

# גלים 83325

פרק 7 - גלים אורכיים-גלי קול

תוכן העניינים

1. גלי קול בצינור.....1

## גלי קול בצינור

## רקע

גל אורכי - תנועת המולקולות היא בכיוון ההתקדמות של הגל

$\psi(x, t)$  - פונקציית ההעתק של מולקולות הגז משיווי משקל.  $x$  מציין את מיקום המולקולות בשיווי משקל ולא את המיקום שלהן כתלות בזמן.

$\psi_p(x, t)$  - פונקציית הלחץ העודף access pressure

$\Delta\rho(x, t)$  - פונקציית השינוי בצפיפות

נקודת צומת בפונקציית ההעתק היא נקודת טבור בפונקציות הצפיפות והלחץ ולהפך

נוסחה מתרמו לקשר בין לחץ ונפח עבור גז אידיאלי בתהליך אדיאבטי:

$$PV^\gamma = const$$

הקשר בין פונקציית ההעתק לפונקציית הלחץ:

$$\frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{1}{\gamma P_0} \psi_p$$

$P_0$  - הלחץ בשיווי משקל

$\gamma$  - קבוע הקשור לסוג הגז מתוך משוואת הגז בתהליך אדיאבטי

מקדם האלסטיות של הגז

מקדם האלסטיות של הגז

$$B_a = \gamma P_0$$

משוואת הגלים:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = \frac{\rho_0}{\gamma P_0} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}$$

מהירות הגלים - מהירות הקול (לפעמים גם כתובה באות c):

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}}$$

באוויר בתנאים סטנדרטיים:  $v \approx 340 \text{ m/s}$

אותה המשוואה מתקיימת גם עבור  $\psi_p$  ו- $\Delta\rho$

הקשר בין הצפיפות לפונקציית ההעתק:

$$\Delta\rho = -\rho_0 \frac{\partial\psi}{\partial x}$$

עכבה של גל קול מישורי ליחידת שטח:

$$\frac{Z}{A} = \rho_0 v$$

$\rho_0$  - צפיפות המסה בשיווי משקל

A - שטח החתך של הצינור

v - מהירות הקול בחומר

האנרגיה הכוללת ליחידת אורך:

$$\varepsilon(x, t) = \frac{1}{2} A \rho_0 \left[ \left( \frac{\partial\psi}{\partial t} \right)^2 + v^2 \left( \frac{\partial\psi}{\partial x} \right)^2 \right] = A \rho_0 \left( \frac{\partial\psi}{\partial t} \right)^2$$

השוויון האחרון הוא עבור גלים נעים בלבד

אנרגיה פוטנציאלית וקינטית ממוצעת בזמן ליחידת אורך:

$$\bar{U}_{dx} = \bar{E}_{k_{dx}} = \frac{1}{4} \rho_0 A \omega^2 \psi_{max}^2$$

אנרגיה כוללת ממוצעת בזמן ליחידת אורך:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} \rho_0 A \omega^2 \psi_{max}^2$$

$\psi_{max}$  - האמפליטודה של פונקציית ההעתק - קבוע

$\omega$  - התדירות הזוויתית

הספק של גל קול נע (כמה אנרגיה עוברת דרך שטח חתך ביחידת זמן):

$$P(x, t) = \pm v \varepsilon(x, t)$$

כאשר הפלוס/מינוס הם עבור גל שנע בכיוון החיובי/שלילי בהתאמה  
(לא לבלבל עם P של לחץ)

עוצמה של הגל (ההספק ליחידת שטח):

$$I(x, t) = \frac{|P(x, t)|}{A} = v \rho_0 \left( \frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2$$

$$\bar{I} = \frac{1}{2} v \rho_0 \omega^2 \psi_{max}^2$$

מדידת עוצמה בסולם לוגריתמי:

$$I_a = I_0 \cdot 10^a$$

a - היא העוצמה ב B (בל)

$$I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

1B = 10 dB (זה דציבל)

עוצמה בגל כדורי:

$$I(r) = \frac{P}{4\pi r^2}$$

תנאי שפה בצינור:

- קצה סגור  $\psi = 0$  (כמו קצה קשור במיתר)
- קצה פתוח  $\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0 \Rightarrow \psi_P = 0$  (כמו קצה חופשי במיתר)

## שאלות

## (1) שיעור מעורר בחלל

אסטרונוט הנמצא במעבורת חלל יצא מהמעברות לבצע תיקון חיצוני. האסטרונוט לקח איתו שיעור מעורר וכיוון אותו לצלצל בשעה שבע בערב כך שיספיק לחזור לארוחת הערב בתוך המעבורת. האסטרונוט הניח את השיעור לידו בזמן שהוא מבצע את התיקון. האם האסטרונוט ישמע את השיעור מצלצל? רמז: בחלל אין אוויר.

