

מערכות תעופה א'

יחידת לימוד אחת

הוראות לנבחן

א. משך הבחינה: שעתיים וחצי.

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

פרק ראשון: אווירודינמיקה

פרק שני: תרמודינמיקה

פרק שלישי: מנועים

עליך לענות על שאלה אחת **לפחות** מכל פרק, ועל **חמש** שאלות בסך-הכול.

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 השאלות 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 על שאלה חישובית, עליך להציג את שלבי הפתרון באופן מפורט ולהסבירם

בקצרה. קבלת מֶרֶב 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

בשאלון זה שלושה פרקים. עליך לענות על שאלה אחת לפחות מכל פרק, ועל חמש שאלות בסך-הכול. לכל שאלה – 20 נקודות.

פרק ראשון: אווירודינמיקה

שאלה 1

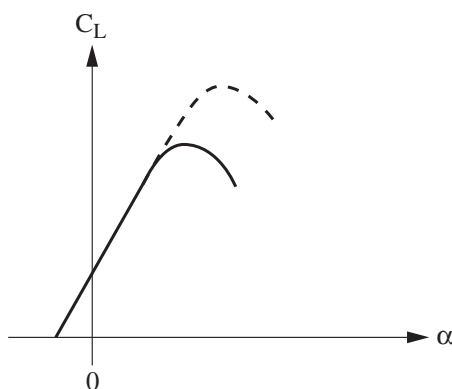
- א. מהי הטמפרטורה בגובה פני-הים בתנאי אטמוספירה סטנדרטית?
- ב. תאר את השינוי בטמפרטורה כפונקציה של הגובה, באטמוספירה סטנדרטית מגובה פני-הים עד לגובה 20 km .
- ג. החל מאיזה גובה מעל פני-הים הטמפרטורה נשארת קבועה?
- ד. באיזה גובה מעל פני-הים, מבין שלושת הגבהים המצוינים להלן, מהירות הקול היא הגבוהה ביותר?
1. 3 km
 2. 11 km
 3. 20 km
- ה. לאיזה גוף, מבין ארבעת הגופים המצוינים להלן, יש את מקדם הגרר הגדול ביותר?
1. מצנח
 2. כדור עגול
 3. קובייה
 4. כנף

שאלה 2

- א. הסבר מהו מדף בכנף, וכיצד הוא משפיע על העילוי של הכנף.
- ב. הסבר מהו כנפון קדמי, וכיצד הוא משפיע על העילוי של הכנף.
- ג. הסבר מהו תפקיד המאזנות בכנף.
- ד. היכן לאורך שפת הזרימה של הכנף יש למקם את המאזנות, והיכן יש למקם את המדפים בכנף?
- ה. לאיזה כיוון תזוז המאזנת בכנף ימין ולאיזה כיוון תזוז המאזנת בכנף שמאל בעת גלגול המטוס ימינה?

שאלה 3

- א. כאשר מטוס מתקרב לנחיתה, הטייס פותח את המדפים הנמצאים בשפת הזרימה של הכנף. פתיחת המדפים מאפשרת את קיצור מרחק הנחיתה. הסבר מדוע.
- ב. כאשר מטוס ממריא, הטייס מוציא את הכנפון הקדמי, הנמצא בשפת ההתקפה של הכנף. הוצאת הכנפון מאפשרת את קיצור מרחק ההמראה. הסבר מדוע.
- ג. באיור לשאלה זו נתון גרף של מקדם העילוי כפונקציה של זווית ההתקפה.



