

מערכות תעופה ב'

שתי יחידות לימוד

הוראות לנבחן

א. משך הבחינה: שלוש שעות.

ב. מבנה השאלון ומפתח ההערכה: בשאלון זה שלושה פרקים:

פרק ראשון: אווירודינמיקה

פרק שני: תרמודינמיקה

פרק שלישי: מנועים

יש לענות על חמש שאלות. לכל שאלה – 20 נקודות, ובסך-הכול – 100 נקודות.

ג. חומר עזר מותר לשימוש: נוסחאון בית-ספרי, כלי סרטוט, מחשבון.

ד. הוראות מיוחדות:

1. עיין בשאלון, הכר את חלקיו, ורק אז ענה על השאלון בסדר הנראה לך.

2. בכל שאלה ניתנו הנתונים לפתרונה. אם לדעתך חסר נתון, הוסף אותו על-פי שיקול דעתך ופתור בעזרתו את השאלה. רשום בתשובתך את הנתון שבחרת להוסיף.

3. אם מספר השאלות שהספקת לפתור עולה על הנדרש, אינך צריך לבחור את התשובות שייבדקו. המעריך יבדוק את כל המבחן ויבחר את התשובות הטובות ביותר, לפי מספר שאלות החובה.

4. בתשובה לשאלה חישובית, עליך להציג את שלבי הפתרון באופן מפורט ולהסבירם בקצרה. קבלת מרב הנקודות מותנית במילוי דרישה זו.

בשאלון זה 8 עמודים ו-6 עמודי נספחים.

ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר, אך מכוונות הן לנבחנות והן לנבחנים.

בהצלחה!

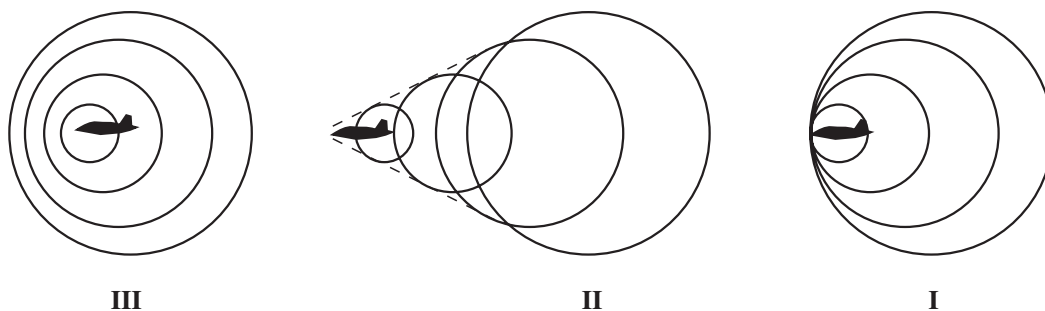
השאלות

יש לענות על חמש שאלות (לכל שאלה – 20 נקודות).

פרק ראשון: אווירודינמיקה

שאלה 1

באיור לשאלה זו מתוארים שלושה מצבים (III-I) של התפשטות של גלי לחץ (גלי קול) ביחס למטוס הטס במהירויות שונות.

