrži „Institute of Marine Engineering CNR-INM“ v Římě.

Kmitočtová závislost citlivosti je uvedena na obr. 3, směrové charakteristiky pro frekvenci 27,3 kHz, v jejímž okolí rezonuje obvykle voda v kulové 100ml baňce, jsou zobrazeny na obr. 4.

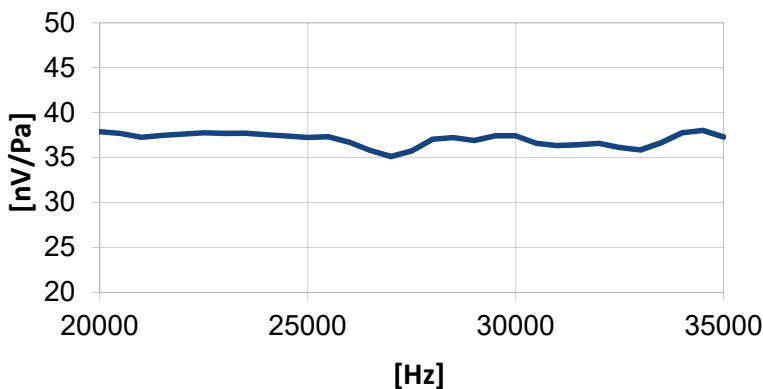
4 MĚŘENÍ PROVEDENÁ SE SNÍMAČEM

S kalibrovaným snímačem jsme dále provedli následující měření v klasickém SBC experimentu s kulovou baňkou (viz např. [7]).

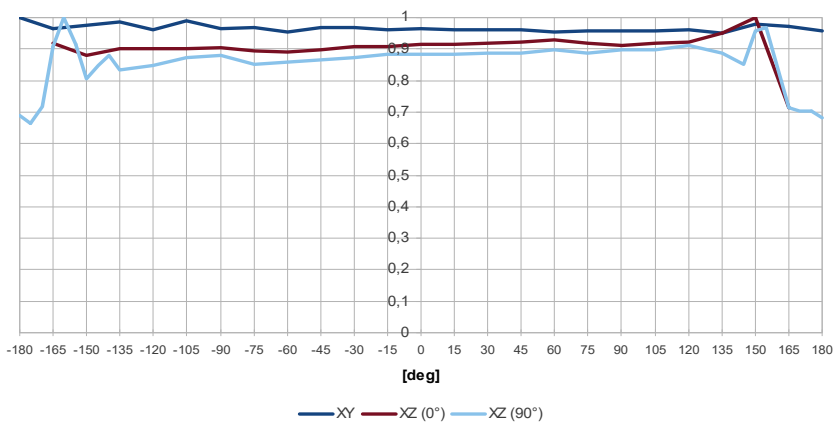
4.1 Zhodnocení vlivu zavedení snímače do baňky na budící pole v baňce

Činitel jakosti baňky jako rezonátoru $Q = 402$, naměřený pomocí vnějšího snímače přilepeného trvale na baňce, nebyl zavedením našeho snímače v žádné poloze v baňce

měřitelně ovlivněn. Tento výsledek umožňuje považovat výsledky následujících měření s tímto snímačem za neovlivněné stavy měřených polí.



Obrázek 3. Kmitočtová závislost absolutní citlivosti snímače

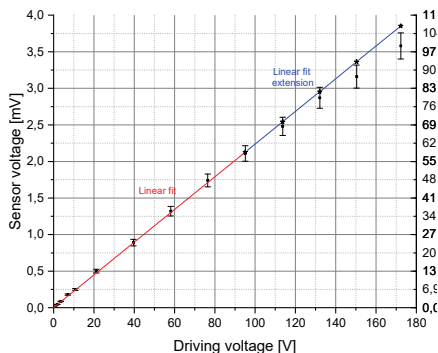


Obrázek 4. Směrové charakteristiky snímače na frekvenci 27,3 kHz.

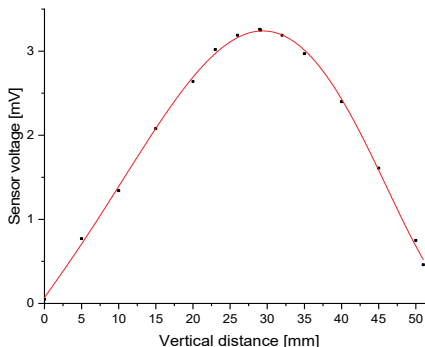
Poznámka: Rovina XY je kolmá k jehle (ose) snímače Z, úhel 0° je určen značkou na těle snímače. Roviny XZ jsou určeny osou Z a značkou pro 0° nebo pootočením o 90°

4.2 Měření linearity snímače (pro jedinou frekvenci 27 440 Hz v rozsahu akustických tlaků ca 100 Pa – 110 kPa)

Do hodnoty akustického tlaku 55 kPa nebyla v rámci 5% nejistoty měření zjištěna odchylka od lineárního průběhu. V rozsahu 55–107 kPa pak docházelo k postupnému „nasyčování“ snímače (viz obr. 5), takže odchylka od linearitý dosahovala při 107 kPa ca 7 kPa (tedy ca 6,5 %).



Obrázek 5. Závislost výstupního napětí snímače na akustickém tlaku v rozsahu 0–107 kPa



Obrázek 6. Průběh budicího tlaku podél svislé osy baňky

4.3 Ověření průběhu budicího tlaku po celém průměru podél svislé osy baňky

Měření uvádíme jako demonstraci možností našeho snímače. Samotný výsledek, uvedený na obr. 6, odpovídá teoretickým předpokladům.

