

ПОСТАНОВКА ЗА ИЗМЕРВАНЕ СКОРОСТТА НА ЗВУКА ВЪВ ВЪЗДУХ

Станислав Сланев, Хафизе Шабан,
Шебнем Шабан, Анета Маринова

Професионална гимназия по икономика – Шумен

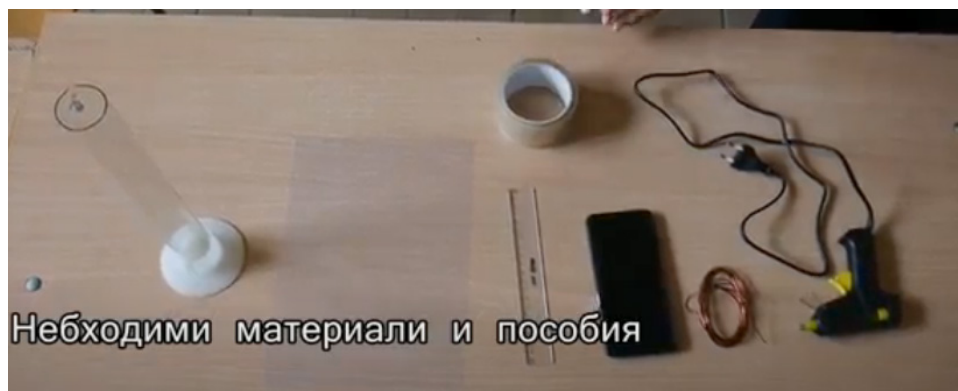
Резюме. Описана е постановка за измерване скоростта на звука във въздух. Експериментът може да се възпроизведе с подръчни средства във всяко училище. Използвани са смартфон и достъпни безплатни приложения, като онлайн тонгенератор и виртуален осцилоскоп. Честотата на звука се задава от тонгенератора, възпроизвежда се чрез микрофона на телефона и се наблюдава с помощта на осцилоскопа. За резонатор служи тръба, чрез която посредством потапяне във вода се регулира дължината на въздушния стълб. Изследвани и оценени са някои от систематичните ефекти, водещи до грешки в резултата.

Ключови думи: звук; скорост; въздух; смартфон; тонгенератор; осцилоскоп

Увод

В Професионалната гимназия по икономика в Шумен учениците имат възможност да работят в Клуба по приложна астрономия и физика. До идеята за тази опитна постановка се стигна след търсене в интернет на интересни експерименти за представителната изява за учебната 2021/2022 година. Конкурсят на софийския клон на Съюза на физиците в България за изработка на уреди за кабинетите по природни науки също бе обект на интерес в Клуба. В хода на дискусиите двете цели се обединиха. Оформил се идея, която бе подкрепена административно и финансово от ръководството на училището. Същността на идеята бе да се изработи опитна постановка за измерване скоростта на звука във въздуха, която след представяне на конкурса да остане за бъдещо ползване в обучението по физика в гимназията.

На фигура 1 са представени пособията и материалите, използвани в опитната постановка: стъклен цилиндър, лист прозрачно фолио А4, лийка, телефон с интернет и изтеглено приложение на виртуален осцилоскоп, тел, силиконов пистолет и тиксо.



Фигура 1.

Вълни в едностранно затворена тръба

В едностранно затворена тръба с въздух (цилиндър) в резултат от интерференцията на падаща и отразена звукова вълна се образува стояща вълна. По продължението на въздушния стълб в цилиндъра има точки, в които амплитудата на трептене на въздушните молекули е равна на нула. Тези точки се наричат възли на вълната. Между два възела има области, в които амплитудата на трептене на частиците е максимална. Това са върховете на стоящата вълна¹⁾.

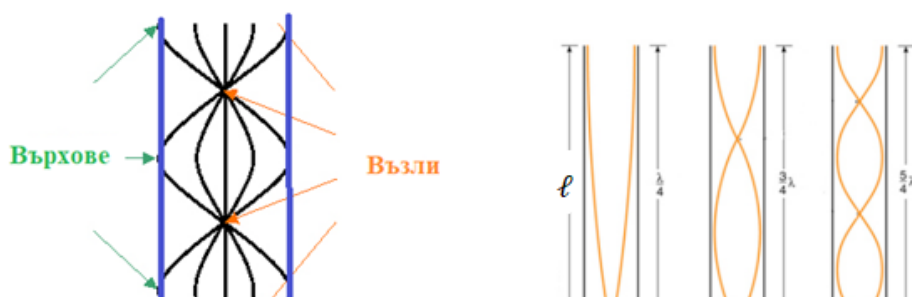
Разстоянието от възел до възел е половин дължина на вълната $\lambda/2$, а от връх до възел – $\lambda/4$.