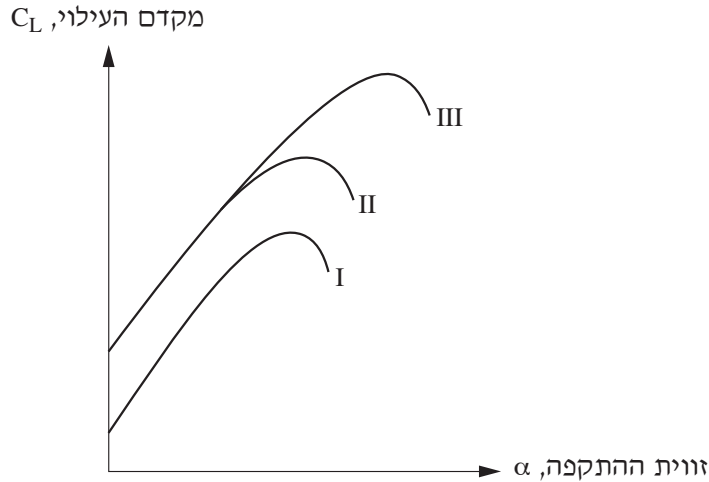


איור לשאלה 1

- א. קבע באיזו מהירות טיסה (מהירות תת-קולית, מהירות קולית ומהירות על-קולית) טס המטוס בכל אחד מן האיורים III-I.
- ב. הסבר כיצד נוצר גל הלם ניצב. ציין באיזו מהירות טיסה הוא נוצר.
- ג. הסבר את המונח "מספר מאך קריטי".

שאלה 2

באיור לשאלה זו נתונים שלושה גרפים (I, II ו-III) המתארים את מקדם העילוי, C_L , כפונקציה של זווית ההתקפה.



איור לשאלה 2

- א. 1. איזה גרף מתאר מקדם עילוי של כנף בלבד?
2. איזה גרף מתאר מקדם עילוי של כנף בעלת מדף?
3. איזה גרף מתאר מקדם עילוי של כנף בעלת מדף ובעלת כנפון קדמי? נמק את תשובתך.
- ב. באילו שלבים בטיסה משתמשים באמצעים להגברת העילוי (מדף וכנפון קדמי) ומדוע?

שאלה 3

א. באיור לשאלה זו נתון תיאור סכמתי של מערבולות אוויר הנוצרות בקצות הכנף של המטוס. הסבר מדוע נוצרות מערבולות אוויר בקצות הכנף.



איור לשאלה 3

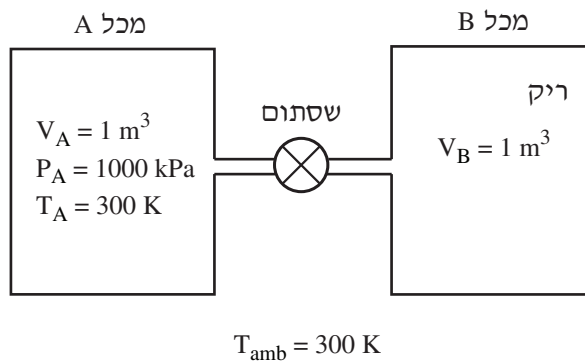
- ב. הסבר כיצד משפיעות מערבולות האוויר בקצות הכנף על הגרר של הכנף.
- ג. ציין את שמו של אמצעי **אחד** המסייע להקטנת מערבולות האוויר בקצות הכנף.
- ד. ציין סיבה **אחת** לכך שכנף בעלת מנת ממדים גבוהה יעילה יותר מכנף בעלת מנת ממדים נמוכה.

פרק שני: תרמודינמיקה**שאלה 4**

באיור לשאלה זו מתוארת מערכת הכוללת שני מכלים קשיחים, מכל A ומכל B. נפח כל מכל הוא 1 m^3 . המכלים מחוברים ביניהם באמצעות שסתום. הזנח את נפח הצינור המחבר בין המכלים. במכל A יש אוויר בלחץ 1000 kPa בטמפרטורת הסביבה (300 K). במכל B שורר ריק (ואקום).

פותחים את השסתום ומאפשרים לאוויר לזרום בין המכלים עד שהזרימה נפסקת. במצב זה הלחץ בשני המכלים זהה וטמפרטורת האוויר בשני המכלים שווה לטמפרטורת הסביבה.