## (2) מצאו פונקציית גל מנתונים על צפיפות

גל קול הרמוני נע בכיוון החיובי. האמפליטודה של השינוי בצפיפות האוויר של הגל היא  $A_{\Delta\rho} = 24 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ . התדירות של הגל היא  $500 \text{ Hz}$ . נתון גם כי  $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$  ו-  $v = 340 \text{ m/s}$ . מצאו מהי ההסטה משיווי משקל של מולקולות האוויר הנמצאות ב  $x = 15 \text{ cm}$  בזמן  $t = 0$ .

## (3) כמה אנרגיה עברה בשעה

העוצמה של גל קול מישורי היא  $I = 1.4 \mu \text{ W/cm}^2$ . חיישן בעל שטח חתך  $A = 3.6 \text{ cm}^2$  קולט את הגל. כמה אנרגיה קיבל החיישן כל שעה?

## (4) פי כמה גדלה העוצמה עבור שינוי של דציבל אחד

ראינו כי גידול של העוצמה ב 1B הוא גידול של פי 10 ביחידות של  $\text{W/m}^2$ . חשבו פי כמה גדלה העוצמה ביחידות של  $\text{W/m}^2$  עבור גידול של 1dB.

## (5) חישוב הפרעה בלחץ מעוצמה ממוצעת

נתון גל קול מישורי בתדירות  $12 \text{ kHz}$ . העוצמה הממוצעת בזמן של הגל היא  $\bar{I} = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2$ . הגל מתקדם בתווך בעל:  $P_0 = 0.7 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ ,  $\gamma = 1.48$ ,  $v = 340 \text{ m/sec}$ . מצאו ביטוי לשינוי בלחץ כתלות במיקום ובזמן אם ידוע שהגל הוא גל סינוס.

## 6) חישוב ירידה של העוצמה

מקור מייצר גל קול כדורי. חיישן בעל שטח חתך של  $0.2m^2$  ממוקם במרחק  $r_1 =$   
 $0.8m$  מהמקור ומודד הספק של  $P = 3mW$ .

א. מהי העוצמה של הגל במרחק  $r_1$  ?

ב. מהו ההספק של המקור?

ג. מה העוצמה של הגל במרחק  $r_2 = 1.2m$  ?

ד. מה ההספק שימדוד החיישון במרחק  $r_2$  ?

## 7) חליל בצליל לה

מה צריך להיות אורכו של חליל על מנת שהתנודה הבסיסית שלו תהיה הצליל לה  
 תדר  $440Hz$  ? הניחו שמהירות הקול היא  $340m/s$  ושניתן להתייחס לחליל  
 כצינור הפתוח בשני קצוותיו.

## 8) כמה תדירויות נמצאות בתחום השמיעה

צינור באורך של  $1m$  מרעיש כאשר הרוח נושבת. מהירות הקול היא  $340m/s$   
 א. אם הצינור פתוח בשני קצוותיו, כמה מתוך ההרמוניות שלו נמצאות בתחום  
 השמיעה? ( $20Hz - 20kHz$ )  
 ב. ציירו את החלק המרחבי של  $\psi_p$  עבור שלושת ההרמוניות הראשונות במקרה  
 שבו הצינור פתוח רק בצד אחד.

## 9) רזולוציית מדידה של עטלף

עטלפים משתמשים בגלי קול בשביל למפות את המרחב (בדומה ל"סונר"). נניח  
 כי עטלף שולח גלי קול אל חפץ מסוים ומודד את מיקומו ביחס אליו על ידי  
 מדידת הזמן שלוקח לגלי הקול לחזור אליו מהחפץ.

א. בהנחה שהעטלף והחפץ עומדים במקומם, מה צריכה להיות רזולוציית  
 המדידה של העטלף, כלומר מהו הזמן הכי קצר שהוא צריך למדוד, על מנת  
 לזהות חפץ הנמצא במרחק  $40cm$  ממנו?

ב. בהנחה שגודל החפץ הכי קטן שהעטלף מסוגל  
 לזהות הוא בסדר גודל של אורך הגל שהעטלף מייצר,  
 מה יהיה התדר אותו צריך העטלף לייצר על מנת  
 לזהות חפץ בגודל של  $1cm$  ? הניחו כי מהירות הקול  
 היא  $340m/s$



**10) ערכי RMS**

ערך RMS של פונקציה מחזורית בזמן בעלת זמן מחזור  $T$  מוגדר כ -

$$f_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\langle f^2 \rangle}$$

ההפרעה בלחץ בגל קול מישורי נתונה ביחידות פסקל לפי :

$$\psi_p(x, t) = 6 \cdot 10^{-6} \cos(kx - \omega t)$$

נתון גם ש :

$$P_0 = 0.8 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2, \gamma = 1.4, v = 340 \text{ m/sec}, \omega = 7000 \text{ rad/sec}$$

א. מהו אורך הגל?

