ניסוי גלי קול 21/12/2025

מדריך: אברהם איתן
קבוצה 2, עמדה 2

רונן מזר 215966649
ronen.mazar@campus.technion.ac.il

דן קצוב-פייגין 323002915
dan.k@campus.technion.ac.il

דו"ח זה נכתב ב-Typst, שפה לכתיבת מסמכים. ניתן לראות את קוד המקור כאן.

קביעת מהירות הקול על ידי מדידת הפרשי מופע יחסית לזמן מעוף (ToF) ובגזים שונים

תקציר

בניסוי מדדנו את מהירות הקול בדרכים שונות באמצעות מיקרופון, זמזם ואוסילוסקופ. ראשית, בדקנו את משרעת הגל הנקלט באוסילוסקופ כדי למצוא את התדירות בה מדידת המיקרופון באיכות מרבית. לאחר מכן, מדדנו מרחקים שונים בין הזמזם למיקרופון ואת זמן המעוף של האות, בשביל למצוא את מהירות הקול באוויר. לבסוף, לקחנו צינור אטום אותו מילאנו בגזים שונים (אוויר, הליום ופחמן דו-חמצני) ומדדנו בכל אחד מהם את מהירות הקול על ידי הפרש זמנים בין החזרות של האות המשודר במיקרופון. תוצאות הניסוי היו קרובות לאלו המוכרות מהספרות, אך מדידת מהירות הקול בהליום ובפחמן דו חמצני היו פחות מדויקות, כנראה משום שבצינור נשאר אוויר רגיל.

תוכן עניינים

1 מבוא 3
1.1 רקע תיאורטי 3
1.2 מערכת הניסוי 3
2 מדידות 5
2.1 חלק I: קביעת התדירות האופטימלית של המיקרופון 5
2.2 חלק II: מדידת מהירות הקול לפי היחס בין הפרש המופע למרחק 5
2.3 חלק III: מדידת מהירות הקלים בגזים שונים 6
3 דיון 7
4 סיכום ומסקנות 8
4.1 ניסויי המשך 8
5 ביבליוגרפיה 8

1 מבוא

1.1 רקע תיאורטי

בניסוי מדדנו את מהירות הקול בגזים שונים ובשיטות שונות.

ראשית, מצאנו קשר בין זמן המעוף של הגל באוויר (Time of flight) לבין המרחק אותו עבר. למשוואת הגלים במימד אחד קיים פתרון מהצורה הבאה:

$$y(x,t) = a\cos\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - ft\right) + \phi_0\right) \tag{1}$$

כאשר a היא משרעת הגל [m], λ אורך הגל [m], f תדירות הגל $[1/s]$, ו-ϕ_0 מופע קבוע [rad]. אם נמדוד את מופע הגל בשני מיקומים שונים, x_1 ו-x_2, נקבל שהפרש המפע, $\Delta\phi$, בין שתי הנקודות הוא:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda(x_1 - x_2)} \Rightarrow \frac{\Delta\phi}{\Delta x} = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{2}$$

לאחר חילוץ λ ניתן למצוא את מהירות הגל:

$$v = \lambda f \tag{3}$$

בשביל למדוד את מהירות הקול בגזים שונים, השתמשנו בצינור אטום בו מילאנו את הגז. מהירות הקול בגזים נתונה על ידי המשוואה:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \tag{4}$$

כאשר P הוא הלחץ $[N/m^2]$, ו-γ הוא היחס בין החום הסגולי בלחץ קבוע לחום הסגולי בנפח קבוע. בניסוי השתמשנו בקירוב הגזים האידיאליים, בו מתקיים $P = \rho RT/M$, כאשר $R = 8.31\frac{J}{mol\ K}$ הוא קבוע הגזים, T הטמפרטורה [K], ו-M המסה המולרית של הגז [kg / mol] אז המהירות היא:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \tag{5}$$

לפי הנוסחה נקבל כי המהירות תלויה בטמפרטורה, אך בהנחה שהיא קבועה לאורך הצינור, נקבל שהמהירות קבועה. אז מקינמטיקה פשוטה נקבל שמהירות הקול היא:

$$v = \frac{L}{\Delta t} \tag{6}$$

כאשר L אורך הצינור [m] ו-Δt הזמן בו לקח לאות להגיע מקצה אחד של הצינור לקצה השני [sec].