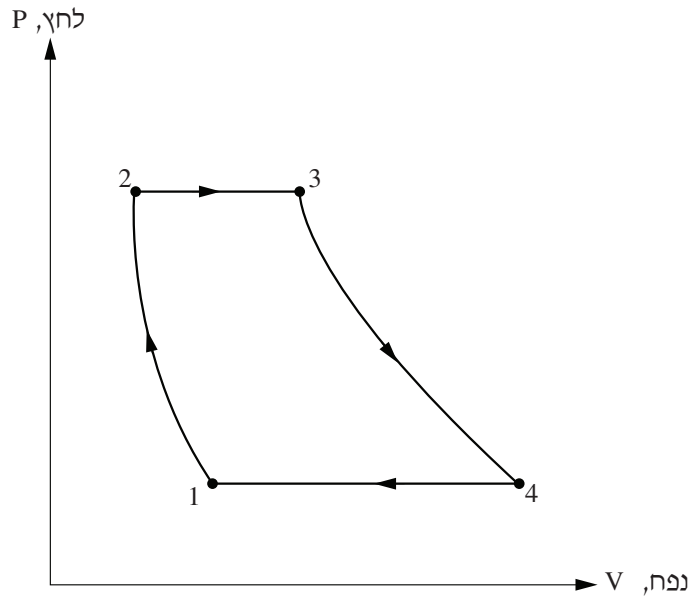
קבוע הגז של האוויר הוא $R = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

**איור לשאלה 4**

- א. חשב את מסת האוויר במכל A לפני פתיחת השסתום ואת המסה הסגולית של האוויר.
- ב. חשב את הלחץ הסופי במערכת, עם סיום התהליך, זמן רב לאחר פתיחת השסתום.
- ג. מהו השינוי שחל באנרגיה הפנימית של האוויר בין המצב הסופי לבין המצב ההתחלתי של התהליך? הסבר את תשובתך.
- ד. הסתמך על החוק הראשון של התרמודינמיקה, וענה על השאלות שלהלן.
 1. האם המערכת מבצעת עבודה? נמק את תשובתך.
 2. האם היה מעבר חום אל המערכת או ממנה בזמן התהליך? נמק את תשובתך.

שאלה 5

באיור לשאלה זו מתואר מחזור ברייטון אידיאלי במישור P-V (לחץ-נפח).



איור לשאלה 5

נתונים

- הגז הפועל במחזור הוא אוויר.
 - ספיקת האוויר במחזור היא $\dot{m} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$
 - יחס הלחצים של המחזור הוא 10.
 - $T_3 = 1,400 \text{ K}$, $T_2 = 580 \text{ K}$
 - מקדם החום הסגולי של הגז בלחץ קבוע הוא: $C_p = 1,004.5 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
 - היחס בין מקדם החום הסגולי בלחץ קבוע ובין מקדם החום הסגולי בנפח קבוע הוא $\gamma = 1.4$.
- א. ציין אילו תהליכים מתרחשים בין הנקודות המסומנות באיור: 1→2, 2→3, 3→4, ו-4→1. ציין לגבי כל אחד מן התהליכים אם במהלכו נקלט חום או נפלט חום.
- ב. חשב את הנצילות התרמית של המחזור.
- ג. חשב את ההספק של החום הנקלט במחזור.
- ד. חשב את הספק המחזור.

שאלה 6

מנוע חום קולט חום בשיעור 600 kJ ממקור חום בטמפרטורה גבוהה של 1,000 K .
המנוע הופך 150 kJ מהחום לעבודה, ופולט חום לסביבה בטמפרטורה של 300 K .

- א. כמה חום נפלט לסביבה? נמק את תשובתך.
ב. בדוק על-פי עקרון מנוע קרנו אם המנוע מקיים את החוק השני של התרמודינמיקה.

פרק שלישי: מנועים

שאלה 7

להלן כמה נתונים של מנוע טורבו סילון הפועל במטוס הטס בגובה 10 km , בתנאי אטמוספירה סטנדרטית:

- מהירות הטיסה: $240 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$
- ספיקת האוויר: $230 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$
- ספיקת הדלק: $0.43 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$
- מהירות פליטת הגזים ביציאה מנחיר הפליטה: $337 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$
- הלחץ הסטטי במישור היציאה מנחיר הפליטה: $0.2642 \times 10^5 \text{ Pa}$
- שטח חתך היציאה של נחיר הפליטה: 2.35 m^2

א. האם נחיר הפליטה מתואם בגובה הטיסה? נמק את תשובתך.