ב. מהו ערך ה RMS של התנודות בלחץ?

ג. מהו ערך ה RMS של המהירות החומרית בגל?

ד. מהו הערך הממוצע בזמן של צפיפות האנרגיה הנפחית  $u = \frac{E}{V} = \frac{\epsilon}{A}$  ?

ה. מהו ההספק הממוצע בזמן הנקלט בגלאי בעל שטח של  $0.15 \text{ m}^2$  המאונך לכיוון התקדמות הגל?

**11) גל קול כדורי וערכי RMS**

מקור מייצר גל קול כדורי הרמוני בתדר  $500 \text{ Hz}$ . ערך ה RMS של הלחץ במרחק

$$P_0 = 10^5 \text{ N/m}^2, \gamma = 1.5, v = 330 \text{ m/sec}$$

א. מהו ערך ה RMS של הלחץ במרחק  $r_2 = 15 \text{ m}$  ?

ב. מהו ערך ה RMS של פונקציית ההעתק באותו המיקום ?

ג. מהו הערך הממוצע בזמן של צפיפות האנרגיה הנפחית  $u = \frac{E}{V} = \frac{\epsilon}{A}$  באותו מיקום?

**12) מוט ברזל מוחזק באמצע**

נתון מוט ברזל באורך  $L = 80 \text{ cm}$  ס"מ. מהירות הקול בברזל היא בערך  $4910 \text{ m/s}$ . מחזיקים את המוט במרכזו ונותנים לו מכה בנקודה הנמצאת באמצע בין נקודת האחיזה לקצה.

א. ציירו את הגל של תדירות הייסוד ושל ההרמוניה הראשונה וחשבו את התדירויות האלו.

ב. חזרו על סעיף א אם נקודת האחיזה הייתה במרחק  $\frac{1}{4}L$  מהקצה.

ג. היכן יש להחזיק את המוט בשביל להשמיע את שני הרזוננסים הבאים?

## תשובות סופיות

(1) לא

(2) 0.3mm

(3) 18,144J

(4) פי 1.26

$$\psi_p(x, t) = 0.123 \sin(222x - 75.4 \times 10^3 t) \quad (5)$$

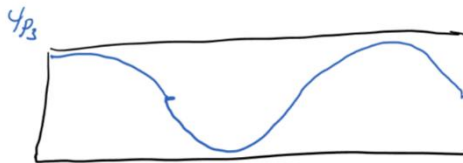
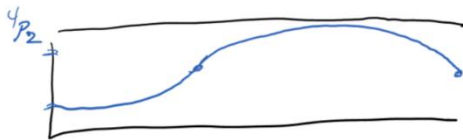
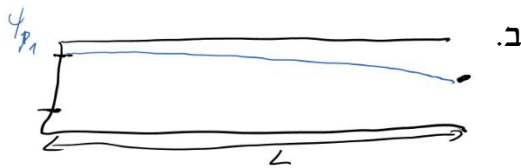
$$1.33 \text{ mW} \cdot \tau \quad 6.67 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2 \cdot \lambda \quad 0.121 \text{ W} \cdot \beta \quad 15 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2 \cdot t \quad (6)$$

(7) 0.39m

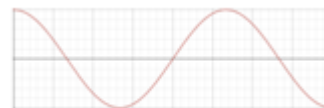
(8) א. 117

(9) א. 2.35mm ב. 34KHz

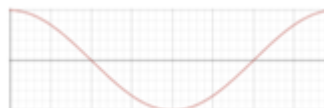
(10) א. 0.31 m

ב.  $4.24 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ ג.  $1.29 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ד.  $1.6 \times 10^{-15} \text{ J/m}^2$ ה.  $8.18 \times 10^{-14} \text{ W}$ (11) א.  $0.08 \text{ N/m}^2$ ב.  $5.6 \times 10^{-8} \text{ m}$ ג.  $4.3 \times 10^{-8} \text{ J/m}$ 

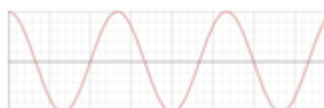
$$f_1 = 3069 \text{ Hz} \quad (12) \quad \text{א.}$$



$$f_2 = 9206 \text{ Hz}$$



$$f_1 = 6138 \text{ Hz} \quad \text{ב.}$$



$$f_2 = 18,413 \text{ Hz}$$

ג. עבור  $x=10\text{cm}$ ,  $n=4$  ועבור  $x=8\text{cm}$ ,  $n=5$