

הנעה

נעשן טילי ורקטי



מאמר זה בא להסביר כיצד פועלים טילים ורקטות. החומר עליו מבוסס המאמר לקוח מספרו של המחבר, העומד להתפרסם בהוצאת "מערכות".

מהנדס ע' לורנר

תקופה מסוימת נעשה שימוש אף ברקטות בלתי-מונחות, אך אלה אינן יעילות נגד מטוסי קרב-הפצה מודרניים, והשימוש בהן הופסק. טילים נגד-טילים דומים בדרך כלל לטילים נגד-מטוסים, אף כִּי עליהם לפעול בטווחים ארוכים ביותר. בטיילים נגד-טילים נודעת חשיבות רבה למשך-ההתראה הקצר ולתאוצה בהמראה. טילים בליסטיים חודרים לאטמוספירה במ-הירויות עצומות, ונושאים כמעט תמיד ראש-נפץ גרעיני. לפיכך הכרח הוא למגן ליירטם בגובה גדול, ובמרחק רב מן ה-מטרה. לטילים מסוג "ספרינט" תאוצות של 100 G והם מסתמכים על מערכת את-ראה מוקדמת, החייבת לכסות אלפי ק"מ. אחרת לא תהא בהם כל תועלת.

טילי קרקע-קרקע

משמשים בקרבות-אוויר בין מטוסים, והם בעלי הנחיה תת-אדומה והנחיית מכ"מ. כיום מצויה בשלבי פיתוח הנחיה טלוויזיו-נית, אשר לה יתרונות על פני הנחיית מכ"מ. הפעלת הטילים נעשית תמיד על-די מרעומי-קרבנה.

טילי קרקע-אוויר

מיועדים לשמש תחליף לתותחים ימיים כבדים, ומאפשרים לספינה קטנה יחסית לשאת כוח-מחץ הדומה בגודלו לזה של

אלה יעילים גם נגד ביצורים. טילים אלה הם בעלי הנחיה חזותית ונהוגי תיל או רדיו בשילוב עם הנחיה תת-אדומה.

טילי קרקע-קרקע (ספרינט)

גם אלה נחלקים לסוגים אחדים: הסוג הראשון הן רקטות בלתי-מונחות בנות 70 עד כ-100 מ"מ, המיועדות להפעלה נגד בני-אדם, רכב משוריין ואניות. הסוג ה-שני הם טילים טקטיים מונחים, המיועדים להפעלה נגד מטרות שתקיפתן מקרוב קשה, כגון אניות-מלחמה, עמדות טילים נ"מ, וכן מטרות יבשתיות מוגנות במיוחד, כגון שדות-תעופה, תחנות-כוח וגשרים. הנחייתם של אלה נעשית לרוב על-ידי מכ"מ או טלוויזיה, ולאחרונה מפתחים שיטות-הנחיה בעזרת קרני לייזר. הסוג השלישי של טילי אויר-קרקע הם טילים לטווח ארוך, המיועדים להפעלה נגד ריכוזי צבא ואוכלוסיה. אלה נושאים פצצות גרעיניות, ובעלי הנחיה אינרציאלית.

טילי קרקע-אוויר (ספרינט)

טילים אלה מיועדים להגנה בפני מטוסי אויב או טילים בליסטיים. בדרך כלל הם מונחי מכ"מ אף כי בשימושים אחדים עוברים עתה להנחיה תת-אדומה. טילים אלה נבדלים זה מזה בעיקר בגודלם ובצ-וות הדרוש להפעלתם, כולל אמצעי-העזר.

מערכות-טילים מודרניות מיועדות לשי-מוש בכל זירות-הקרב ונגד כל סוגי המט-רות הקיימים כיום. אף כי במרבית התפ-קידים משמשים טילים לצד כלי-נשק קוב-בנציונליים, מסתמנת נטיה לביצוע משי-מות מסוימות על-ידי טילים בלבד או בעיקר על ידיהם, כשכלי-הנשק הקונבנ-ציונליים משמשים גורם משני בלבד. מערכות-הטילים העיקריות נחלקות כדל-קמן:

טילי קרקע-קרקע (פחלל רקטות ארטילריות)