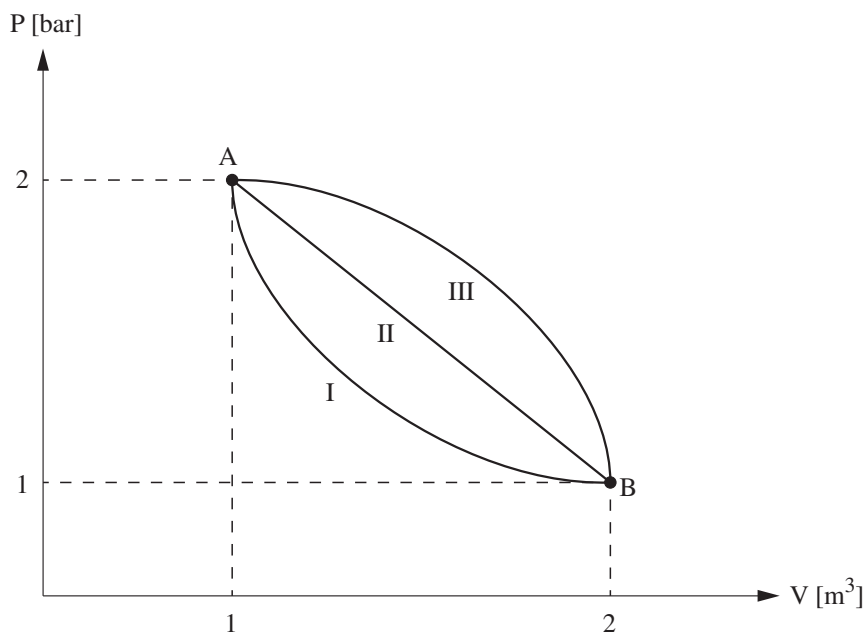
איור לשאלה 3

איזה אמצעי עילוי בכנף יגרום להגדלת מקדם העילוי כמתואר בקו המקווקו באיור?

פרק שני: תרמודינמיקה

שאלה 4

באיור לשאלה זו מתוארים בדיאגרמת P-V (לחץ-נפח) שלושה תהליכים שונים (המסומנים I, II ו-III), בין הנקודות A ו-B. אוויר במסה של 1 kg עובר את התהליכים הללו.



איור לשאלה 4

- א. באיזה מבין שלושת התהליכים מתקבלת העבודה הגדולה ביותר? נמק את תשובתך.
- ב. חשב את העבודה המתבצעת בתהליך II.
- ג. חשב את טמפרטורת האוויר בנקודה A.

שאלה 5

נתונה מסה של 1 kg אוויר העוברת תהליך כלשהו.

נתוני האוויר בתחילת התהליך

– נפח האוויר: $V_0 = 1 \text{ m}^3$

– לחץ האוויר: $P_0 = 2 \text{ bar}$

נתוני האוויר בסוף התהליך

– נפח האוויר: $V_f = 0.5 \text{ m}^3$

– לחץ האוויר: $P_f = 4 \text{ bar}$

– מקדם החום הסגולי של האוויר בנפח קבוע: $C_v = 717.5 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

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

א. קבע באמצעות חישוב מתאים מהו סוג התהליך שעבר האוויר.

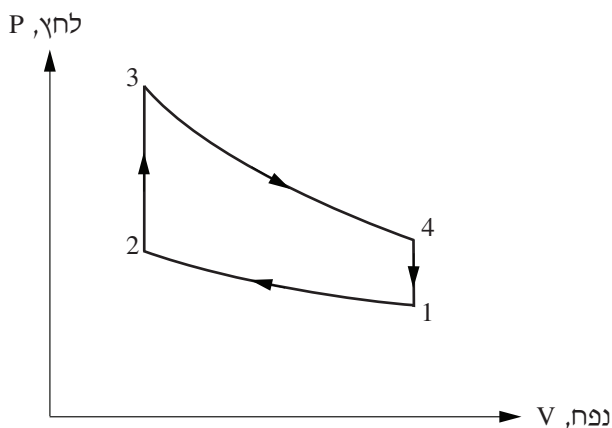
ב. מצא את המסה הסגולית של האוויר בתחילת התהליך ובסופו.

ג. חשב את האנרגיה הפנימית של האוויר בתחילת התהליך.

ד. האם האנרגיה הפנימית של האוויר השתנתה תוך כדי התהליך? נמק את תשובתך באמצעות נוסחה מתאימה.

שאלה 6

באיור לשאלה זו מתואר מחזור ידוע של מנוע חום.



איור לשאלה 6

הגז במחזור הוא אוויר ומסתו היא 2.5 gr. נתונים חלקיים של האוויר בנקודות שונות של המחזור מוצגים בטבלה שלהלן:

נקודה	P[bar], לחץ	V[m ³], נפח	T[K], טמפרטורה
1	1		279
2	23	$2.13 \cdot 10^{-4}$	
3			

נתונים נוספים:

– קבוע הגז של אוויר הוא $287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

– היחס בין קיבולי החום הסגוליים של האוויר הוא $\gamma = 1.4$.

א. 1. מהו שם המחזור המתואר באיור ומהו ייחודו?

2. רשום את שמות התהליכים המתרחשים במחזור בין הנקודות $1 \leftarrow 2$, $2 \leftarrow 3$, $3 \leftarrow 4$ ו- $4 \leftarrow 1$.