4.4 Ověření hodnot budicího akustického tlaku potřebného pro vznik a udržení SBC ve vodě za normálních podmínek

Po dosažení horní hranice akustického tlaku pro stabilní kavitující bublinku ve středu baňky (při frekvenci 27 440 Hz) byl snímač zaveden na místo bublinky. Při citlivosti snímače 36,0 nV/Pa, pro uvedenou frekvenci, změřené s nejistotou 7 %, vychází po korekci nelinearity příslušná hodnota budicího akustického tlaku ($108,3 \pm 7,6$) kPa.

Pro srovnání uvádíme v následující tabulce hodnoty změřené dalšími autory jinými metodami. Detailní odkazy na literaturu nelze vzhledem k omezenému rozsahu této práce uvést.

Autor	Gaitan et al.	Wang et al.	Cheng et al.	Simon et al.	Zeiger	Lu-Mei-Jun et al.	Margulius
<i>p</i> (kPa)	111,5	116,5	125,6	131,7	121,6	116,5	101,3

Tabulka 1. *Hodnoty akustického tlaku pro dosažení stabilní kavitující bublinky podle různých autorů (srovnáváme s námi naměřenou hodnotou ($108,3 \pm 7,6$) kPa*

Ve srovnání s některými uvedenými autory vykazují naše hodnoty mírnou zápornou systematickou odchylku. Přestože konkrétní fyzikální experiment, na němž byly možnosti našeho snímače ověřovány, není těžištěm této práce, jsou tyto rozdíly předmětem dalšího výzkumu.

5 ZÁVĚR

Byl vyvinut nový miniaturní snímač akustického tlaku pro kapalná a plynná prostředí. Jeho vlastnosti umožňují bodová měření prakticky neovlivňující měřené akustické pole a umožňují zároveň snadno odlišit užitečné signály od rušivého pozadí. Snímač je patentován v ČR pod číslem PV 2019-84 [8].

REFERENCE

- [1] DeReggi, A. S., Roth, S. C., Kenney, J. M., Edelman, S., Harris, G. R.: Piezoelectric polymer probe for ultrasonic applications, *J. Acoust. Soc. Am.*, Volume 69, Issue 3, 1981, 853–859, <https://doi.org/10.1121/1.385541>
- [2] Lewin, P. A., Schafer, M., Gilmore, J. M.: Miniature piezoelectric polymer ultrasonic hydrophone probes, *Ultrasonics*, Volume 19, Issue 5, 1981, 213–216, [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(81\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0041-624X(81)90005-6)
- [3] Robinson, S. P.: Hydrophones, In: Preston, R. C. (eds) *Output Measurements for Medical Ultrasound*, Springer, London, 1991, 57–73, https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1883-1_5
- [4] Kitsunai, H., Kawashima, N., Takeuchi, S., Ishikawa, M., Kurosawa, M., Odaira, E.: Development of miniature needle-type hydrophone with lead zirconate titanate polycrystalline film deposited by hydrothermal method. *Japanese journal of applied physics*, Volume 45, Number 5S, 2006, 4688–4692, <https://doi.org/10.1143/JJAP.45.4688>
- [5] Staudenraus, J., Eisenmenger, W.: Fibre-optic probe hydrophone for ultrasonic and shock-wave measurements in water, *Ultrasonics*, Volume 31, Issue 4, 1993, 267–273, [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(93\)90020-Z](https://doi.org/10.1016/0041-624X(93)90020-Z)
- [6] Morris, P., Hurrell, A., Shaw, A., Zhang, E., Beard, P.: The Fabry–Pérot fiber-optic hydrophone, *J. Acoust. Soc. Am.*, Volume 125, Issue 6, 2009, <https://doi.org/10.1121/1.3117437>
- [7] Plocek, J.: A method for indication and improving the position stability of the bubble in single-bubble cavitation experiments, *Review of Scientific Instruments*, Volume 88, Issue 10, 104901, 2017, <https://doi.org/10.1063/1.5006100>
- [8] Czech Technical University in Prague: Miniature sound pressure sensor in liquids and gases, CZ patent PV 2019-84, 19. Feb. 2020.



Výstupy dlouhodobého monitoringu hluku z Dolu Turów

Dana Potužníková, Tomáš Hellmuth, Pavel Junek, David Kresl

Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě, NRL pro komunální hluk
Tvardkova 1191, 562 01 Ústí nad Orlicí

dana.potuznikova@zuova.cz

Abstract The aim of noise monitoring from the mine KWB Turów (Poland) is to determine the ongoing exposure of protected residential buildings in the Czech Republic to noise from the operation of the mine's equipment. Monitoring in 2022 was a continuation of the project started in 2020. The purpose was to assess possible changes (increase) in the noise situation as a result of expanding mining until 2044 and bringing the mining area closer to the Czech state border. The most affected protected built up are in the territory of the Czech Republic are two parts of the municipality Hrádek nad Nisou – Oldřichov na Hranicích and Uhelná.

1 ÚVOD

Hluk působený technologií Dolu Turów je prakticky nepřetržitý a má proměnný charakter. Vzhledem ke změnám provozu a polohy jednotlivých těžebních zařízení v dole i změnám meteorologických podmínek během roku byl dlouhodobý monitoring v roce 2022 rozvržen do 5 vzorkovacích týdenních kol, rozložených přibližně rovnoměrně v průběhu kalendářního roku, tak jako v roce 2021. Vzhledem k tomu, že prakticky nepřetržitý hluk z Dolu Turów představuje v monitorovaném území v podstatě zbytkový hluk, který kvůli rušení jinými zdroji není v daném prostoru v denní době spolehlivě identifikovatelný, bylo měření realizováno pouze v noční době. V noční době dochází k nejmenšímu rušení akustického signálu a zároveň dochází k možnému nejvýraznějšímu negativnímu působení na exponované obyvatele, tj. k možnému rušení spánku. Součástí měření hluku bylo i měření relevantních meteorologických parametrů. Hodnocen byl jak celý časový interval měření, tj. včetně veškerého rušení, tak vybrané „Bloky“, tj. časové intervaly měření s nejmenším, i když nenulovým, rušením zdroji hluku pozadí. V obou případech byly vyhodnocovány akustické veličiny ekvivalentní hladiny akustického tlaku A , $L_{Aeq,T}$, a procentní hladiny L_{A10} , L_{A90} , L_{A99} .