טילי קרקע-קרקע נחלקים לשלושה סוגים: הראשון מיועד לפעולה בטווחים שבין 10 ל-50 ק"מ. אלה הן הרקטות הארטילריות כגון "קטיושה", שהן פגז המונע בכוח רקטי וללא הנחיה. הסוג השני הם טילים בליסטיים טקטיים וטילים בין-יבשתיים בעלי הנחיה, המיועדים לטווחים שמעל ל-50 ק"מ, עד אלפי ק"מ. מטען הנפץ שלהם הוא בדרך כלל בן מאות אחדות של ק"ג, ומכיל חומר-נפץ מרסק או פצ-צות גרעיניות ואמצעים אטומיים, ביולו-גיים וכימיים (כולל אבק רדיו-אקטיבי). שני הסוגים מיועדים להפעלה נגד ריכוזי צבא ואוכלוסיה, ואינם יעילים נגד מטרות נקודה. הנחייתם היא לרוב אינרציאלית. הסוג השלישי קרוי טילי נ"ט, אף כי טילים

רקטה הם מ-20 עד ל-200 אטמוספירות בקירוב.
שני ערכים חשובים אחרים בהנעה רקטית הם האימפולס הטוטלי והאימפולס הספציפי.

במקרה של דחף קבוע שוה האימפולס ה-טוטלי ל-Ft, כלומר דחף מוכפל בזמן. במקרה של דחף משתנה שוה האימפולס ה-טוטלי ל:

$$I_T = \int_0^t F dt$$

כאשר t הוא זמן הפעולה.

האימפולס הספציפי מוגדר ב-F/mg, כלומר הכוח מחולק בקצב זרימת המסה של הדלק הנשרף ובתאוצת המשיכה.

חשיבותו של ביטוי זה בכך שהוא מספק קנה-מידה מצויין להשוואת יעילותם של דלקים שונים כיצורי דחף, וההנחה היא כי המנוע פועל ביעילות קרובה למקסימלית. ניתן לבטאו במלים בצורה הבאה: „האימפולס הספציפי נותן את הדחף בק"ג שנקבל משריפת ק"ג דלק תוך שניה אחת בתוך המנוע הרקטי". האימפולס הספציפי של דלקים מוצקים הוא בין 180 ל-240, ושל דלקים נוזלים — מ-200 עד 400.

פונקציית הדלק פותק

במנועי דלק מוצק מאוחסן הדלק בתוך תא השריפה. תרשימים סכימטיים של שני סוגי המנועים המקובלים ביותר ניתנים להלן (תרשימים 3 ו-4). הראשון הוא מנוע בעל בעירת-קצה (סיגריה), והשני — מנוע בעל בעירת-צד.

דלק מוצק בוער בשכבות מקבילות, ובכך וון מאונך לפני השטח החשוף ללהבה. קצב הבעירה תלוי בתכונות הדלק ובלחץ הבעירה. דלקים המקובלים בשימוש ב-ערים בין 5 ל-15 מ"מ בשניה. בתרשים 5 מוצג גרף של דחף לעומת זמן במנוע דלק מוצק. ערכו של הדחף תלוי, בין השאר, בשטח הבעירה, כלומר — בשטח-פני-הדלק החשוף ללהבה. אם שטח זה קבוע (תרשים 3), נקראת הבעירה נייטרלית; אם גדל השטח כחלוף הזמן (תרשים 4), קרויה ה-בעירה פרוגרסיבית; ואם קטן הוא עם הזמן קרויה הבעירה רגרסיבית. אופי ה-בעירה נקבע לפי שיקולי המשימה, אך באורח כללי ניתן לומר, כי במטעני-דלק בעלי משקל דומה תספק בעירת-קצה דחף

ה-4 SA (הרוסי) אשר להם יתרונות בשי-מושים מסויימים, אך הואיל ומרבית הטי-לים מצויידיים עדיין במנועי רקטה, נעסוק כאן באלה בלבד.

הגדרת פונקציות

חלקיו העיקריים של מנוע רקטי הם תא-השריפה והנחיר. המנוע פועל בהתאם לחוק התגובה של ניוטון. יישומו של חוק זה במנוע רקטי הוא: אם בתוך כלי סגור יוצר לחץ גזים, ונפתח בו פתח, ייווצר כוח הודף בכיוון ההפוך לפתח (ראה תר-שים 1). המקום בו נוצרים הגזים נקרא בשם תא-השריפה.

כוח ההדף במקרה זה שוה ללחץ בתא ה-שריפה (Pc), כפול שטח הפתח (A) (היינו $F = PcA$). אם הלחץ בתא גבוה דיו (בערך כפליים מלחץ האוויר החיצוני) — יפרצו הגזים במהירות הקול.