В затворения край винаги има възел на вълната. В отворения има връх, когато дължината на въздушния стълб ℓ е равна на нечетно число четвърт дължини на вълната $\lambda/4$:

$$\ell = (2n + 1) \lambda/4 \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Когато горният ръб на тръбата минава през връх на стоящата вълна и до ръба е поставен микрофон, нивото на интензитета на звука е максимално и звукът е най-силен (усилването на звука се чува ясно дори и без микрофон).

Измервайки в това положение дължината на въздушния стълб ℓ , може да се определи дължината на вълната λ от равенство (1).



Фигура 2. Ляв панел: графично представяне на върхове и възли и на стояща вълна. Десен панел: дължина на въздушния стълб, при която се наблюдават първите 3 максимума на нивото на интензитета на стояща вълна в едностранно затворен цилиндър¹⁾

При известни честота ν и дължина на вълната λ скоростта на вълната u се определя по формулата:

$$u = \lambda \cdot \nu \quad (2)$$

Инструкция за изработка

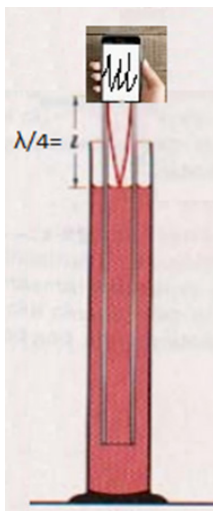
До представената постановка се стигна след запознаване с няколко подобни експеримента^{1), 2), 3)} и изпробване на варианти. Фолиото се навива на тръба, която леко се прилепва по вътрешния диаметър на цилиндъра. Направена по този начин, триенето в страничните стени задържа тръбата неподвижна в дадено положение, без да се налага придържане от страна на измерващия. Това улеснява отчитането на височината на въздушния стълб ℓ над водната повърхност и повишава точността.

В горния край се правят няколко навивки с телта, като се оставят краища с дължина около 5 см. Навивките се фиксират със силикон към тръбата. Със свободните краища на телта към тръбата се прикрепва линейката, така че нулата да съвпада с ръба на тръбата (фигура 3).



Фигура 3. Снимка в близък план

Тръбата се потапя в цилиндъра, който е напълнен с вода. Дължината на въздушния стълб се променя чрез издигане и потапяне. Повърхността на водата служи за затворен край на въздушния стълб в тръбата от фолио¹⁾.



Фигура 4. Отчитане височината на въздушния стълб

Ход на измерванията

1. Създава се таблица в Excel, която изчислява скоростта на звука във въздуха и грешката на експеримента.
2. Тръбата от фолио се потапя максимално във водата (фигура 4).
3. На телефон се отваря тонгенератор, пуска се звук с избрана честота ν и едновременно се отваря дигитален осцилоскоп. На екрана се появява графиката на издавания от тонгенератора звук. Честотата се записва в таблицата.
4. Телефонът се допира до горния край на тръбата и плавно заедно се издигат над водата (фигура 5).
5. В дадено положение на тръбата звукът чувствително се усилва, а на екрана на телефона се вижда максималната амплитуда на трептене (фигура 6). Горният ръб на тръбата и ръбът на телефона се намират в първия връх на стоящата звукова вълна.
6. Измерва се дължината на въздушния стълб ℓ в това положение и се записва в таблицата. Това разстояние се приема за $\lambda/4$.
7. Действията се повтарят за няколко последователни честоти.
8. След записа на последните стойности от измерванията таблицата изчислява скоростта на звука във въздуха и грешката на експеримента.

Разглежда се получената стойност, прави се оценка на достоверността на резултата, обсъждат се вероятните грешки и начините за повишаване точността на измерването.



Фигура 5. Положение на телефона



Фигура 6. Регистриране на връх на вълната с виртуален осцилоскоп

Експериментални резултати

В таблица 1 са представени експериментални резултати, в които височината на въздушния стълб е отчетена до горния ръб на цилиндъра, до който е допрян телефонът.