1.2 מערכת הניסוי

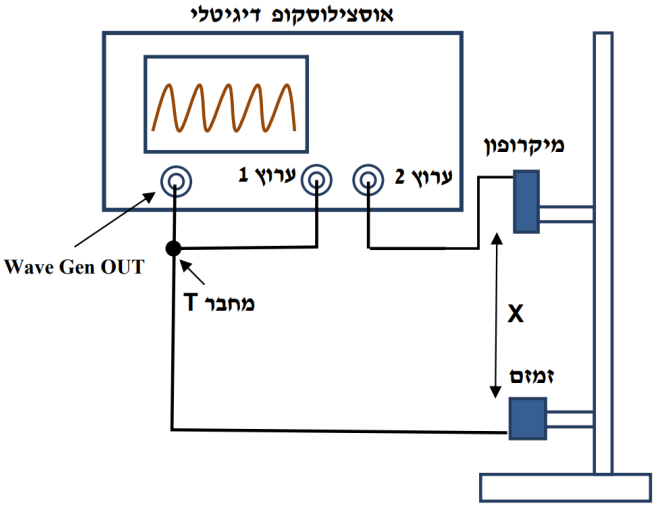
בנינו מערכת הכוללת זמזם, מיקרופון, ואוסילוסקופ. באמצעות האוסילוסקופ חיללנו אות שהעברנו בו זמנית לזמזם ולערוץ 1 של האוסילוסקופ. את האות הנקלט מהמיקרופון מדדנו דרך ערוץ 2 באוסילוסקופ. המדידות בין שני הערוצים אפשרו לנו למצוא את זמן המעוף של האות.

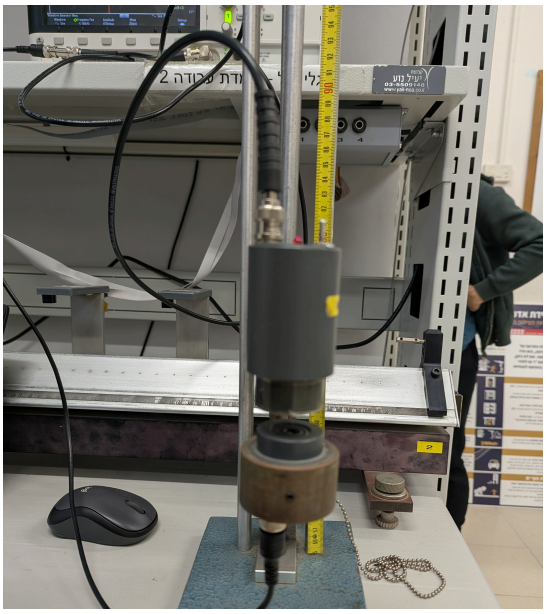
1.2.1 קביעת התדירות האופטימלית של המיקרופון

בתחילת הניסוי המיקרופון מוקם מעל הזמזם במתקן המאפשר לשנות את גובה המיקרופון, ובכך לשנות את המרחק בין המיקרופון לזמזם. תחילה, שינינו את תדירות הזמזם כדי למצוא את המשרעת המקסימלית של האות הנקלט במיקרופון. תדירות זו היא תדירות התהודה של המיקרופון בו מדידתו היא האיכותית ביותר, ובעלת רעש מינימלי.

1.2.2 מדידת מהירות הקול לפי היחס בין הפרש המופע למרחק

לאחר מכן שינינו את המרחק בין המיקרופון לזמזם ובדקנו את ההשפעה על הפרש המופע בין האות הנקלט בשני ערוצי המיקרוסקופ. את המרחק מדדנו באמצעות סרגל המובנה על המתקן ואת הפרש המופע מדדנו באמצעות האוסילוסקופ. מכאן מצאנו את המהירות הקול לפי משוואה 2 ומשוואה 3.