אם נגדיל את מהירות היציאה (Ve), יגדל כוח הדחף. לא ניתן להשיג זאת רק על-ידי הגדלת הלחץ (Pc) בתא השריפה, שכן במבנה המתואר בתרשים 1, לעולם לא תע-בור מהירות היציאה (Ve) את מהירות ה-קול, ולפיכך מוסיפים נחיר. (תרשים 2). ה-מהירות בנחיר תלך ותגדל עד קצהו ** וככל שנגדיל את הלחץ בתא השריפה, נ-י תן יהיה להאריך את הנחיר (למען הדיוק — להגדיל את היחס שבין שטח היציאה לשטח הצוואר), ולקבל מהירות פליטה גבוהה יותר, וכתוצאה מכך כוח-דחף גדול יותר. לחצי-העבודה המקובלים במנועי

בצורה פתימטית ניתן לבטא זאת:

$$F = m_i V_e + b$$

(לא נחץ פאן בפיזיק ב, ספיקרה אדיאלי הוא פמילא 0).

בפיזיקה זו מוה הוא קצב זרימתה של מסת גזים $(\frac{dm}{dt})$, ו- V_e היא

מהירות היציאה. את הצפוטתה תרא-שונה אפשר על פן לפתוח:

$$F = PcA_i C_f$$

פאשר A_i הוא שטח הצוואר C_f פפונה מקדם-הדחף. ערכו הוא ב-הדרגתלל בין 1.4 ל-1.6 ותבטא את התפלל בין תא שריפה ללא נחיר ופיץ תא שריפה עם נחיר.

** קוראים המתמצאים באירודינמיקה ייזוהו מהשוואה עם צינור ונטורי תת-קולי. התופעה כאן נראית אמנם הפוכה, אך בזרימה על-קולית (בתנאים מסויימים) גדלה המהירות עם גידול שטח הצינור.

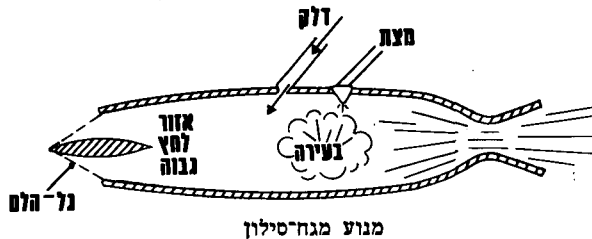
אניית-קרב או סיירת. טילי ים-ים מיוע-דים לפעולה נגד אניות-שטח. לטילים אלה הנחיית מכ"מ, ויש צבאות אחדים בהם נעשים נסיונות לציידם בהנחיה תת-אדו-מה.

סוג אחר של טילי ים-ים הם טורפדות וטילים נגד-צוללות. הטורפדו הוא כיום נשקה של הצוללת (ובמידה מסויימת אף של המשחתת) נגד אניות-שטח. בשל תנו-עתו האטית (בהשוואה לטיל ים-ים), ניתן להניח כי בצורתו הקלסית יעבור מן העו-לם בעתיד הלא-רחוק. לעומת זאת זוכה הטורפדו לדחף חשוב בפיתוחו כנשק נגד-צוללות (בעיקר בגלל פוטנציאל ההרס של צוללת נושאת-טילים), והמחקר בת-חום זה מכוון לפיתוח טורפדות, המסוגלים לפגוע בצוללות אף בעומק רב. שיטות ההנחיה הן בעיקרן אקוסטיות ומגנטיות.

הפעלת טילי

אף-על-פי שכל סוגי הנעת כלי-הטיס שימשו בטילים בתקופה זו או אחרת, משמשים במרבית הטילים המבצעיים כיום מנועי-רקטה, וזאת משתי סיבות: מנועי רקטה היו, עד לפני זמן לא רב, המנועים היחידים המסוגלים לפתח את הדחף ה-דרוש לטיסה על-קולית ושגא-קולית (היי-פּרֶסוֹנִית). שנית, מחירו של מנוע רקטי, המיועד לפעול שניות או דקות אחדות, זול במידה ניכרת ממחירו של מנוע סילו-ני, המתוכנן לרוב לזמני-פעולה ארוכים ושמבנהו מורכב לאין ערוך. אמנם לאח-רונה פותחו מנועי מגח-סילון * פשוטים ואמינים, וכתוצאה מכך פותחו טילים אח-דים המצויידיים במנועים מעין אלה (כגון

* מנוע מגח-סילון הוא פשוט ביותר. מנוע זה מורכב מצינור בעל צורה מיוחדת, מורק-דלק ומצת (ראה תרשים). הדחיסה במנוע זה נעשית על-ידי הפיכת האנרגיה הקינטית של האוויר הזורם — ללחץ וטמפרטורה גבוהים. בשלב זה מורק הדלק וניצת, הלחץ והטמפר-טורה עולים, ומוצרי-הבעירה נפלטים מאחור בצורת סילון-גזים. יתרונו של המנוע בכך שהוא נושא דלק בלבד; המחמצן בא מן האוויר. חס-רונו בכך, שאינו יכול לפעול במצב עמידה, כלומר — הוא זקוק לאמצעי-האצה כלשהו, והוא יעיל רק במהירויות על-קוליות גבוהות.