Ve vybraných Blocích byla vyhodnocena také hladina $L_{Aeq,1h}$ a $L_{A90avg,1h}$ pro nejhlušnější hodinu.

Předmětem příspěvku je představení některých dosažených výsledků.

1.1 Zdroje hluku

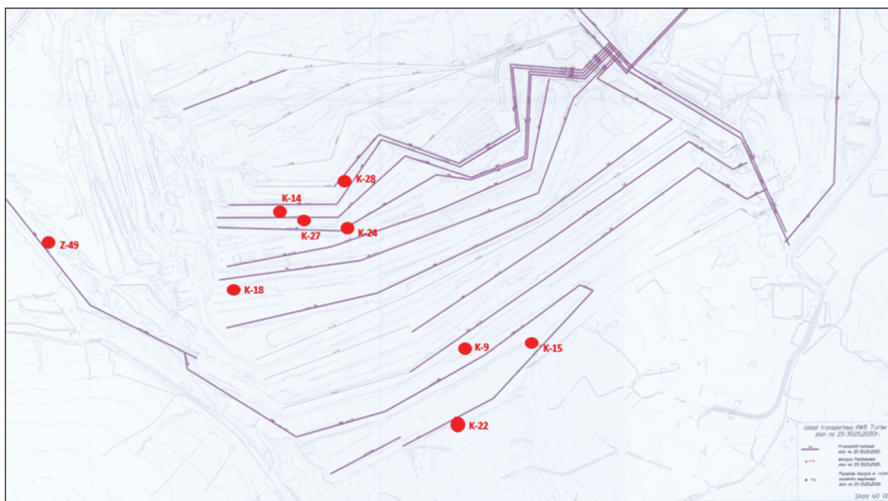
Zpráva EIA „Kontynuacja eksploatacji zloza węgla brunatnego Turów, Raport o oddziaływaniu na środowisku“ z roku 2018 uvádí jako hlavní zdroje hluku technologie Dolu Turów těžební zařízení, kterými jsou kolesová rypadla a zakladače. Zdrojem hluku jsou i pásové dopravníky, jejichž celková délka činí cca 90 km. Rypadla i zakladače jsou umístěny na 13 zahlučených patrech Dolu Turów, a to až do hloubky cca 300 m, a v různé vzdálenosti od posuzované obytné zástavby v ČR. Jedná se o rozměrná zařízení dosahující výšky až 30 m (zakladače až 50 m), délky 150 až 200 m a šířky až 35 m. Podle informací polské strany byla v roce 2022 provozována těžební zařízení uvedená v tab. 1.

Označení zařízení	Název zařízení	Typ zařízení	L_{WA} (dB)
K-9	Kolesové rypadlo	KWK-1500 S	116
K-11	Kolesové rypadlo	KWK-1500 S	116
K-14	Kolesové rypadlo	KWK-1200 M	122
K-15	Kolesové rypadlo	KWK-1500 S	116
K-17	Kolesové rypadlo	KWK 910	119
K-18	Kolesové rypadlo	KWK-1500.1	116
K-20	Korečkové rypadlo	KWL-800	120
K-22	Kolesové rypadlo	SchRs	125
K-24	Kolesové rypadlo	SchRs 1200	118
K-26	Kolesové rypadlo	KWK-1200 M	122
K-27	Kolesové rypadlo	KWK-1200 M	122
K-28	Kolesové rypadlo	KWK-1200 M	122
Z-45	Zakladač	ARsP	118
Z-46	Zakladač	ZGOT-6300	121
Z-48	Zakladač	ZGOT-11 500	120
Z-49	Zakladač	?	?
Z-6	Zakladač	ZSOT-4500	112

Tabulka 1. Přehled těžebních zařízení – hlavní zdroje hluku

Pro každé kolo monitoringu dodává zpětně provozovatel Dolu Turów seznam hlavních zdrojů hluku, které byly v době měření v provozu, a také jejich zakres do mapy. Příklad umístění zdrojů hluku pro jedno z kol měření je na obr. 1.

Hluk z Dolu Turów se v daném území subjektivně projevuje jako dlouhodobý dominantní zdroj hluku, sluchově snadno identifikovatelný jak svojí hlasitostí, tak směrem, ze kterého přichází.



Obrázek 1. Mapa s vyznačením umístění zdrojů hluku

2 MĚŘENÍ HLUKU V TERÉNU

2.1 Výběr míst měření

Místa měření (MM) byla zvolena na okraji zástavby obou obcí nejbližších k Dolu Turów tak, aby reprezentovala hlavní směr šíření zvuku z dolu a zároveň se co nejvíce omezilo rušení měření zdroji hluku v jejich nejbližším okolí. Technické místo na polské straně bylo zvoleno na základě konzultace s polskou stranou v těsné blízkosti polského trvalého monitorovacího terminálu, který je v provozu od března 2023.

MO – Oldřichov na Hranicích, zahrada rodinného domu. Nejbližší objekt je hospodářské stavení (25 m od MO), Důl Turów se nachází severním až severovýchodním směrem, nejbližší vzdálenost je 1,8 km.