Таблица 1. Експериментални резултати при $\ell = \lambda/4$

№	Честота ν [Hz]	$\ell = \lambda/4$ [m]	$u=4 \cdot \ell \cdot \nu$ [m/s]	$\Delta u_{cp} = u_{cp} - u_i$ [m/s]	Δu_{cp}^2 [m ² /s ²]
	250	0,308	308	-1	1
	300	0,270	324	-17	289
	350	0,225	315	-8	64
	400	0,200	320	-13	169
	420	0,181	304	3	9

	450	0,180	324	-17	289
	500	0,160	320	-13	169
	550	0,137	301	6	36
	600	0,127	305	3	9
	650	0,117	304	3	9
	700	0,108	302	5	25
	750	0,100	300	7	49
	800	0,091	291	16	256
	900	0,079	284	23	529
			$u_{cp}=307$ [m/s]		$\Delta u_{KB}=3$ [m/s]
$u = (307 \pm 3)$ [m/s]					

Получената средна стойност за скорост на звука във въздуха е значително по-малка от публикуваната в справочниците. Отделните стойности – също. Това показва, че е допусната систематична грешка, която изкривява резултата.

Екипът потърси възможен източник на грешка във факта, че във вътрешността на телефона микрофонът не е разположен непосредствено до ръба на цилиндъра, а е на известно разстояние над него. Намерена бе схема на устройството на телефона, с който се правят измерванията. Разстоянието между микрофона на телефона и долния му ръб бе оценено на 9 мм. Скоростта на звука бе изчислена отново, като височината на въздушния стълб бе увеличена със стойността на оценката. Резултатите са представени в таблица 2.

Таблица 2. Експериментални резултати при $\ell + 0,009\text{ m} = \lambda/4$

Скорост на звука във въздуха (с отчитане на разстоянието до микрофона на телефона)						
№	Честота ν [Hz]	l [m]	$\ell + 0,009 = \lambda/4$ [m]	$u = 4 \cdot \ell \cdot \nu$ [m/s]	$\Delta u_{cp} = u_{cp} - u_i$ [m/s]	Δu_{cp}^2 [m ² /s ²]
1.	250	0,308	0,317	317	10	100
2.	300	0,270	0,279	335	-8	64
3.	350	0,225	0,234	328	-1	1
4.	400	0,200	0,209	334	-7	49
5.	420	0,181	0,190	319	8	64
6.	450	0,180	0,189	340	-13	169

7.	500	0,160	0,169	338	-11	121
8.	550	0,137	0,146	321	6	36
9.	600	0,127	0,136	326	1	1
10.	650	0,117	0,126	328	-1	1
11.	700	0,108	0,117	328	-1	1
12.	750	0,100	0,109	327	0	0
13.	800	0,091	0,100	320	7	49
14.	900	0,079	0,088	317	10	
				$u_{cp}=327$ [m/s]		$\Delta u_{kb}=2$ [m/s]
$u = (327 \pm 2) \text{ [m/s]}$						

Получената скорост отново е съществено по-ниска от общоприетата. Екипът потърси друг източник на систематична грешка и я откри в допускането, че горният ръб на цилиндъра се намира точно във върха на стоящата вълна. Оказва се, че това е вярно в приближение: „Строго погледнато, възелът на налягането (върхът на стоящата вълна) се появява малко отвъд отворения край на тръбата“ (Young, Ford & Freedman 2012, 524). По-точно указание за местоположението на върха на стоящата вълна е следното: „По-прецизен анализ показва, че върховете на стоящата вълна на отклонението са разположени малко извън отворените краища на тръбата, на разстояние от порядъка на радиуса на тръбата“⁽⁴⁾.

Радиусът на тръбата r , с която са направени измерванията, е 1.8 cm. В таблица 3 са показани резултати, при които измерените височини на въздушния стълб ℓ са увеличени с един радиус на тръбата r : $\ell + r = \lambda/4$.

Резултатът за измерената по този начин скорост на звука във въздуха е най-близо до приетата стойност в науката.

Таблица 3. Експериментални резултати при $\ell + r = \lambda/4$

Скорост на звука във въздуха (дължината на въздушния стълб ℓ е увеличена с радиуса на тръбата $r=0,018\text{m}$)						
№	Честота ν [Hz]	l [m]	$\ell+r=\lambda/4$ [m]	$u=4 \cdot \ell \cdot \nu$ [m/s]	$\Delta u_{\text{cp}}=u_{\text{cp}}-u_i$ [m/s]	Δu_{cp}^2 [m ² /s]
1.	250	0,308	0,326	326	21	441
2.	300	0,270	0,288	346	1	1
3.	350	0,225	0,243	340	6	36
4.	400	0,200	0,218	349	-2	4
5.	420	0,181	0,199	334	12	144
6.	450	0,180	0,198	356	-10	100
7.	500	0,160	0,178	356	-9	81
8.	550	0,137	0,155	341	6	36
9.	600	0,127	0,145	348	-1	1
10.	650	0,117	0,135	351	-4	16
11.	700	0,108	0,126	353	-6	36
12.	750	0,100	0,118	354	-7	49
13.	800	0,091	0,109	349	-2	4
14.	900	0,079	0,097	349	-2	4
				$u_{\text{cp}}=347$ [m/s]		$\Delta u_{\text{кр}}=2$ [m/s]
$u = (347 \pm 2)$ [m/s]						