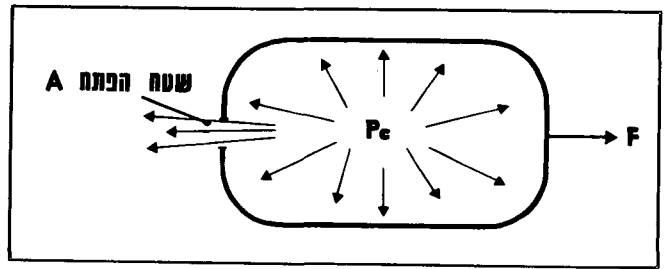


נמוך לזמן ארוך, המתאים למנועי שיט, ואילו בעירת-צד תספק דחף גבוה לזמן קצר, המתאים למאיצים. צורת המפתח ה- פנימי קובעת את אופי הבעירה. צורות נוספות של המפתח הפנימי נחונות בתרי- שים 6.

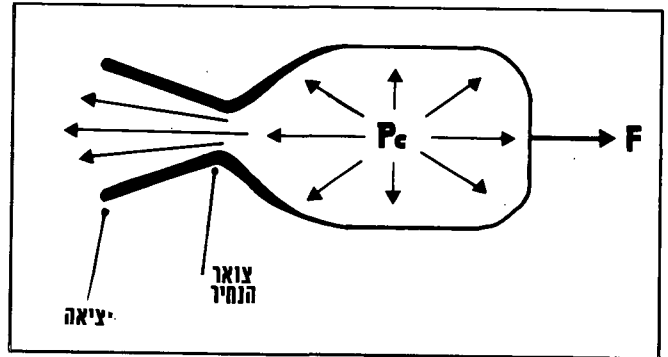
ברור מן הדיון עד כה, כי בקרה טובה של צורת גרעין-הדלק, והקפדה חמורה למנוע את היווצרותם של סדקים ובעות, הכר- חיות לפעולה תקינה של המנוע: כל סדק הנוצר בדלק פירושו הגדלת שטח הבעירה משתגיע אליו הלהבה. לחץ הבעירה לכל נחיר תלוי בשטח הבעירה, וקצב הבעירה תלוי בלחץ: בתנאים מסויימים עלול להי- וצר מצב שבו יגרום סדק לעליית לחץ בלתי-מבוקרת ולהתפוצצות המנוע.

קיימים שני סוגים עיקריים של דלק מוצק. אחד מהם, הקרוי „קומפוזיטי“, מורכב מ- מחמצן גבישי כגון KNO_3 או $KClO_3$, ב- תוספת „דלק“, שאינו אלא חומר הדבקה — לרוב תרכובת של שרף סינתטי (אפוק- סי או פוליאסטר) או גומי סינתטי (פולי- אורטאן או פוליבוטאדיאן). היחס המקובל הוא 60%—80% של מחמצן, והיתר — דבק וחומרים שונים שתפקידם להכהות את הדלק, לשנות את קצב-הבעירה שלו וכדומה. עדיף אמנם כי הדלק יכיל עד כ- 90% מחמצן, על-מנת להשיג בעירה מוש- למת מבחינה כימית. אך במקרה זה היא חוזקו המיכני של הדלק נמוך מדי, והוא יהיה פריך יתר על המידה.