ב. 1. חשב את נפח הגז בנקודה 1.

2. חשב את נפח הגז בנקודה 3.

3. חשב את טמפרטורת הגז בנקודה 2.

ג. חשב את יחס הדחיסה של המנוע.

פרק שלישי: מנועים

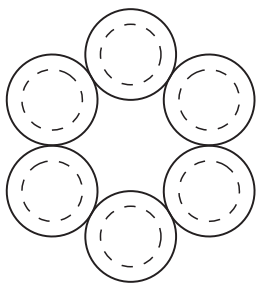
שאלה 7

קבע לגבי כל אחד מההיגדים שלהלן אם הוא **נכון** או **לא נכון**. נמק בקצרה את קביעתך.

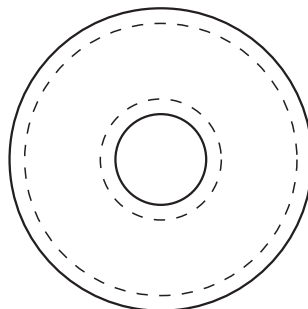
- א. מנוע סילון יכול לפעול מחוץ לאטמוספירה, ואילו מנוע בוכנה יכול לפעול רק בתוך האטמוספירה.
- ב. מנוע טורבינה יכול לספק דחף בלבד, ואילו מנוע בוכנה יכול לספק דחף או הספק.
- ג. מנוע סילון מקורר רק במים, ואילו מנוע בוכנה יכול להיות מקורר במים, בשמן או באוויר.
- ד. הבעירה במנוע סילון היא רציפה, ואילו הבעירה במנוע בוכנה מתרחשת לסירוגין.

שאלה 8

באיור לשאלה זו מתוארים חתכים של שני תאי שריפה של מנועי סילון.



חתך II



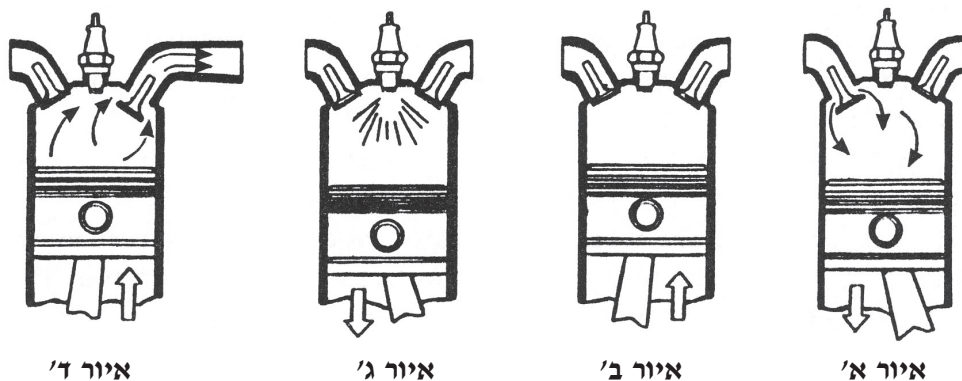
חתך I

איור לשאלה 8

- א. איזה סוג של תא שריפה מתואר בכל חתך?
- ב. ציין שני תפקידים של תא השריפה במנוע טורבינה.
- ג. באיזה רכיב משתמשים להחדרת הדלק לתא השריפה?
- ד. מדוע יש לרסס את הדלק לתוך תא השריפה?

שאלה 9

באיורים א' - ד' לשאלה זו מתוארות ארבע פעימות של מנוע בוכנה.



- א. ציין איזו פעולה מתוארת בכל איור.
- ב. הסבר מדוע תהליך השריפה מתחיל מעט לפני הגעת הבוכנה לנקודה מתה עליונה.
- ג. הסבר מהו התפקיד של שסתומי הפליטה במנוע, וציין באיזו פעימה הם נפתחים.
- ד. הסבר מדוע יחס הדחיסה במנוע הפועל על-פי מחזור "אוטו" נמוך מיחס הדחיסה במנוע אחר, הפועל על-פי מחזור "דיזל".

בהצלחה!

נספח א': נוסחאון למערכות תעופה (5 עמודים)

לשאלונים 853101, 853201, קיץ תשע"ז

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

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

$\bar{c}$	-	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 853101, 853201, קיץ תשע"ז

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}