

מדחס בוכנה

רקע תיאורטי

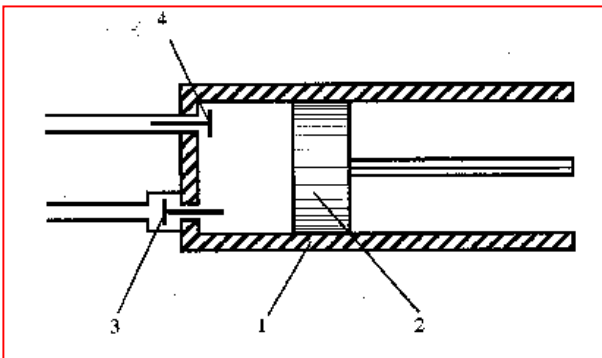
הגדרה

מדחס הנו מתקן המשמש להעלאת לחץ הגזים בתוכו. ישנם מספר סוגי מדחסים, אולם אנו נתייחס למדחס בוכנה חד דרגתי.

מבנה המדחס

המדחס כולל את המרכיבים הבאים:

- צילינדר חלול (1)
- בוכנה (2)
- שסתום פליטה (3)
- שסתום יניקה (4)



ניתוח תרמודינמי של התהליך

לשם בחינת התהליך עלינו להניח מספר הנחות המפשטות את הניתוח התרמודינמי:

הנחות עבור מדחס אידיאלי:

- כל התהליכים הפיכים פנימיים וכמו-כן אין חיכוך.
- היניקה כמו גם הפליטה נעשים בלחץ קבוע.
- הדחיסה וההתפשטות איזותרופים או איזותרמיים.
- נפח היניקה של הגז הטרי זהה לנפח מהלך הבוכנה, משמע למכפלת שטח חתך הבוכנה באורך המהלך.

הנחות עבור מדחס אידיאלי אמיתי:

- כל התהליכים הפיכים פנימיים וכמו-כן אין חיכוך.
- היניקה כמו גם הפליטה נעשים בלחץ קבוע.
- הדחיסה וההתפשטות פוליטרופים.
- נפח היניקה של הגז הטרי קטן מנפח מהלך הבוכנה.

במדחס אידיאלי אמיתי בתום תהליך הפליטה נשאר גז בלחץ גבוה הכלוא בנפח שבין הבוכנה לראש הצילינדר. נפח זה מכונה נפח שווא, V_c וערכו הנו 4% עד 10% מנפח המהלך. עם ירידת הלחץ, בתהליך ההתפשטות, נפח הגז הכלוא גדל כך שבעת פתיחת שסתום היניקה הוא V_c , ולכן נפח הגז הטרי הנכנס לצילינדר קטן מסה"כ נפח הצילינדר.

משוואת תרמודינמיות המייצגות את התהליך הדחיסה:החוק הראשון של התרמודינמיקה עבור נפח בקרה הנגזר:

$$\dot{Q}_{c.v} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) = \frac{dE_{c.v}}{dt} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) + \dot{W}_{c.v}$$

אל המדחס נוכל להתייחס בקירוב טוב כאל נפח בקרה אשר לו כניסה אחת ויציאה אחת. מאחר ונפח הבקרה נייח ביחס למערכת קואורדינטות, ומצב המסה בכל נקודה בנפח הבקרה קבוע בזמן (משמע: $\frac{dm_{c.v}}{dt} = 0$, $\frac{dE_{c.v}}{dt} = 0$), נוכל להתייחס לתהליך כאל Steady State Steady Flow – SSSF המקיים את המשוואה הבאה:

$$\dot{Q}_{c.v} + \dot{m}_i h_i = \dot{m}_e h_e + \dot{W}_{c.v}$$

החוק השני של תרמודינמיקה עבור נפח בקרה הנגזר:

$$\frac{dS_{c.v}}{dt} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum_{c.v} \frac{\dot{Q}_{c.v}}{T}$$

בתהליך הדחיסה, תהליך הפיך מסוג SSSF בעל כניסה ויציאה אחת, ניתן לרשום את החוק השני באופן הבא:

$$\dot{m}_e s_e - \dot{m}_i s_i = \frac{\dot{Q}_{c.v}}{T}$$

מהצבת החוק השני בחוק הראשון מתקבל:

$$\dot{W}_{c.v} = \dot{m}(Tds - dh)$$

מאחר שבגזים אידיאליים מתקיים הקשר הבא:

$$Tds = dh - vdp$$

נקבל את המשוואה הבאה:

$$W = \int VdP$$

כלומר העבודה מבוטאת כשטח תחת דיאגרמת P-V.