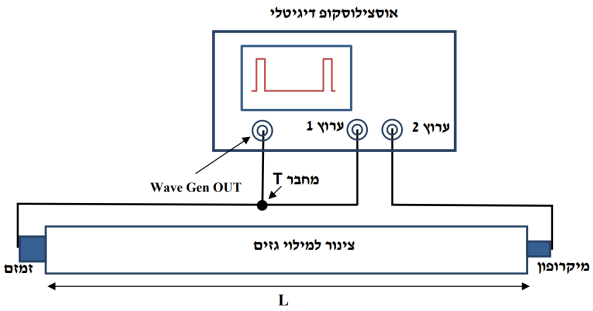


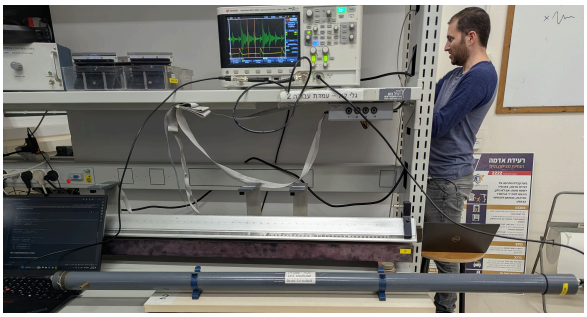
(א) תמונה של המערכת. (ב) איור סכמתי של המערכת.

איור 1: מערכת הניסוי בחלקו הראשון של הניסוי. המרחק בין הרכיבים שונה באמצעות מוט ההברגה המורכב על המתקן ונמדד באמצעות הסרגל הצמוד אליו. על המדף מאחור נמצא האוסילוסקופ באמצעותו חוללנו את האות ומדדנו אותו.

1.2.3 מדידת מהירות הקלים בגזים שונים

בחלקו האחרון של הניסוי הסרנו את המיקרופון והזמזם והמתקן וחיברנו כל אחד מהם לקצה אחר של צינור אטום. באמצעות כדור מילאנו גזים שונים מהבלונים הזמינים במעבדה ומילאנו את הצינור דרך הפתח המיועד לכך. בחלק זה של הניסוי השתמשנו באוויר אטמופסרי רגיל, הליום ומימן. האות ביצע מספר החזרות בצינור, לכן מדדנו את הזמן שלקח לו להגיע מהמיקרופון לקצה השני ובחזרה. השתמשנו במשוואה 6 עם הזמן שמדדנו ועם אורך צינור כפול (הרי האות עבר את הצינור פעמיים.)





(א) תמונה של המערכת. (ב) איור סכמתי של המערכת.

איור 2: מערכת הניסוי בחלקו השני של הניסוי. את הזמזם שמנו בקצה הצינור השמאלי ואת המיקרופון בקצהו הימני. סמוך לקצה השמאלי של הצינור ניתן לראות את הפתח אליו חיברנו את הבלון בשביל למלא את הצינור בגז.

נצרף את ערכי המערכת:

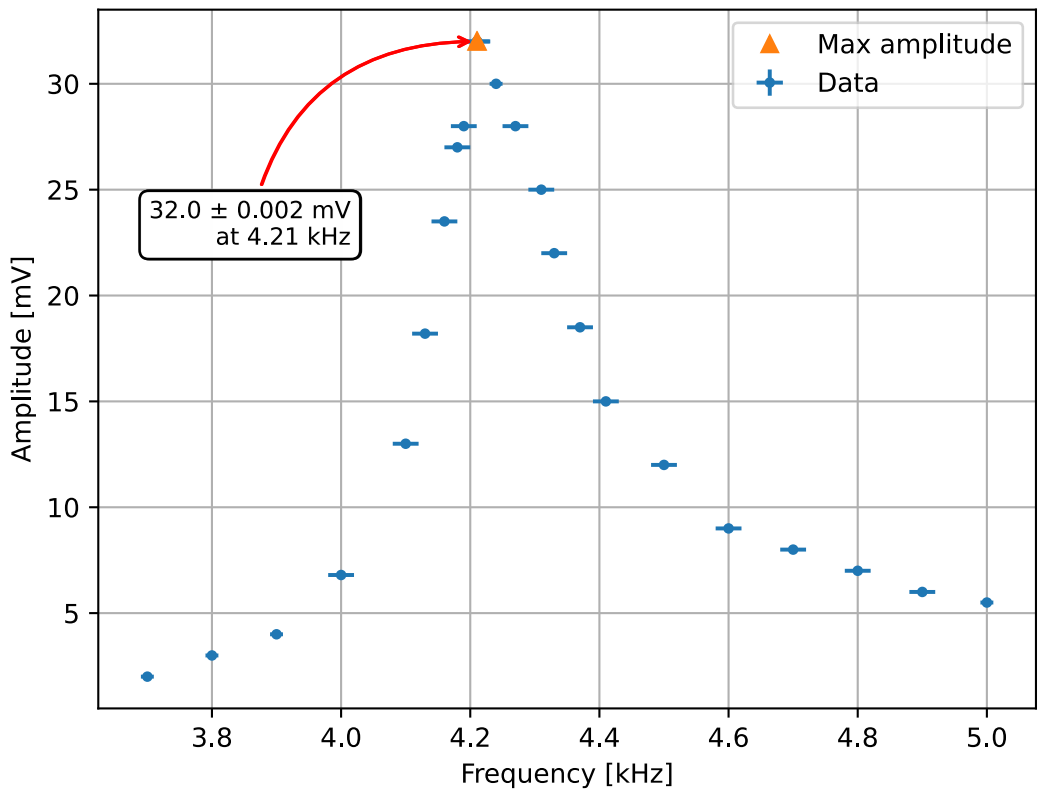
טבלה 1: ערכי המערכת המדודים

סימון	תיאור	ערך מדוד
δx	שגיאת מדידה בסרגל	± 2 mm
L	אורך הצינור	98 ± 1 cm

2 מדידות

2.1 חלק I: קביעת התדירות האופטימלית של המיקרופון

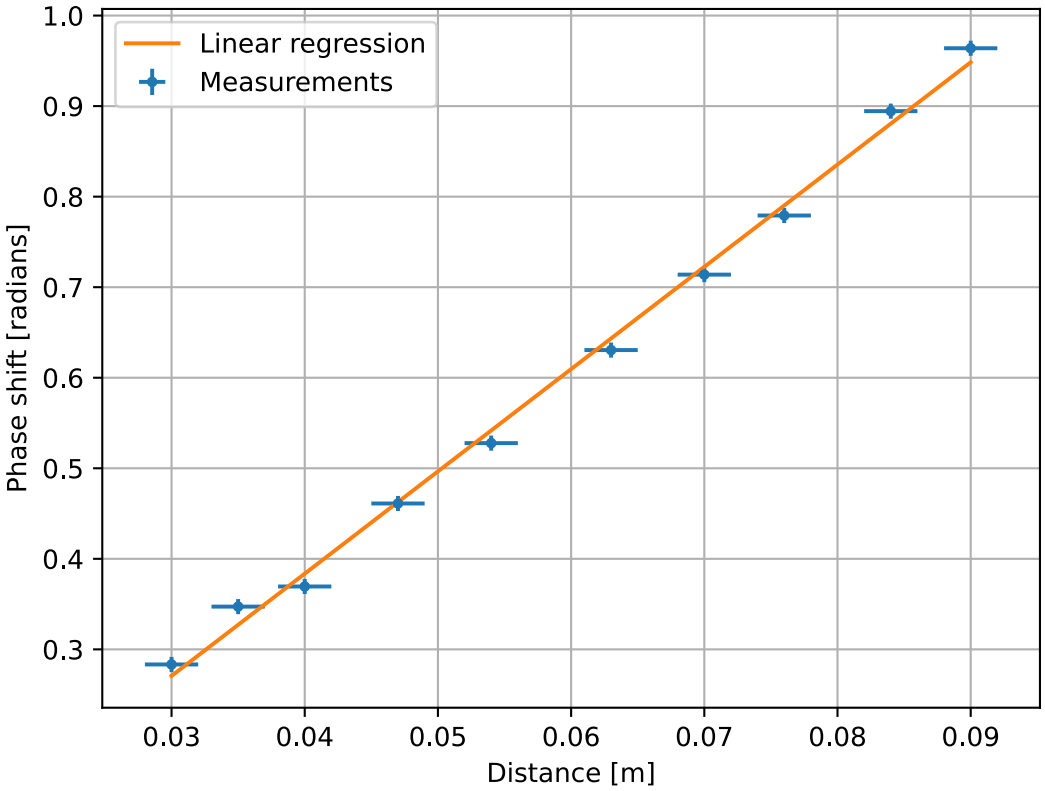
ראשית כוונו את התדירויות למיקרופון שלנו. הפקנו גל קול סינוסי בעל משרעת קבועה, ושינינו את התדירות שלו כדי לקלוט את האמפליטודה הגבוהה ביותר במיקרופון. השתמשנו בתדירות זו בחלק הבא של הניסוי.