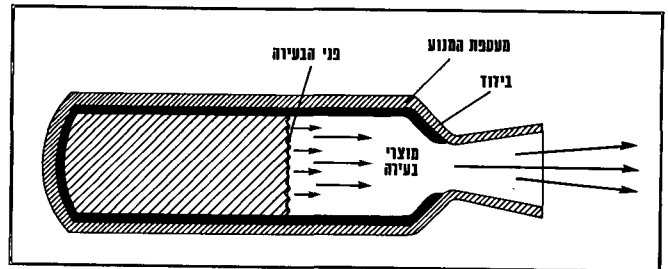
סוג-הדלק השני מורכב מניטרו-גליצרין (כ-40%) וניטרו-צילוזזה. דלק זה קרוי „דו-בסיסי“. האימפולס הספציפי שלו נמוך בכ-10% מזה של ה„קומפוזיטי“, אך הוא בעל יתרונות מסויימים בייצור ובפ- עולה וחוזקו המיכני טוב יותר, ולפיכך מבכרים אותו לעתים על הסוג הקודם. הצתת דלק מוצק נעשית בדרך כלל על- ידי הפעלת מטען קטן של אבק-שריפה שחור בתוך חלל המנוע. עליית הטמפר- טורה והלחץ גורמים להצתת חומר-הדלק המוצק. שיטה זו קרויה השיטה הפירו- טכנית. במנועים גדולים, בעלי קוטר של מטר ומעלה, מסוכנת שיטה זו, הואיל ובמנוע כזה כמות החומר הדרושה להצ- תה גדולה מאוד, ועצם הצתתה בתוך ה- מנוע עלולה לגרום לסדקים. במקרים כאלה מפעילים בתוך חלל-המנוע הראשי מנוע רקטי קטן. בעירתו של מנוע זה מבוקרת ונעשית בלחץ קבוע, וסילון ה- גזים הנפלטים מכיון אל הדלק של המנוע



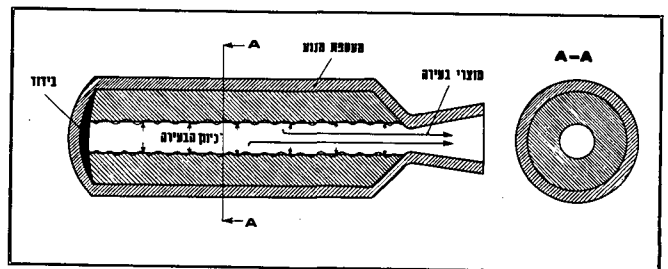
תרשים מס' 1:
תא שריפה



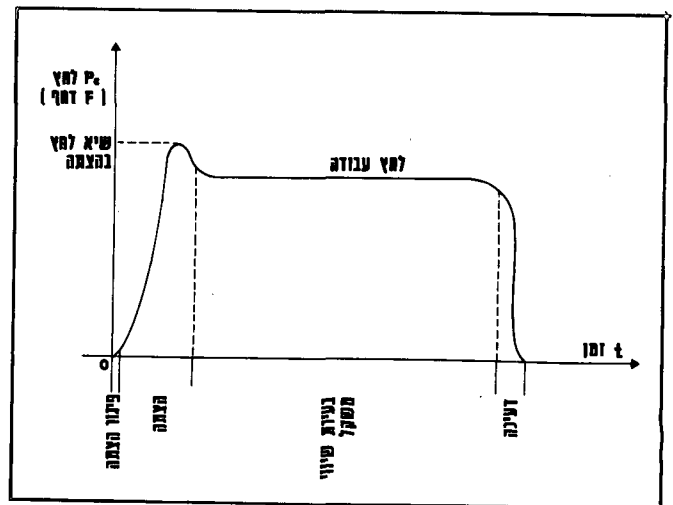
תרשים מס' 2:
תא שריפה עם נחיר



תרשים מס' 3:
מנוע דלק מוצק בעל בעירת קצה



תרשים מס' 4:
מנוע דלק מוצק בעל בעירת צד



תרשים מס' 5:
גרף טיפוסי של לחץ ודחף לעומת זמן עבור מנוע דלק מוצק

הגבוהה חודרת דרכו אלא באורח אטי ביותר. שיטה זו נהוגה גם בהגנה על ראשי-נפץ בליסטיים החודרים לאטמוספירה במהירויות המגיעות עד מאך 20, וכן בהגנה על תאי-חלל מאויישים החוזרים לאטמוספירה. בתא „אפולו“, למשל, מגיעה הטמפרטורה החיצונית בתחתית לכדי 2,000° צלזיוס, וההגנה בפניה מושגת בעזרת אבליציה.

בהשוואה למנועי דלק מוצק נותנים מנועי דלק נוזל אימפולס ספציפי גבוה יותר, ומאפשרים גם כיבוי והצתה מחדש, ובקרת גודל הדחף כמעט ללא קושי. אך מנועים אלה מורכבים ביותר, וכתוצאה מכך אף יקרים מאוד, ואמינותם נמוכה בהשוואה למנועי דלק מוצק. חיסרון נוסף נעוץ בכך, שבדרך כלל אין הם ניתנים להפעלה מיידית — אף כי יש יוצאים מן הכלל.