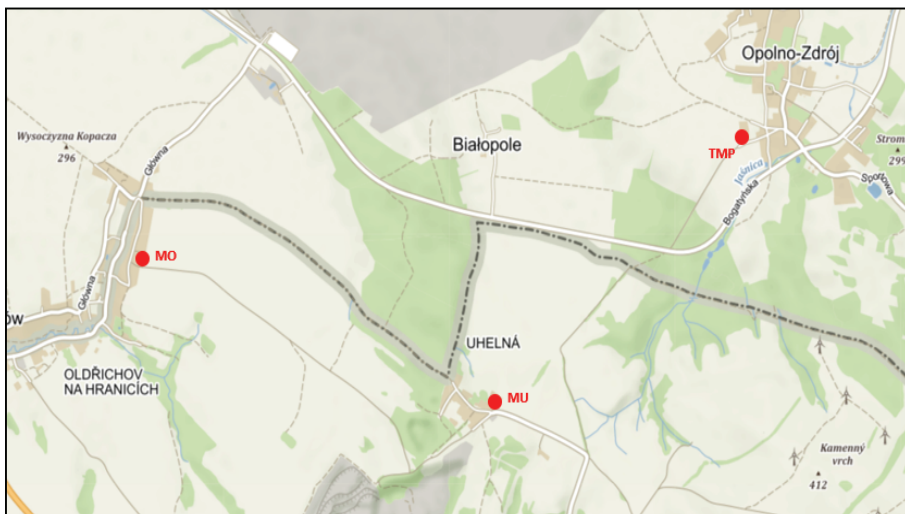
Mikrofon upevněn na stativu ve volném poli, 3,0 m nad úrovní terénu, nasměrován svisle vzhůru, opatřen krytem proti větru a se zvukoměrem propojen mikrofonním kabelem.

MU – Uhelná, zahrada rodinného domu. Vzdálenost od severní hrany obytné budovy č. p. 4 je 25 m, Důl Turów se nachází severozápadním až severovýchodním směrem, nejbližší vzdálenost je 2 km.

TMP (technické místo měření) – Opolno-Zdrój (Polsko), rodinný dům v ulici Koscielna. Nejbližší objekt je RD 25 m od TMP, Důl Turów se nachází severozápadním směrem, nejbližší vzdálenost je cca 1,3 km.

Mikrofon upevněn na stativu ve volném poli, 4,0 m nad úrovní terénu, nasměrován svisle vzhůru, opatřen krytem proti větru a se zvukoměrem propojen mikrofonním kabelem.

Umístění míst měření vzhledem ke zdroji hluku je patrné z obr. 2.



Obrázek 2. Mapa s vyznačením jihovýchodní hranice dolu, poloha míst TMP, MO a MU

2.2 Vlastní měření

Dlouhodobý monitoring je realizován od roku 2020, kdy bylo měření provedeno ve 4 vzorkovacích týdenních kolech. Od roku 2021 je již rozvržen do 5 vzorkovacích týdenních kol, rozložených přibližně rovnoměrně v průběhu kalendářního roku. Data jsou tak srovnatelná i z hlediska ročního období. Měření realizováno pouze v noční době od 22:00 do 6:00 hod.

2.3 Vyhodnocení měření

Zvukoměrem zaznamenané a v paměti přístroje uložené hodnoty akustických veličin byly zpracovány a následně vyhodnoceny v rámci postprocesingu programem Svan PC++ fy Svantek (Polsko), s environmentálním akustickým modulem, verze 3.3.40.

Zvolené akustické veličiny byly vyhodnocovány jednak pro celou dobu měření 22:00 až 6:00 hod, tedy včetně veškerého rušení, a jednak pro časové intervaly s nejmenším rušením akustického signálu („Bloky“), tj. s minimálním, avšak nenulovým rušením. Hladina L_{A90avg} zbytkového hluku v těchto Blocích může být považována za dolní odhad ekvivalentní hladiny akustického tlaku A, $L_{Aeq,T}$ z Dolu Turów.

Jako hlavní kritérium hodnocení byla zvolena veličina $L_{Aeq,1h}$, jejíž hygienický limit je upraven nařízením vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku, ve znění pozdějších předpisů (dále i nařízení vlády) [1].

2.4 Výsledky

Dlouhodobé hodnoty sledovaných veličin, jak v jednotlivých kolech, tak za celou dobu monitoringu, byly stanoveny jako průměrné časově vážené hodnoty.

Rok	Místa měření – Bloky					
	MO			MU		
	T	$L_{Aeq,T}$	L_{A90avg}	T	$L_{Aeq,T}$	L_{A90avg}
	(h)	(dB)	(dB)	(h)	(dB)	(dB)
2022	222	35,3	33,8	210	36,5	34,6
2021	200	35,4	33,6	175	36,0	34,5
2020	148	37,4	35,3	144	37,7	36,1

Tabulka 2. Meziroční srovnání dlouhodobé hlukové zátěže (nezohledněna nejistota $\pm 1,8$ dB)

3 ZÁVĚR

Celková hluková situace bez ohledu na rozptyl hodnot v jednotlivých dnech měření se na obou MM během roku výrazně nemění. Znamená to, že četnost vzorkování a jeho rozložení v čase (kola monitoringu) byly zvoleny správně tak, aby byly pokryty jak průběžné změny v provozu zdrojů hluku v Dole Turów, tak proměnné meteorologické podmínky.