נציין כי עבודה המושקעת בנפח הבקרה כמו גם חום הנפלט מנפח הבקרה מוגדרים שליליים. על כן עבודת הדחיסה שלילית.

פיתוח משוואת עבודת הדחיסה בתנאים שונים:

אוויר, גז אידיאלי, מקיים את משוואת הגזים האידיאליים:

$$PV = mRT$$

נשתמש בקשר זה למציאת משוואת העבודה השונות.

העבודה שיש להשקיע בדחיסה איזותרמית:

$$PV = \text{const}$$

$$W = -m \int \frac{RT}{P} dP = -mRT \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) = P_1 V_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$$

העבודה שיש להשקיע בדחיסה איזותרמית (תהליך אדיאבטי הפיך):

$$PV^k = \text{const}$$

$$W = -m \int \frac{P^{\frac{1}{k}} V}{P^{\frac{1}{k}}} dP = -m P^{\frac{1}{k}} V \int_1^2 \frac{1}{P^{\frac{1}{k}}} dP = -m \frac{kRT_1}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

העבודה שיש להשקיע בדחיסה פוליטרופית:

$$PV^n = \text{const}$$

$$W = -m \int \frac{P^{\frac{1}{n}} V}{P^{\frac{1}{n}}} dP = -m P^{\frac{1}{n}} V \int_1^2 \frac{1}{P^{\frac{1}{n}}} dP = -m \frac{nRT_1}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

בהסתמך על דיאגרמת P-V עבור מדחס אידיאלי, ניתן לראות כי העבודה שיש להשקיע בדחיסה איזותרמית היא הקטנה ביותר.

קשרים בתהליך פוליטרופי:

מתוך הגדרת התהליך הפוליטרופי, ומשוואת הגזים האידיאליים:

$$PV^n = \text{const}$$

$$PV = mRT$$

מתקבלים הקשרים הבאים:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}$$

עבור שני מצבים ידועים:

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

$$\Downarrow$$

$$\ln P_1 + n \ln V_1 = \ln P_2 + n \ln V_2$$

$$n(\ln V_1 - \ln V_2) = \ln P_2 - \ln P_1$$

$$n \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) = \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$n = \frac{\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}{\ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right)} = \frac{\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}{\ln \left[\frac{\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n}{\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}} \right]} = \frac{\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}{\ln \left[\frac{\left(\frac{P_2}{P_1} \right)}{\left(\frac{T_2}{T_1} \right)} \right]}$$

מקדם הפוליטרופה, עבור תהליך פוליטרופי בו חומר העבודה הנו גז אידיאלי, הנו:

$$n = \frac{\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}{\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) - \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)}$$

שאלות הכנה

בהתבסס על הקשרים התרמודינמיים שהוצגו, מצאו את התלות בין הפרמטרים הבאים:

בין n , מקדם פוליטרופי, ל- P_2 , לחץ הפליטה.

בין \dot{V}_{TP} , נפח הגז הטרי הנכנס בתנאי סביבה, ל- P_2 , לחץ הפליטה.

בין η_v , הנצילות הנפחית, ל- P_2 , לחץ הפליטה.

בין $\frac{\dot{W}}{\dot{W}_T}$, היחס בין הספק המדחס האיזותרמי להספק המדחס הפוליטרופי, ל- P_2 , לחץ הפליטה.