לאחרונה פותחו גם מנועי חד-דלק (מונו-פרופלנט), שהדלק בהם הוא תרכובת נוזלית של חומרים שונים, ומתפרק בתגובה חזקה בתוספת חום, בנוכחות קטליזטור. מבחינת המבנה, פשוט מנוע כזה ממנוע דלק נוזל הואיל והוא מכיל רק נוזל יחיד. אף כי יש כבר בנמצא טיל מבצעי המנוע במנוע כזה, אי אפשר עדיין לומר כי פיתוחם של מנועים אלה הושלם.

מנועי אטמוספירה
מנועי פלזמה

כיוון אחר של פיתוח מנועי רקטה הוא מנועי-הכלאיים. במנוע זה אחד המרכיבים, לרוב הדלק, הוא מוצק, והשני — נוזל (תרשים 9). הואיל והדלק אינו יכול לקיים בעירה ללא מחמצן, תלוי קצב הבעירה, וכתוצאה מכך אף הדחף, בקצב זרימתו של המחמצן, הגיתן לוויסות על-ידי שסתום יחיד. יתרון נוסף של מנוע זה נעוץ בעובדה, כי הבעירה איננה רגישה לסדקים בדלק.

במנועים אלה עדיין לא נפתרו בעיות חמורות של זרימה וערבול בתוך חלל ה-מנוע, אך הושגה התקדמות ניכרת בתחום זה, וישנו טיל מבצעי, המשמש כמטרה אווירית (במקום שבקרה טובה של הדחף היא דבר חשוב) המנוע במנוע כזה.

מנועי-רקטה
מנועי-אטום

במנוע רקטי מקובל טמפרטורת הגזים הנפליטים גבוהה מאוד: מאות מעלות-צלזיוס. אנרגיית חום זו מתבזזת ללא תועלת. במנוע רקטי נושם-אוויר מנסים לנ-

הדלק והמחמצן מוזרקים לתוך תא-השריפה דרך מערכת-הזרקה המרססת את הדלק לטיפות מיקרוסקופיות. אם הצמד דלק-מחמצן איננו היפרגולי (ניצת במגע) ניתן לערבבם לפני ההזרקה, אף כי הנטייה כיום היא לעבור לדלקים הייפר-גוליים שבהם בעיית ההצתה אינה קיימת, ופעולת המנוע בטוחה יותר. התערובת דלק-מחמצן בוערת בהתקדמה לכיוון הנחיר וההנחה היא כי בהגיעה לנחיר הסתיימה הבעירה, והחוצה נפליטים מוצרי בעירה בלבד. שיקול זה קובע את צורת תא-השריפה, העשוי להיות כדורי, גלילי או אליפסואידי.

בגלל הטמפרטורה הגבוהה יותר של בעירת דלק נוזל, ובשל משכי הבעירה של מנועי דלק נוזל, הארוכים בדרך כלל במידה רבה ממשכי הבעירה של דלק מוצק, הכרחי כמעט תמיד לקרר את תא-השריפה והנחיר. יש שיטות אחדות לביצוע הדבר, והמקובלת שבהן היא קירור רגנרטיבי (תרשים 8). הדלק הקר סופג חום מן הדפנות, ואז מוזרק פנימה. שתי שיטות אחרות הן קירור-הנחה וקירור-אבליציה. בראשונה מוזרק דלק נוזל, ללא מחמצן, דרך נקבים זעירים, על הפנים הפנימיים של תא-השריפה והנחיר ועל-ידי אידוי יוצר שכבה דיקה בין הלהבה לדופן, ובדרך זו מונע מן הלהבה לחמם את דופן תא-השריפה והנחיר. בקירור אבליציה מצופה פנים תא-השריפה בחומר בעל תכונות טובות של מבודד-חום, אך בעל יכולת לבעור בטמפרטורה גבוהה די הצורך. פני-החומר העליונים מתאכלים לאטם על-ידי הלהבה, ואידי מוצרי האיכול הללו גורם לקירור. מצד שני, בהיות החומר מבודד חום מעולה, אין הטמפרטורה

הראשי ומצית אותו. כל התהליך, העשוי להיראות ארוך אינו נמשך במציאות אלא מאיות-שניה.