Celonoční ekvivalentní hladiny akustického tlaku A , $L_{Aeq,T}$, se na obou MM mění přibližně simultánně, tedy dojde-li ke zvýšení či snížení celonoční hladiny na jednom MM, změní se obdobně situace i na druhém MM. Vzhledem k tomu, že akustická situace v bezprostředním okolí obou MM je rozdílná, musí být simultánní změny na obou místech vyvolány jiným externím zdrojem hluku, který je schopen vyvolat na obou místech obdobné změny. Jediným takto významným zdrojem je hluk z Dolu Turów. Uvedená skutečnost tak může být považována za kvalitativní průkaz, že se hluk z Dolu Turów v předmětném území objektivně projevuje.

V několika případech byla identifikována výrazná frekvenční složka, avšak tónová složka byla identifikována pouze ve 2 případech na f_i 40 a 50 Hz.

Za současné situace může v některých dnech docházet k překračování limitní hodnoty 40 dB v noční době hodnotou veličiny $L_{A90avg,1h}$, kterou považujeme za dolní odhad zbytkového hluku zahrnujícího i hluk Dolu Turów. Pravděpodobnost překročení 7,3 % představuje možnost překračování po celkem 27 dní během roku, nejedná se o souvislý časový interval, hodnoty jsou rozptýleny během kalendářního roku.

Při tomto hodnocení je však třeba mít na paměti nejistotu v identifikaci a metodě stanovení hodnoty pro nejhluchnější hodinu.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Prostředí pro život, řešení projektu č. SS05010044 „Metodika hodnocení vztahu expozice–odezva osob exponovaných v životním prostředí hlukem z důlní činnosti“.

REFERENCE

- [1] *Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, ve znění nařízení vlády č. 217/2016 Sb.* Sbírka zákonů ČR, 15. července 2016; částka 84.



Studium frekvenčního zkreslení rázové vlny vyzářené bodovým zdrojem ve vodě

Karel Vokurka

Technická univerzita v Liberci, katedra fyziky, Studentská 2, 461 17 Liberec

karel.vokurka@tul.cz

Abstract Due to their extreme properties, shock waves are challenging to study experimentally. In this work, the estimation of the frequency distortion due to the upper limiting frequency of the measuring hydrophone is obtained using model pulses and the Laplace transform. The studied shock waves developed at the leading edge of the measured pulses during their propagation. Pressure pulses were radiated by spark-generated bubbles in the water.

1 ÚVOD

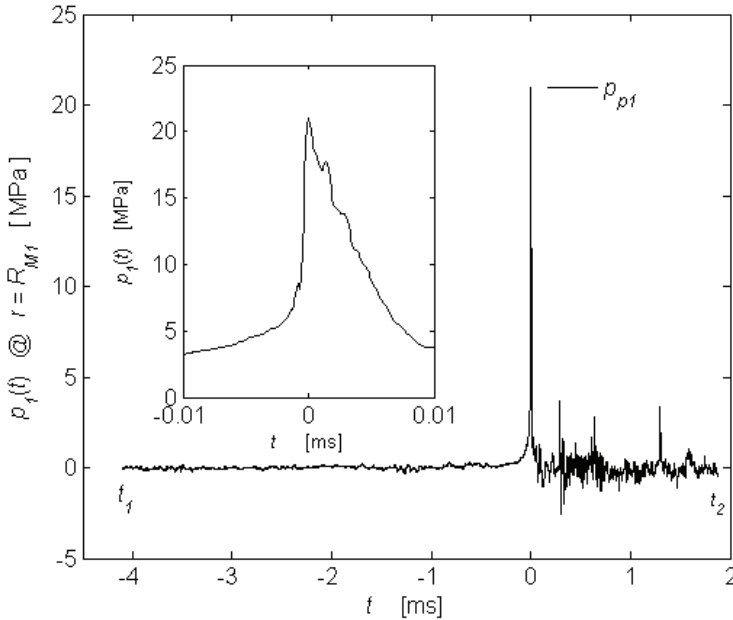
Studium rázových vln je velmi náročné na přístroje. Teoretická doba náběhu čela rázové vlny je řádově 10^{-9} s [1], výška čela rázové vlny dosahuje řádově hodnot 10^8 Pa [2]. Vzhledem k uvedené přístrojové náročnosti nebyly proto rázové vlny dosud experimentálně uspokojivě prostudovány a v údajích naměřených různými autory existují i značné rozdíly [3–6].

V předloženém příspěvku bude studováno stanovení velikosti frekvenčního zkreslení způsobeného konečnou šířkou pásma propustnosti hydrofonu použitého pro získání údajů prezentovaných na 100. a 102. semináři ČsAS [7, 8]. Postup popisovaný v příspěvku využívá Laplaceovy transformace a do určité míry navazuje na postup uvedený na 97. semináři ČsAS [9].

2 NAMĚŘENÉ PULSY

V příspěvku studované rázové vlny byly vyzářovány radiálně kmitajícími kulovými bublinami, které byly vytvářeny jiskrovými výboji ve vodě [7, 8]. Tyto bubliny představují bodový akustický zdroj nultého řádu. Pokud je kmitající bublinou vyzářen dostatečně silný tlakový puls, pak během jeho šíření se v náběžné hraně pulsu vytvoří čelo rázové vlny [7, 8]. Tlakové pulsy šířící se ve vodě byly zaznamenávány pomocí hydrofonu Reson TC 4038, jehož použitelný frekvenční rozsah je dle údajů výrobce

od 10 kHz do 800 kHz. Příklad naměřeného tlakového pulsu $p_1(t)$, v jehož náběžné hraně se během šíření vytvořilo čelo rázové vlny, je na obr. 1.