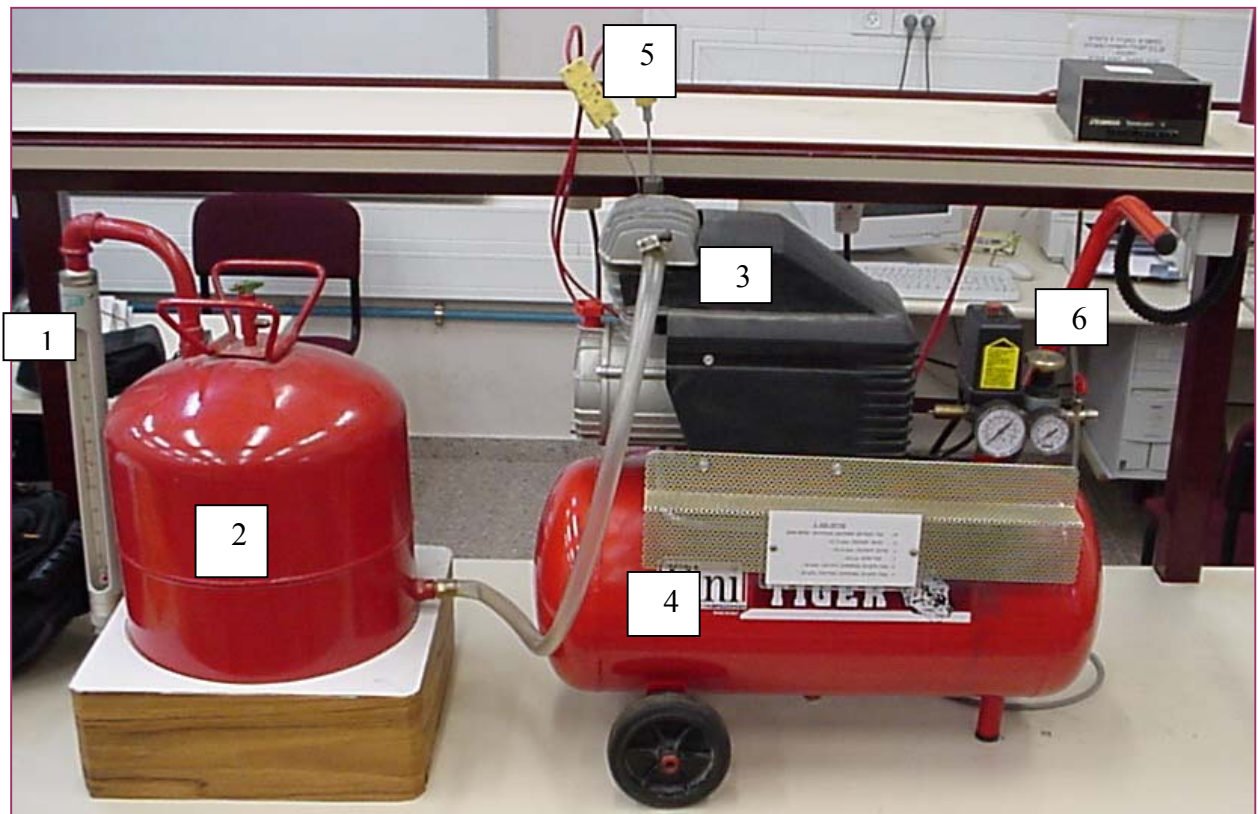
עם עליית לחץ הפליטה, P_2 , כיצד ישתנו n , \dot{V}_{TP} , η_v ו- $\frac{\dot{W}}{\dot{W}_T}$?

הניסוי

מטרת הניסוי

הכרת עקרונות הפעולה של מדחס בוכנה חד דרגתי. מציאת הפרמטרים העיקריים המשפיעים על פעולת המדחס, ובדיקת השתנותם כתלות בלחץ הפליטה.

תאור מערכת הניסוי



מערכת הניסוי מורכבת מהחלקים הבאים:

- רוטמטר (מד ספיקה נפחית). (1)
- מיכל שיכוך. (2)
- מדחס חד בוכנתי. (3)
- מיכל לחץ. (4)
- מד טמפרטורה. (5)
- וסת לחץ (מנומטר). (6)

תיאור התהליך

הניסוי מבוצע על מדחס חד דרגתי מקורר אויר. מהירותו הסיבובית כמו גם מהלך הבוכנה, שטח חתכה, ונפח השווא נתונים. בשלב היניקה, בשל לחץ היניקה הנמוך מעט מלחץ הסביבה, אוויר החדר נכנס למערכת.

תוך כדי מעברו למדחס, נמדדת ספיקתו המסית על ידי הרוטמטר. כיוול הרוטמטר הנו באחוזים, כך ש 100% מייצג ספיקה של $170 \left[\frac{l}{min} \right]$.

מהירות האוויר בכנסה למדחס מוקטנת באמצעות שימוש במיכל שיכוך. בעזרת שימוש בוסת הלחץ ניתן לקבוע את הלחץ במיכל. בשלב הפליטה אויר נפלט מהמדחס חזרה לחדר בשל הפרש לחצים בין המדחס למיכל הלחץ. הפרשי הלחצים ביניקה ובפליטה מתאפשר הודות לשסתומי הפליטה והיניקה במדחס.