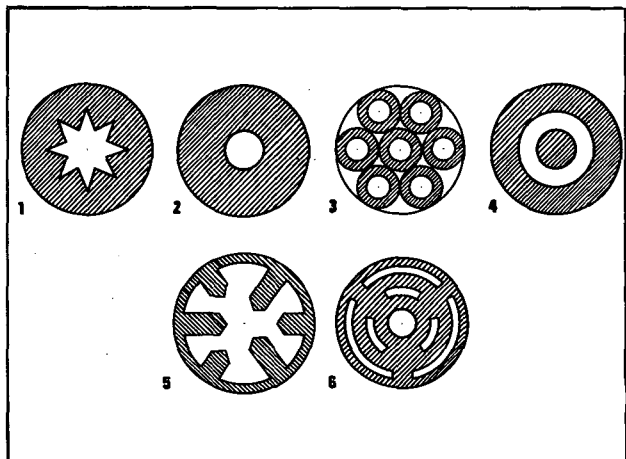
כיבוי של מנוע דלק מוצק נעשה בדרך כלל על-ידי פתיחת פתחים גדולים בדופן המנוע או על-ידי הפרדת הנחיר כולו ממעטפת המנוע. הדבר גורם לירידת הלחץ, וכתוצאה מכך — להאטת הבעירה ולכיבוייה. ברור שלאחר כיבוי מעין זה אי אפשר להצית את המנוע מחדש, וטכניקה זו משמשת רק במקרה שהכיבוי נדרש כאמצעי-חירום או לשם הפסקת בעירה על-מנת להשיג מסלול מדויק של הטיל.

מנועי דלק נוזל

כפי ששמש מעיד עליהם, ניוונים מנועים אלה על-ידי דלק במצב נוזלי. גם במקרה זה מורכב הדלק משני מרכיבים: דלק ומחמצן. קיימים עשרות הרכבים, אך ה-מקובלים ביותר הם של אלקוהול, נפט, או פחמימה אחרת כדלק וחמצן נוזל, או אחת החומצות החזקות (כגון חומצה חנקנית עשנה) כמחמצן. דוגמה מעניינת היא מ-מן נוזל כדלק ופלוואור נוזל כמחמצן (שר-טוט סכימטי של מנוע דלק נוזל נתון ב-תרשים 7).

העברת הדלק מן המיכלים אל תא-השריפה נעשית בדרך כלל על-ידי דחיסת מיכל בעזרת גז בלתי-פעיל, כגון חנקן או הליום, או בעזרת משאבה. חשוב לזכור, כי לחץ הדלק חייב להיות גבוה מלחץ תא-השריפה, וזה האחרון עשוי להגיע לעשרות אטמוספירות. המשאבות הן בדרך כלל צנטריפוגליות, ומנועות על-ידי טורבינת-גז שכן בצורה זו ניתן לקבל הספקים גבוהים ובקרה נוחה ומיידית.

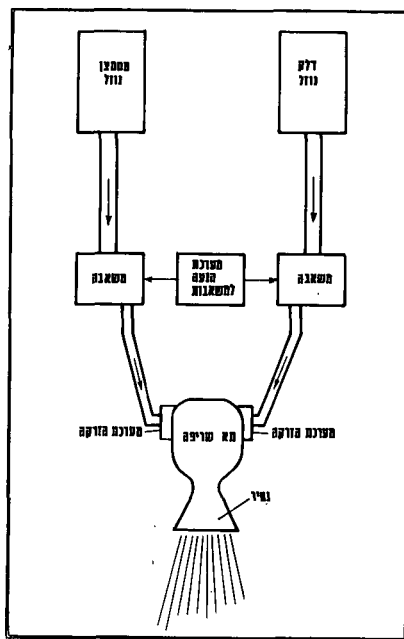
תרשים מס' 6:
צורות שונות של המפתח הפנימי



כפי שהזכרנו אין הטורפרו המודרני משייט בעומק קטן וקבוע, אלא חייב לצלול לעומקים של מאות מטרים. על מנת לייטרט צוללת מודרנית, המסוגלת לנוע במהירות המגיעת עד כ-40 קשר עליו להיות מהיר יותר, ועל מהירותו האופטימלית להיות גדולה ב-50% מזו של המטרה. בגלל טווחי-הגילוי הגדלים והולכים, וההתנגדות הגדולה של המים בהשוואה לאויר, יש צורך במקורות-אנרגיה חזקים, אך קומפקטיים במבנם.