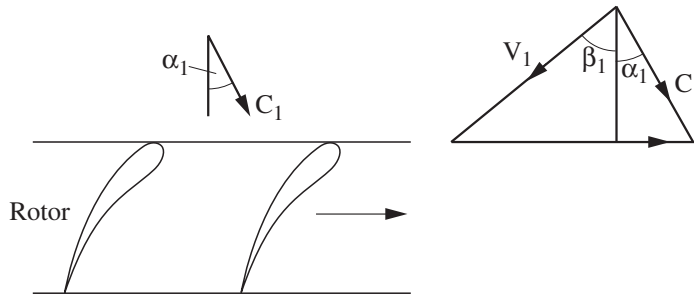
ב. חשב את דחף המנוע בגובה הטיסה.

ג. חשב את תצרוכת הדלק הסגולית של המנוע.

שאלה 8

- א. דרגת מדחס בנויה משני חלקים: רוטור וסטטור. תאר את תפקידו של כל אחד מהחלקים.
 - ב. הסבר מהי תופעת הזדקרות מדחס.
 - ג. ציין שתי שיטות למניעת הזדקרות מדחס.
 - ד. באיור לשאלה זו מתוארים להבי רוטור וכיוון סיבוב הרוטור. כמו כן מתואר באיור משולש המהירויות בכניסה לרוטור.
- C_1 – המהירות המוחלטת של האוויר בכניסה לרוטור.
 α_1 – הזווית המוחלטת של מהירות האוויר בכניסה לרוטור.

הסבר מה מייצגים V_1 ו- β_1 המסומנים באיור.



איור לשאלה 8

שאלה 9

- קבע לגבי כל אחד מן ההיגדים שלהלן אם הוא נכון או לא נכון. נמק בקצרה את קביעתך.
- א. במנוע סילון, תפקיד הטורבינה הוא להעלות את לחץ הגזים העוברים דרכה.
 - ב. בכל מנועי הטורבו־מניפה, אין קירור ללהבי הטורבינה.
 - ג. מהירות הזרימה בצוואר נחיר הפליטה, כאשר הנחיר חנוק, שווה למהירות הקול.
 - ד. במנוע טורבו־מניפה בעל שני צירים, טורבינת הלחץ הנמוך מניעה את המניפה.

בהצלחה!

נספח א': נוסחאון למערכות תעופה (5 עמודים)

לשאלונים 853101, 853201, קיץ תשע"ח תרמודינמיקה

הגדרת משתנים

P [Pa]	-	לחץ הגז
V [m ³]	-	נפח הגז
m [kg]	-	מסת הגז
$M \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$	-	המסה המולקולרית של הגז
r	-	יחס דחיסה במחזור תרמודינמי
r _c	-	יחס הפסקה במחזור דיזל
T [K]	-	טמפרטורה
T _H [K]	-	הטמפרטורה הגבוהה במחזור קרנו
T _L [K]	-	הטמפרטורה הנמוכה במחזור קרנו
$C_V \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	-	קיבול חום סגולי בנפח קבוע
$C_P \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	-	קיבול חום סגולי בלחץ קבוע
Q [J]	-	החום המסופק למערכת או נפלט ממנה
$R \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	-	קבוע הגז
W [J]	-	העבודה המופקת מן המערכת או מושקעת בה
W > 0	-	כאשר המערכת מפיקה עבודה
$q_{in} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$	-	החום המסופק ליחידת מסה
$q_{out} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$	-	החום הנפלט ליחידת מסה
$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	-	צפיפות או מסה סגולית
γ	-	יחס קיבולי חום סגוליים