איור 3: משרעות האות כפי שהם נקלטו במיקרופון בתדירויות שונות. ניתן לראות שבקרב התדירויות שאנו עובדים בהם המדידות הגיעו למקסימום סביב 4.21 ± 0.01 KHz. נדגיש כי עקב מחסור במדידות ביצענו את חלק זה של הניסוי שנית יומיים אחרי הניסוי המקורי, אך הקפדנו בשתי הפעמים להשתמש באותם מיקרופון וזמזם.

2.2 חלק II: מדידת מהירות הקול לפי היחס בין הפרש המופע למרחק

קיבענו את התדירות של הגלים הנפלטים לתדירות המקסימאלית שמצאנו קודם ומדדנו את הפרש המופע בין האות שפלט הזמזם לאות שנקלט במיקרופון במרחקים שונים של המיקרופון מהרמקול.

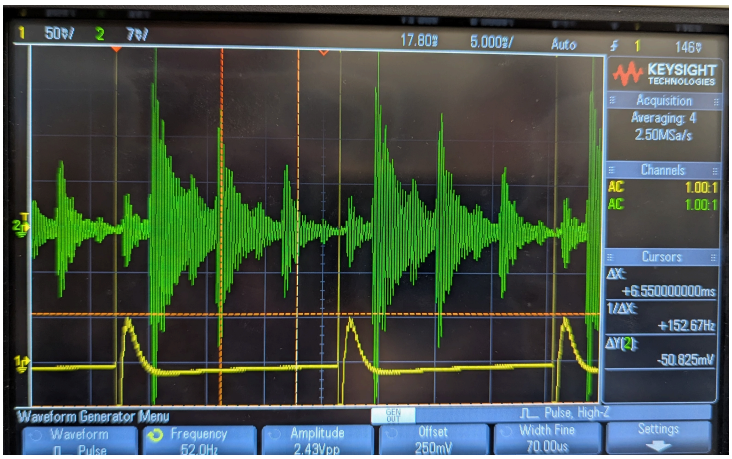


איור 4: הפרשי הפאזה בין האותות הנפלט לנקלט במרחקים שונים בין הרכיבים. ישר ההתאמה הוא על פי משוואה 2. קיבלנו ערך התאמה $R^2 = 0.997$ המצביע על התאמה גבוהה לתיאוריה.

לפי משוואה 2 קיבלנו שמהירות הקול באוויר היא $367.402 \pm 7.82\ \mathrm{m/s}$.

2.3 חלק III: מדידת מהירות הקלים בגזים שונים

לבסוף, עברנו למערכת הצינור האטום. הזמזם שידר פולס קצר מקצהו השמאלי של הצינור ומדדנו את ההפרעה הנקלטת במיקרופון כפונקציה של זמן. את זמן המעוף של האות חישבנו על ידי ממוצע הפרשי הזמנים בין החזרות של האות בתוך הצינור. הצבנו במשוואה 6 וקיבלנו את מהירות הקול. ביצענו תהליך זה שלוש פעמים בכל פעם עם גז שונה בצינור - אוויר אטמוספרי רגיל, הליום, ופחמן דו-חמצני.



איור 5: צג האוסילוסקופ בחלקו האחרון של הניסוי. הגרף הצהוב מציג את האות המשודר מהזמזם, ובגרף הירוק ניתן לראות את קליטות המיקרופון ואת החזרות האותר.

טבלה 2: מדידת מהירות הקול בגזים שונים לפי משוואה 6.

גז	מהירות הקול המדודה [m/s]
אוויר	346.90 ± 1.77
הליום	968.38 ± 5.03
פחמן דו-חמצני	275.27 ± 1.41

3 דיון

טבלה 3: השוואה בין מהירות הקול התיאורטית כפי שנתונה ע"י[1] משוואה 5 למהירות הקול שנמדדה עבור כל אחד מהגזים.