Obrázek 1. Tlakový puls $p_1(t)$, v jehož čele se vytvořilo čelo rázové vlny

Tlakový puls $p_1(t)$ je popsán dvěma základními parametry: špičkovým tlakem p_{p1} a efektivní šířkou pulsu ϑ_1 , která je definována vztahem

$$\vartheta_1 = \frac{1}{p_{p1}^2} \int_{t_1}^{t_2} p_1^2(t) dt \quad , \quad (1)$$

kde t_1 je počátek pulsu a t_2 konec pulsu. V případě pulsu na obrázku 1 je špičkový tlak $p_{p1} = 21$ MPa a efektivní šířka pulsu $\vartheta_1 = 5,4$ μ s.

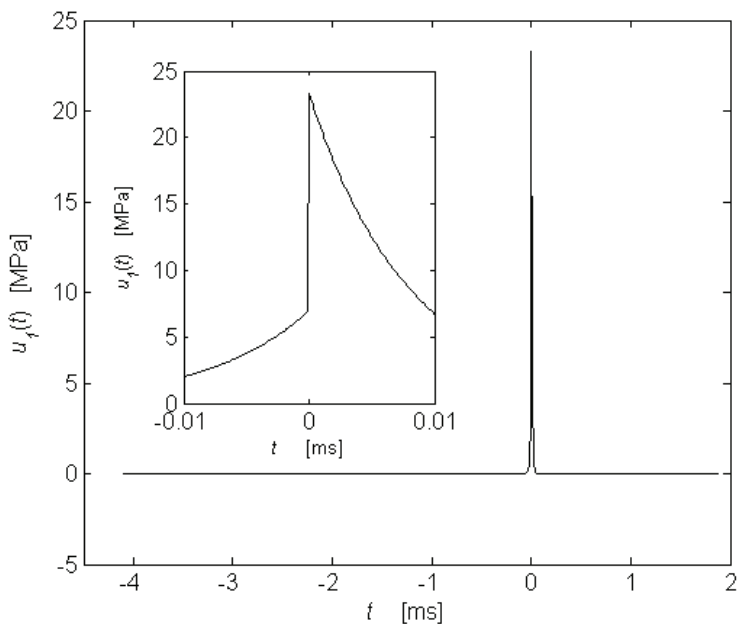
3 MODELOVÉ PULSY

Pro stanovení frekvenčního zkreslení tlakového pulsu $p_1(t)$ v hydrofonu byl zvolen následující postup. Tvar tlakového pulsu šířícího se ve vodě byl modelován pomocí exponenciálních náběžných a sestupných hran pulsu vztahem

$$u_1(t) = A_{le} \exp(t_{le}/a) + A_{te} \exp(-t_{te}/a) \quad . \quad (2)$$

Zde A_{le} a A_{te} jsou bezrozměrné špičkové hodnoty náběžné a sestupné hrany pulsu, t_{le} jsou časy náběžné hrany pulsu, t_{te} jsou časy sestupné hrany pulsu a a je časová konstanta. Na základě naměřených údajů [7, 8] byly zvoleny hodnoty $A_{le} = 0,3$ a $A_{te} = 1$. Časová konstanta a má hodnotu, která souvisí s velikostí efektivní šířky pulsu ϑ_1 . Modelový puls $u_1(t)$ je opět popsán dvěma základními parametry: špičkovou hodnotou u_{p1} a efektivní šířkou pulsu ϑ_1 , spočítanou ze vztahu (1).

Příklad modelového pulsu $u_1(t)$ je na obr. 2. Zobrazený puls je vytvořen vynásobením vztahu (2) vhodně zvolenou špičkovou hodnotou u_{p1} . Jak ukážeme dále, bude tento modelový puls frekvenčně zkreslen tak, že jeho špičková hodnota klesne o 10 %, proto je zvolena $u_{p1} = 23,3$ MPa a efektivní šířka pulsu $\vartheta_1 = 4,4$ μ s.



Obrázek 2. Modelový puls $u_1(t)$

Frekvenční zkreslení modelového pulsu $u_1(t)$ bylo docíleno při průchodu tohoto pulsu dolnofrekvenční propustí s horním mezním kmitočtem f_{uf} . Tato dolnofrekvenční propust simuluje omezené frekvenční pásmo hydrofonu. Tvar pulsu na výstupu z dolnofrekvenční propusti $u_2(t)$ byl nalezen pomocí Laplaceovy transformace. Pro výpočet byl použit bezrozměrný čas $t_n = t/a$ a bezrozměrná frekvence $f_n = f/a$. Výpočet $u_2(t)$ byl proveden pro velikosti f_{uf} , při kterých docházelo k zadanému frekvenčnímu zkreslení pulsu $u_1(t)$. U nalezených pulsů $u_2(t)$ byly stanoveny velikosti špičkové hodnoty u_{p2} a bezrozměrná efektivní šířka pulsu ϑ_{n2} . Získané hodnoty f_{nuf} a ϑ_{n2} pro zvolené frekvenční zkreslení u_{p2}/u_{p1} jsou uvedeny v tabulce 1.

u_{p2}/u_{p1}	0,95	0,90	0,85	0,80
f_{nuf}	12,7	4,85	2,59	1,62
ϑ_{n2}	0,46	0,37	0,28	0,19

Tabulka 1. Hodnoty získané Laplaceovou transformací

4 STANOVENÍ MEZÍ ZKRESLENÍ

Během studia rázových vln byly v práci [7] analyzovány pulsy $p_1(t)$ vyzářené poměrně rozsáhlým souborem bublin o velikostech popsaných maximálním poloměrem R_{M1} , což je poloměr, který bubliny nabyly během prvního kmitu. Bubliny rovněž kmitaly s různě velkými intenzitami. Pro popis intenzity kmitání bublin je vhodné používat bezrozměrný špičkový tlak ve vyzářeném pulsu p_{zp1} , který je definován vztahem [10]