קבועים ויחסי המרה בין יחידות

$$1 \text{ bar} = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ BTU} = 252 \text{ cal}$$

$$1 \text{ cal} = 4.185 \text{ J (Joule)}$$

$$T [\text{K}] = T [^{\circ}\text{C}] + 273.15$$

קבוע הגזים האוניברסלי

$$R_u = 8314.5 \left[\frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right]$$

קבועי האוויר

$$C_p = 1004.5 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$C_v = 717.5 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$M = 28.97 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$$

$$R = 287.05 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

צפיפות או מסה סגולית

$$R = \frac{\bar{R}}{M}$$

קבוע הגז

$$P = \rho RT \text{ או } PV = mRT$$

משוואת המצב של גזים אידאליים

$$C_P - C_V = R$$

$$C_P = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$$

מקדם קיבול החום הסגולי בלחץ קבוע

$$C_V = \frac{R}{\gamma - 1}$$

מקדם קיבול החום הסגולי בנפח קבוע

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

יחס קיבולי החום

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

בתהליך כללי (פוליטרופי)

$$n = 0$$

בתהליך איזוברי

$$n = 1$$

בתהליך איזותרמי

$$n = \gamma$$

בתהליך אדיאבטי

$$n = \infty$$

בתהליך איזוכורי

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

בתהליך פוליטרופי שהמעריך שלו הוא n

עבודה המופקת ממערכת העוברת ממצב 1 למצב 2

$$W = \begin{cases} \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{n-1} = \frac{P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right]}{n-1} & n \neq 1 \\ P_1 V_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) & n = 1 \end{cases}$$

$$Q = m \cdot C_P \cdot (T_2 - T_1)$$

מעבר חום בלחץ קבוע

$$Q = m \cdot C_V \cdot (T_2 - T_1)$$

מעבר חום בנפח קבוע

$$\Delta U = m \cdot C_V \cdot (T_2 - T_1)$$

שינוי האנרגיה הפנימית בגז אידאלי

$$\Delta U = Q - W$$

החוק הראשון של התרמודינמיקה

$$W = q_{in} - q_{out}$$

עבודה המופקת במחזור ליחידת מסה

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_{in}}$$

הנצילות של מחזור תרמודינמי

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

הנצילות של מחזור ברייטון

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

הנצילות של מחזור אוטו

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \left[\frac{r_c^{\gamma-1}}{\gamma(r_c-1)} \right]$$

הנצילות של מחזור דיזל

$$\eta_{th} = \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

הנצילות של מחזור קרנו

מדחפים

$$PW_P = \frac{T \cdot V_o}{\eta_p}$$

ההספק הדרוש להנעת מדחף

T – כוח הדחף

V_o – מהירות הטיסה

η_p – נצילות המדחף

מנועים

דחף נטו של מנוע טורבו-סילון		$F = \dot{m}_a [(1 + f)V_e - V_0] + (P_e - P_{amb})A_e$
ספיקת האוויר	-	$\dot{m}_a \left[\frac{\text{kg}}{\text{sec}} \right]$
יחס דלק-אוויר	-	$f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{\text{ספיקת הדלק}}{\text{ספיקת האוויר}}$
מהירות הפליטה של הגזים מהנחיר	-	$V_e \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$
מהירות הטיסה	-	$V_o \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$
לחץ סטטי במישור היציאה מנחיר הפליטה	-	$P_e \text{ [Pa]}$
לחץ הסביבה	-	$P_{amb} \text{ [Pa]}$
שטח היציאה של נחיר הפליטה	-	$A_e \text{ [m}^2\text{]}$
תצרוכת דלק סגולית	-	$\text{TSFC} \left[\frac{\text{kg}}{\text{N} \cdot \text{sec}} \right]$