גז	מהירות הקול המדודה [m/s]	מהירות הקול התיאורטית [m/s]
אוויר	346.90 ± 1.77	345.31 ± 1.23
הליום	968.38 ± 5.03	1011.17 ± 3.05
פחמן דו-חמצני	275.27 ± 1.41	269.97 ± 1.04

בנוסף, מחלק II של הניסוי קיבלנו שמהירות הקול של האוויר היא $367.402 \pm 7.82\ \mathrm{m/s}$.
ניתן לראות שכאשר ניסינו לחשב את מהירות הקול באוויר בעזרת תלות הפרשי הפאזה במרחק שבו עבר הגל, לא קיבלנו חפיפה עם הערכים התיאורטיים. אנחנו מאמינים שהסיבה לשגיאה זו היא הפרעות חיצוניות בצורה של רעשים - ניסינו למנוע זאת בעזרת שימוש בתדירות שהמיקרופון קולט יותר טוב אך סביר להניח שזה באמת לא הביא אותנו למצב שבו רעש רקע זניח במדידותינו. הבעיה הזו פחות משפיעה במערכת הצינור כיוון שהיא אטומה יותר יחסית למערכת הניסוי הראשונית שעשינו בה שימוש. בניסוי מדדנו את מהירות הקול בגזים שונים ובשיטות שונות. בסך הכל התוצאות שקיבלנו קרובות לתוצאות הידועות מהספרות, וגם לאלו המחושבות לפי משוואת הגזים האידיאליים.
עם זאת, קיבלנו שגיאה גדולה יחסית במדידת מהירות הקול בהליום, כאשר המהירות שמדדנו נמוכה ב-4.23% מהערך הצפוי. המהירות שקיבלנו בפד"ח יצאה מעט גבוהה יותר מהערך המצופה. אנו משערים שזה קרה כי הליום הוא גז קל יחסית, מה שגרם לכך שהוא לא הצליח לדחוק את כל האוויר שמילא את הצינור לפני. המסה המולרית של האוויר גבוהה מזו של הליום, לכן אם הצינור מכיל גם אוויר אטמוספרי רגיל ולא רק הליום, נצפה לקבל מהירות נמוכה יחסית.
בפד"ח קיבלנו תוצאה הפוכה, עם מהירות **גבוהה** ב-1.96% אך צפויה גם היא. פד"ח **כבד** יותר מאוויר,

[1] עבור חישוב המהירות הקול התיאורטית ע"פ משוואה 5 התבססנו על טמפרטורה שנמדדה בעזרת מד-חום במהלך הניסוי, ועבור הקבועים התבססנו על המדידות של לאנג, א. (2016).

וסביר שנשארו שאריות אוויר כלשהן בצינור, שגרמו למהירות המדודה להיות מעט גבוהה יותר. עם זאת, הפד"ח הצליח לדחוק יותר מהאוויר החוצה יחסית להליום, לכן השגיאה כאן נמוכה יותר.

4 סיכום ומסקנות

אנו ראינו שאין חפיפה בין מהירות הקול באוויר שמדדנו במערכת הניסויית הראשונה. אנו משערים שתוצאה זו היא בשל רעשי רקע שגרמו להערכה שגויה של הפאזה במדידות. ראינו שלא מדדנו בצורה שמסכימה עם התאוריה את מהירות הקול בהליום ובפחמן דו-חמצני בעזרת המערכת הניסויית השנייה. אנו משערים שתוצאה זו היא בשל אוויר שדלף לתוך הצינור. קיבלנו תוצאות מדוייקות יותר יחסית לתאוריה עבור מהירות הקול באוויר בעזרת מערכת הניסויי השנייה, ולכן אנו יכולים להסיק ששיטה זו מדוייקת יותר למדידת ערך זה.

4.1 ניסויי המשך

כאמור, בהליום קיבלנו את שגיאת המדידה הגדולה ביותר. היינו רוצים לחזור על הניסוי במערכת בה נוכל לקבל אחוז הליום טהור גבוה יותר. אפשר למשל להשתמש בצינור אטום יותר או לחברו לאספקת הליום בלחץ גבוה יותר שיצליח לדחוף את האוויר החוצה.

בנוסף, מעניין לראות מה טווח הטמפרטורות בו משוואת הגזים האידיאליים תקפה. למשל, האם היינו יכולים להשתמש באותה נוסחה לחישוב מהירות הקול בצינור הנמצא בטמפרטורה הקרובה לאפס המוחלט, או בתוך לוע הר געש?

5 ביבליוגרפיה

1. Lange, Norbert A. (1967). Lange's Handbook of Chemistry (10th ed.). New York: McGraw Hill. p. 1524