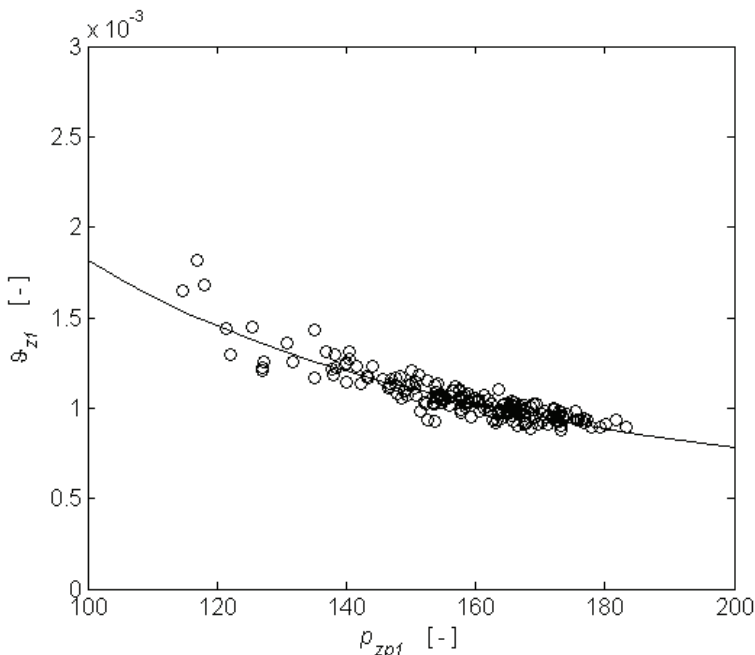
$$p_{zp1} = \frac{p_{p1}}{p_{\infty}} \cdot \frac{r}{R_{M1}} \quad . \quad (3)$$

Zde r je vzdálenost hydrofonu od středu bubliny a p_{∞} je hydrostatický tlak v místě bubliny.

Pro vyloučení závislosti efektivní šířky pulsu $p_1(t)$ na velikosti bubliny R_{M1} je vhodné pracovat s bezrozměrnou efektivní šířkou pulsu ϑ_{z1} , kterou lze stanovit ze vztahu

$$\vartheta_{z1} = \frac{\vartheta_1}{R_{M1} \sqrt{\frac{\rho}{p_{\infty}}}} \quad . \quad (4)$$

Zde ρ je hustota vody. Závislost bezrozměrných efektivních šířek pulsů ϑ_{z1} na intenzitě kmitání bublin p_{zp1} je pro studované bubliny uvedena na obr. 3.



Obrázek 3. Závislost efektivních šířek ϑ_{z1} pulsů $p_1(t)$ na intenzitě kmitání bublin p_{zp1}

Na obr. 3 je vidět, že experimentální hodnoty lze poměrně přesně proložit křivkou s použitím vztahu

$$\vartheta_{z1} = \frac{k_1}{p_{zp1}^{k_2}} \quad . \quad (5)$$

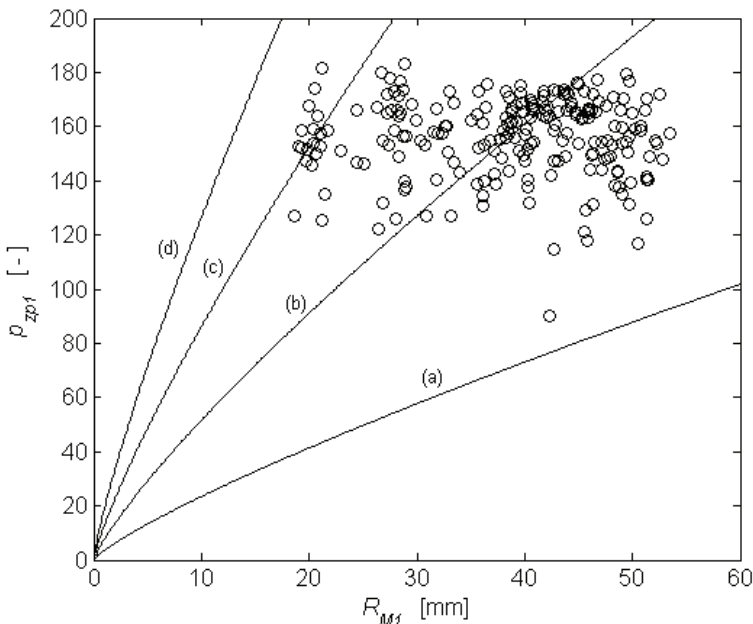
V případě použitého hydrofonu je $k_1 = 0,5$ a $k_2 = 1,22$.

Studované bubliny, které jsou popsány dvěma základními parametry R_{M1} a p_{zp1} , jsou přehledně zobrazeny v mapě bublin na obr. 4.

Hranice pro určité frekvenční zkreslení lze nalézt po vložení rovnice (5) do rovnice (4) a s uvažováním definic bezrozměrných časů t_n a frekvencí f_n . Po úpravě získáme vztah

$$p_{zp1} = \left(\frac{k_1}{\vartheta_{n2}} \cdot \frac{f_{uf}}{f_{nuf}} \sqrt{\frac{\rho}{p_\infty}} R_{M1} \right)^{1/k_2} \quad . \quad (6)$$

Velikost konstant k_1 a k_2 byla uvedena u vztahu (5). Vzhledem k použitému hydrofonu lze položit $f_{uf} = 800$ kHz. Pro zvolené frekvenční zkreslení jsou hodnoty f_{nuf} a ϑ_{n2} uvedeny v tabulce 1. Po dosazení uvedených hodnot do vztahu (6) lze nalézt hranice pro zvolená frekvenční zkreslení u_{p2}/u_{p1} . Tyto hranice jsou vyneseny na obr. 4.