מהלך הניסוי

1. הפעילו את המדחס.
2. המתינו מספר דקות להתייצבות.
3. שנו את הלחץ במיכל על ידי שימוש בוסת הלחץ.
4. קראו ורשמו את הלחץ במנומטר ואת הערכים המתקבלים ברוטמטר ובמד הטמפרטורה המוצב ביציאה מהמדחס.
5. חזרו מספר פעמים על הפעולה עם שינוי לחץ המיכל.

מספר מדידה	$P_{\tan k} [bar]$ לחץ המיכל	$\dot{V}[\%]$ ספיקה נפחית בכניסה	$T_2 [^{\circ}C]$ טמפרטורת פליטה
1	2		
2	3		
3	4		
4	5		

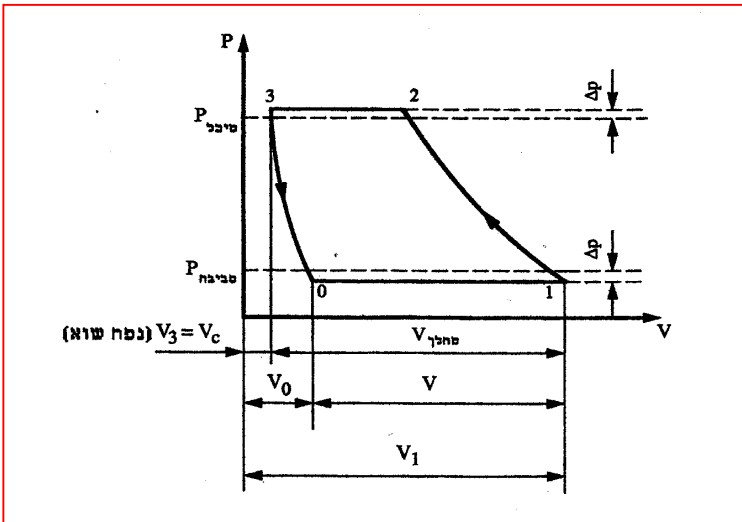
נתונים נוספים:

הערך	הפרמטר
	$T_1 [^{\circ}C]$ - טמפרטורת הסביבה
	$\omega [rpm]$ - מהירות סיבובית של ציר המדחס
	$D [cm]$ - קוטר הבוכנה
	$L [cm]$ - אורך מהלך הבוכנה
	$\Delta P [kPa]$ - מפל הלחץ בשסתומי היניקה והפליטה
	$V_c [cc]$ - נפח שווא

עיבוד תוצאות

1. רשמו את מטרת הניסוי.
2. רשמו את הנוסחאות הבאות בצורתן הפרמטרית והציגו דוגמת חישוב מפורטת בהתבסס על תוצאות המדידה הראשונה. אנא הקפידו על בדיקת ורישום היחידות.

הנוסחאות הבאות מבוססות על הסכימה הבאה, דיאגרמת PV במדחס אידיאלי אמיתי בו תהליך הדחיסה וההתפשטות פוליטרופי.



מצב 1 מוגדר כיניקה, מצב 2 כפליטה.

א. לחץ היניקה:

לחץ היניקה נמוך מעט מלחץ הסביבה, בשל מפל הלחץ בשסתום היניקה, על כן:

$$P_1 = P_0 - \Delta P \quad [kPa]$$

ב. לחץ הפליטה:

לחץ הפליטה גבוה מעט מלחץ המיכל, בשל מפל הלחץ בשסתום הפליטה, על כן:

$$P_2 = P_{\text{tan } k} + \Delta P \quad [kPa]$$

ג. מקדם הפוליטרופה:

מתוך הפיתוח שנעשה ברקע התיאורטי:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) - \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}$$

ד. מציאת V_0 :

להזכירכם, בתום תהליך הפליטה נותר גז הכלוא בין הבוכנה לראש הצילינדר. בסיום תהליך הפליטה ועד תחילת תהליך היניקה, משמע בתהליך ההתפשטות הפוליטרופית, השסתומים סגורים. לכן מסת הגז הכלוא נשארת קבועה, אולם בשל ירידת הלחץ, נפח הגז הכלוא גדל. תהליך ההתפשטות הנו פוליטרופי על כן מתקיים הקשר הבא:

$$P_2 V_c^n = P_1 V_0^n$$

$$\Downarrow$$

$$V_0 = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} V_c \quad [cc]$$

ה. נפח הצילינדר, V_1 :