דחף נטו של המנוע כאשר ההתפשטות בנחיר הפליטה היא מלאה (נחיר מתואם $(P_e = P_{amb})$):

$$F_N = \dot{m}_a [(1 + f)V_e - V_o]$$

דחף נטו של המנוע כאשר ספיקת הדלק זניחה ביחס לספיקת האוויר, $f \ll 1$, ונחיר הפליטה מתואם:

$$F_N = \dot{m}_a (V_e - V_o)$$

$$\text{TSFC} = \frac{\dot{m}_f}{F_N} \quad \text{תצרוכת דלק סגולית:}$$

אווירודינמיקה

A	-	שטח החתך
ρ	-	צפיפות או מסה סגולית
v	-	מהירות
P	-	לחץ
P_0	-	לחץ עצירה
b	-	מוטת הכנף

$\bar{c}$	-	מיתר ממוצע של הכנף
α	-	זווית התקפה
α_{0L}	-	זווית התקפה ללא עילוי
S	-	שטח
C_D	-	מקדם הגרר
μ	-	צמיגות דינמית
γ	-	זווית קונוס מאך

חוק הרציפות $r \cdot v \cdot A = \text{const.}$

חוק ברנולי לזרימה אופקית $P + \frac{1}{2} \rho v^2 = P_0 = \text{const.}$

מהירות הקול באוויר $a = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \cong 20 \sqrt{T}$

מספר מאך $M = \frac{v}{a}$

מספר ריינולדס $R_c = \frac{\rho \cdot v \cdot \bar{c}}{\mu}$

שטח הכנף $S = b \bar{c}$

מנת הממדים $AR = \frac{b^2}{S}$

מקדם העילוי $C_L = C_{La} (\alpha - \alpha_{0L})$

כוח העילוי $L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L$

כוח הגרר $D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D$

סינוס זווית קונוס מאך $\sin \gamma = \frac{1}{M}$

נספח ב': טבלת אטמוספירה סטנדרטית

לשאלונים 853201, 853101, קיץ תשע"ח

גובה מעל פני-הים	טמפרטורת האוויר	מהירות הקול	לחץ האוויר	צפיפות האוויר	צמיגות האוויר
h	T	a	P	ρ	μ
(km)	(°C)	(m / sec)	(Pa) (N / m ²)	(kg / m ³)	(kg / m · sec)
0	15.0	340	1.0132×10^5	1.226	1.780×10^{-5}
1	8.5	336	0.8987×10^5	1.112	1.749×10^{-5}
2	2.0	332	0.7948×10^5	1.007	1.717×10^{-5}
3	-4.5	329	0.7010×10^5	0.909	1.684×10^{-5}
4	-11.0	325	0.6163×10^5	0.820	1.652×10^{-5}
5	-17.5	320	0.5400×10^5	0.737	1.619×10^{-5}
6	-24.0	316	0.4717×10^5	0.660	1.586×10^{-5}
7	-30.5	312	0.4104×10^5	0.589	1.552×10^{-5}
8	-37.0	308	0.3558×10^5	0.526	1.517×10^{-5}
9	-43.5	304	0.3073×10^5	0.467	1.482×10^{-5}
10	-50.0	299	0.2642×10^5	0.413	1.447×10^{-5}
11	-56.5	295	0.2261×10^5	0.364	1.418×10^{-5}
12	-56.5	295	0.1932×10^5	0.311	1.418×10^{-5}
13	-56.5	295	0.1650×10^5	0.265	1.418×10^{-5}
14	-56.5	295	0.1409×10^5	0.227	1.418×10^{-5}
15	-56.5	295	0.1203×10^5	0.194	1.418×10^{-5}
16	-56.5	295	0.1027×10^5	0.163	1.418×10^{-5}
17	-56.5	295	0.0875×10^5	0.141	1.418×10^{-5}
18	-56.5	295	0.0749×10^5	0.121	1.418×10^{-5}
19	-56.5	295	0.0640×10^5	0.103	1.418×10^{-5}
20	-56.5	295	0.0546×10^5	0.088	1.418×10^{-5}
30	-46.5	302	0.0117×10^5	0.018	1.488×10^{-5}