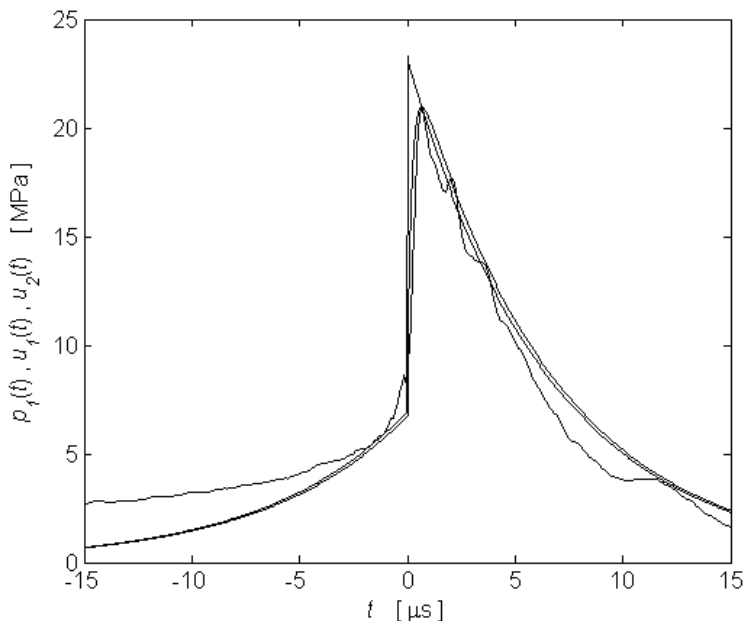
Obrázek 4. Mapa bublin s vynesnými hranicemi frekvenčního zkreslení

Hranice (a) odpovídá poklesu u_{p2}/u_{p1} na hodnotu 0,95, hranice (b) odpovídá poklesu na hodnotu 0,90, hranice (c) na hodnotu 0,85 a hranice (d) na hodnotu 0,80. Na obr. 4 je vidět, že největší frekvenční zkreslení se vyskytuje u pulsů vyzářených malými intenzivně kmitajícími bublinami.

Na závěr ilustrujeme použitý postup na naměřeném pulsu $p_1(t)$, který byl zvolen jako názorný příklad na obr. 1. Tento puls byl vyzářen bublinou, která leží u hranice frekvenčního zkreslení 0,90 a je zobrazen na obr. 5 současně s průběhy modelových pulsů $u_1(t)$ a $u_2(t)$.

5 ZÁVĚR

I když popisovaná metoda neposkytuje přesné výsledky frekvenčního zkreslení, přesto ukazuje, že naměřené špičkové hodnoty pulsů p_{p1} jsou v případě pulsů $p_1(t)$ vyzářených velkými bublinami poměrně málo zkresleny, neboť zde je odhad poklesu naměřeného špičkového tlaku p_{p1} oproti skutečnému špičkovému tlaku v rozmezí od 5 % do 10 %. U menších bublin, které kmitají velmi intenzivně, je tento pokles již okolo 15 %.



Obrázek 5. Porovnání naměřeného pulsu $p_1(t)$ s modelovými pulsy $u_1(t)$ a $u_2(t)$

LITERATURA

- [1] Kluwick, A.: Shock discontinuities: from classical to non-classical shocks, *Acta Mechanica*, 229, 515–533, 2018, <https://doi.org/10.1007/s00707-017-1984-3>
- [2] Cole, R. H.: *Underwater explosions*, Dover, New York, 1948.
- [3] Mellen, R. H.: An experimental study of the collapse of a spherical cavity in water. *Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 28, Issue 3, 447–454, 1956, <https://doi.org/10.1121/1.1908354>
- [4] Brujan, E. A., Williams, G. A.: Luminescence spectra of laser-induced cavitation bubbles near rigid boundaries. *Physical Review E*, 72, 016304, 2005, <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.72.016304>
- [5] Huang, Y., Yan, H., Wang, B., Zhang, X., Liu, Z., Yan, K.: The electro-acoustic transition process of pulsed corona discharge in conductive water, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 47, Number 25, 255204, 2014, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/25/255204>

- [6] Wang, J., Abe, A., Nishio, S., Wang, Y. Huang, C.: Sequential observation of rebound shock wave generated by collapse of vapor bubble in BOS system, *Journal of Visualization*, Volume 21, 695–710, 2018, <https://doi.org/10.1007/s12650-018-0488-0>
- [7] Vokurka, K.: Experimentální studium šíření kulových rázových vln ve vodě. 100. akustický seminář, Znojmo, 19.–21. 10. 2021 (sborník: České vysoké učení technické v Praze, 2021, redakce sborníku: M. Brothánek, R. Svobodová, ISBN: 978-80-01-06888-5, 87–93).
- [8] Vokurka K.: Experimentální studium strmosti čela rázových vln. 102. akustický seminář, Třeboň, 18.–20. 10. 2022 (sborník: České vysoké učení technické v Praze, 2022, redakce sborníku: M. Brothánek, ISBN: 978-80-01-07047-5, 23–28).
- [9] Vokurka K.: Problematika měření krátkých a intenzivních akustických pulsů. 97. akustický seminář, Seč, 29.–31. 10. 2018 (sborník: České vysoké učení technické v Praze, Česká akustická společnost, 2018, redakce sborníku: M. Brothánek, R. Svobodová, ISBN: 978-80-01-06500-6, 20–28).
- [10] Buogo, S., Vokurka, K.: Intensity of oscillation of spark-generated bubbles. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 329, Issue 20, 4266–4278, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.04.030>