נפח הצילינדר הנו נפח המהלך בתוספת נפח השווא.

$$V_1 = V_c + \frac{\pi D^2}{4} \cdot L \quad [cc]$$

ו. נפח הגז הטרי המחושב, V_{cal} :

בשלב היניקה נכנס גז טרי למערכת הניסוי. נפח זה מוגבל בשל קיום V_0 .

$$V_{cal} = V_1 - V_0 \quad [cc]$$

ז. נפח הגז הטרי המחושב, בתנאי סביבה, V_{TP-cal} :

נפח הגז הטרי, כפי שחושב בסעיף הקודם V_{cal} מתקבל עבור מצב יניקה, בו הלחץ והטמפרטורה שונים במקצת מאלו הקיימים בסביבה. כדי שנוכל להשוות בין הספיקה הנפחית של הגז הטרי שנמדדה בניסוי בתנאי סביבה ($\dot{V}[\%]_{exp}$), לבין הספיקה המחושבת באותם תנאים (\dot{V}_{TP-cal}) עלינו למצוא את ערכו של V בתנאי סביבה (V_{TP-cal}). מאחר שהאוויר הנו גז אידיאלי, הוא מקיים את משוואת הגזים האידיאליים:

$$PV = mRT$$

נוכל להשוות בין שני המצבים הבאים:

מצב ראשון – מצב היניקה בו הלחץ הנו לחץ היניקה P_1 , ונפח הגז הטרי כפי שחושב הנו V .

מצב שני – יניקה בתנאי סביבה, משמע P_0 , ונפח הגז הטרי V_{TP} .

נניח כי שינוי הטמפרטורה בין המצב הראשון לשינוי זניחה, על כן:

$$P_0 V_{TP-cal} = P_1 V_{cal}$$

$$\Downarrow$$

$$V_{TP-cal} = \frac{P_1}{P_0} V_{cal} \quad [cc]$$

ח. הספיקה הנפחית המחושבת של הגז הטרי, בתנאי סביבה, \dot{V}_{TP-cal} :

הספיקה הנפחית תתקבל על ידי הכפלת נפח הגז הטרי הנכנס בכל מחזור במספר הפעמים שהמדהס מבצע את המחזור בדקה.

$$\dot{V}_{TP-cal} = V_{TP-cal} \cdot \omega \quad \left[\frac{l}{\min} \right]$$

ט. הספיקה המדודה, בתנאי סביבה, \dot{V}_{TP-exp} :

$$\dot{V}_{TP-exp} = \dot{V}[\%] \times \frac{170[l/min]}{100[\%]} \quad [l/min]$$

י. הנצילות הנפחית, η_v :

הנצילות הנפחית מוגדרת כיחס בין נפח הגז הטרי שנכנס למדחס לבין נפח המהלך.

$$\eta_v = \frac{V}{V_1 - V_c}$$

יא. הספק המדחס, \dot{W} :

הספק המדחס יתקבל על ידי הכפלת עבודת המדחס במהירותו הסיבובית של המדחס. תהליך הדחיסה הנו פוליטרופי, על כן:

$$\dot{W} = \frac{n}{n-1} P_1 \dot{V}_{TP-exp} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad [kW]$$

יב. הספק המדחס האיזותרמי, \dot{W}_T :

הספק המדחס אילו התהליך היה איזותרמי.

$$\dot{W}_T = P_1 \dot{V}_{TP-exp} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad [kW]$$

3. השתמשו בתוכנת Excel לשם חישוב הנוסחאות עבור יתר המדידות.

4. הציגו את התוצאות בטבלה מסודרת.

5. בעזרת תוכנת Excel הציגו את הגרפים הבאים:

\dot{V}_{TP-cal} ו \dot{V}_{TP-exp} כפונקציה של P_2

n כפונקציה של P_2

$\frac{\dot{W}}{\dot{W}_{TP}}$ כפונקציה של P_2

6. רשמו את מסקנותיכם בהסתמך על הגרפים. יש לבסס מסקנות אלו על ידי שימוש בנוסחאות המתאימות.

עבודה מהנה !!!

ביבליוגרפיה

Sonntag, Borgnakke & Van Wylen, F Fundamentals of Thermodynamics, John Wiley, 1998

העשרה:

<http://www.csupomona.edu/~physics/demo/thermody.html>

<http://www.talkorigins.org/faqs/thermo/probability.html>

http://www.danfoss.com/compressors/technical_information/technical_information_index.htm