Заклучение

Екипът достигна до представения вид на опитната установка след няколко седмици работа по устройството. Първоначално вместо цилиндър, пълен с вода, бе използвана хоризонтална тръба с въздух с дължина 0,84 m и диаметър 0,085 m. Дължината на въздушния стълб бе променяна чрез плъзгащо се в цилиндъра бутало. Силна страна на тази постановка е, че се наблюдават два от върховете на стоящата вълна – при $\ell = \lambda/4$ и при $\ell = 3\lambda/4$. Недостатък е, че положението на върховете не е ясно изразено. По тази причина екипът се отказва от този вид на опитната постановка и се спря на изложения в статията вариант. Той е лесно изпълним и компактен, а върхът на стоящата вълна (макар и само един поради малката дължина на цилиндъра) е отчетливо изразен. Интензитетът на звука в него осезаемо нараства, а на дисплея на телефона ясно се вижда и увеличението на амплитудата на вълната. Изчисленията дават стойност за скоростта на звука, много близка до реалната. Използването

на тонгенератор като източник на звук позволява да се работи с много повече честоти, отколкото ако се използват камертони.

Използването на електронна таблица за обработка на експерименталните резултати, прилепващата към цилиндъра тръба от фолио вместо от стъкло, включването на смартфон и електронни приложения в работата са по идея на екипа и допринасят за осъвременяването на експеримента.

В обучението по физика постановката може да се използва за демонстрации, в лабораторните упражнения или да бъде зададена като проектно изследване.

Екипът препоръчва използването на опитната постановка в училище. Личният му опит показва, че освен образователен ефект работата по подобни проекти формира неповторима работна среда, носи богат спектър от емоции и много запомнящи се моменти.

Благодарности

Постановката е представена на 22-рия конкурс „*Уреди за кабинетите по природни науки*“. Авторите благодарят на:

- организаторите на конкурса, в лицето на проф. д.ф.н. Тодор Мишонов и неговите съмишленици, за предоставената възможност за изява и за неповторимата атмосфера;
- участниците в конкурса – за интереса към работата на екипа.

БЕЛЕЖКИ

1. Resonance column. [online] [Viewed 01.10.2022]. Available from: <http://amrita.olabs.edu.in/?sub=1&brch=5&sim=36&cnt=1>.
2. Speed of Sound Lab. [video file] [Viewed 01.10.2022]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=CM5IFM0N1bE>.
3. Closed Pipe Resonance Lab Activity. [video file] [Viewed 01.10.2022]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=LcpbqVT6aDE>
4. Тема 15. Звукови вълни. [online] [Viewed 01.10.2022]. Available from: <http://web.uni-plovdiv.bg/marudova/Mechanics/akustika.pdf>.

ЛИТЕРАТУРА

YOUNG H.D, FORD A.L, FREEDMAN R.A., 2012. Sears and Zemansky's University Physics. 13th ed. San Francisco: Addison-Wesley. ISBN-13: 978-0321696861

EXPERIMENTAL SETUP FOR MEASURING THE SPEED OF SOUND IN AIR

Abstract. An experimental setup for measuring the speed of sound in air is described. The experiment can be reproduced with readily available tools, in any school. A smartphone was used, running tone generating apps available for free along with a digital oscilloscope. A sound frequency is assigned using the tone generator and is reproduced by the smartphone's loudspeaker and is further observed using the digital oscilloscope. A pipe is used as a resonator, and by dipping one end in water the air column length is adjusted. Some of the systematic effects leading to error in results are researched and evaluated.

Keywords: sound; speed; air; smartphone; tone generator; oscilloscope

✉ **Stanislav Slanev, student**

Professional School of Economics,
62, Simeon Veliki Blvd.
9700 Shumen

E-mail: os25_stanislav@pgishumen.bg

✉ **Hafize Shaban, student**

Professional School of Economics,
62, Simeon Veliki Blvd.
9700 Shumen

E-mail: et25_hafize@pgishumen.bg

✉ **Shebnem Shaban, student**

Professional School of Economics
62, Simeon Veliki Blvd.
9700 Shumen

E-mail: et25_shebnem@pgishumen.bg

✉ **Aneta Marinova, teacher**

ORCID iD: 0000-0002-1091-5090
Professional School of Economics,
62, Simeon Veliki Blvd.
9700 Shumen

E-mail: marinova@pgishumen.bg