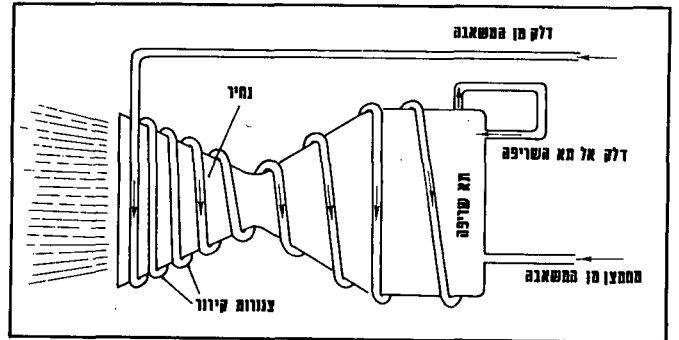
שיטת-ההנעה המקובלת עד היום היא בעזרת מדחפים, ומקור-האנרגיה הנוכחי הוא עדיין סוללות, אם כי אין משתמשים עוד בסוללות עופרת - חומצה-גפרית- גית המוכרות לנו, הואיל והללו נחשבות בלתי נוחות ובלתי יעילות, אלא משתמשים בהרכבים אחרים, המבוססים על מתכות אנרגטיות יותר ואלקטרוליטים יעילים יותר. דוגמה מעניינת היא השימוש במי-ים כאלקטרוליט; אלה אינם יעילים במיוחד, אך לעומת זאת אין צורך לשאתם בתוך הטורפרו.

מקור-אנרגיה שני הנמצא בשלבי פיתוח הן טורבינות קיטור וגז, המופעלות בעזרת דלק מוצק. כאן מתבצעת עבודה רבה בפיתוח מפלטים (Exhaust), שלא יהיו רגישים ללחץ החיצוני, העשוי לנוע בין אטמוספירה אחת ל-30 אטמוספירות. הנעה רקטית טהורה אינה יעילה מתחת לפני הים, בגלל הלחץ החיצוני המשתנה.

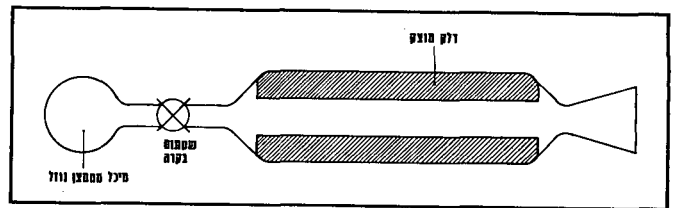


צל אנרגיה זו בעזרת ההתקן המתואר בתרשים 10. זרם-האוויר הנוסף הנלכד מתערב בגזים החמים, מהירותו מוגברת, והוא נפלט דרך הנחיר המשני, תוך תוספת דחף. ניסויים הראו, כי על אף תוספת המשקל וההתנגדות שבמערכת מעין זו, מורגשת תוספת נקיה של דחף, המגיעה לכדי 50% ויותר.

תרשים מס' 7 : שרטוט סכימטי של מנוע דלק נוזלי



תרשים מס' 8 : קיורור רגנרטיבי



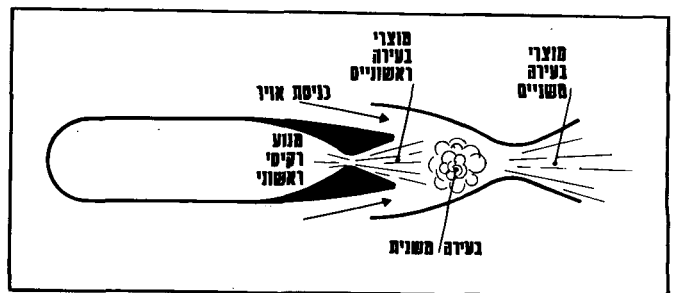
תרשים מס' 9 : מנוע כלאיים

טילים

סקרנו את סוגי-הטילים השונים הנמצאים בשימוש. במרבית צבאות העולם נחשבים כיום סוגי-טילים מסויימים כנשק הכרחי, והמעצמות הגדולות עוסקות בפיתוח נרחב של כל סוגי הטילים. שתי הבעיות העיקריות בפיתוח טילים חדשים הן ההנעה וההנחה.

כך עמדנו על סוגי המנועים העיקריים המשמשים בהנעת טילים, ועמדנו על יתרונותיהם וחסרונותיהם ועל מגמות הפיתוח החדשות בהם.

במאמר הבא נדון בבעיות הבקרה של טילים, כולל אמצעי ההנחה כגון מכ"מ, הנחיה תת-אדומה, טלוויזיה וקרני-לייזר, וכן נעמוד על שיטות הניהוג של טילים.



תרשים מס' 10 : מנוע נושם אוויר