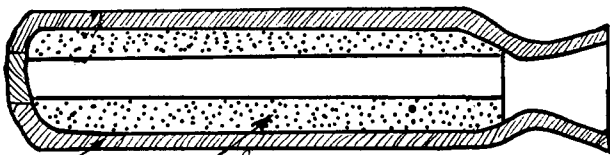


הרקמות הרוסיות

הרקע לעדיפותם

אליה אהרון נחשון

במהירות גדולה — כלומר יצור מסתגזים גדולה בכל שניה — או על-ידי יציאת סילון-הגזים במהירות גדולה, או על-ידי קביעת ערכים (גדלים) גדולים לשני הגורמים. את כוח-ההדף מודדים בק"ג או בטונות.

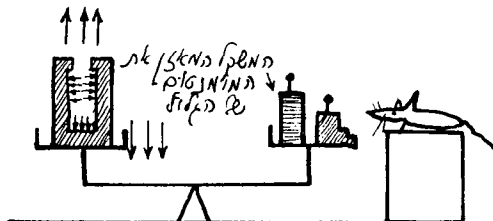
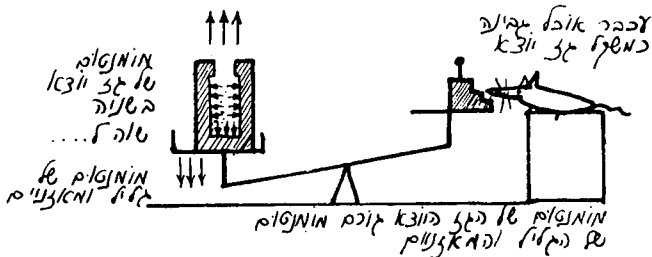
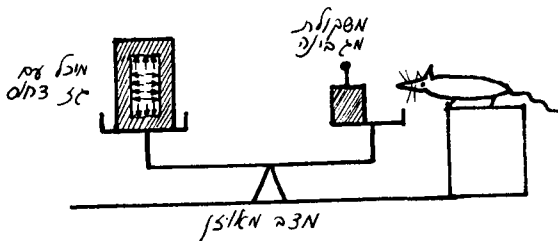


אולימפוס

פארא-אפולו

מנוע דלק-מוצק

האם ניתן להגדיל את מהירות שריפת הדלק — וכיצד? בתשובתנו לשאלה זו עלינו להבדיל בין מנוע בעל דלק מוצק ובין מנוע בעל דלק נוזלי ובדרכי-הבעירה של חומרי-ההדף המוצקים והנוזליים. מהירות הבעירה של חומרי-ההדף המוצקים תלויה בלחץ הבעירה ונמדדת בס"מ לשניה.



במאמרי שנכתבו בעקבות הספרים "רקטות וטילים של רוסיה" לד"ר א. פארי ו"טכנולוגיית-המרחב הרוסית" לאלפרד זרינגר, ניסיתי להשיב על השאלה: כיצד הצליחה רוסיה להתמודד עם ארה"ב ואף להביסה. לעת-עתה, במירוץ לחלל? עמדתי על הדרך בה נקטו הרוסים כדי להשיג את השגיהם וציננתי כי העדיפות הסובייטית מהבחינה הטכנולוגית מתבטאת בשניים: בבנין מנועים רקטיים בעלי כוח-הדף גדול — ובהנעה הרב-שלבית, הנותנת בידם את היכולת לשלח לחלל באמצעות רקטה יחידה, טונות רבות-יותר. מכפי שמסוגלים האמריקנים לשלח.

כדי להבין את ההשגים הרוסיים בשטח ההנעה, עלינו לעמוד על כמה פרמטרים* הקובעים את ההנעה. ההנעה הרקטית מבוססת על החוק השני מחוקי-התנועה של ניוטון, הנקרא: "חוק שימור כמות התנועה" — או "חוק שימור המומנטום".

מהו ה"מומנטום", או "כמות התנועה"? ניוטון מגדיר את ה"מומנטום" כמכפלת ה"מסה" של גוף במהירותו. מכפלה זו הנה ביטוי מדויק לרעיון אותו אנו מנסים להביע בדברנו על "מכה חזקה" — דהיינו, תוצאת מכה שהונחיתה על-ידי גוף אשר הנו גם כבד וגם מהיר. ניוטון מביע את חוק-שימור-המומנטום כדלהלן: "מידת שינוי כמות-התנועה הכללית של מערכת, שוה לסכום הכוחות החיצוניים הפועלים על המערכת".

כוח-הדף

נניח שלפנינו מיכל ובו גז דחוס המאוזן על-ידי משקל של גבינה. בקרענו פתח בדופן העליונה של המיכל, תצא דרכו מסה מסוימת של גז בכל שניה במהירות מסוימת; דהיינו, חלק מה"מערכת" — הגז — קיבל מומנטום, על אף שכוחות חיצוניים לא פעלו על המערכת. על-פי ניוטון פירוש הדבר שהמומנטום של המערכת לא השתנה ולכן חייב להופיע באותה מערכת מומנטום, שזה בגודלו והפוך בכיוונו, על-מנת לאזן את המומנטום של הגז הפורץ — דהיינו המאזניים עם גליל-הגז ירדו. כדי לאזן מחדש את המאזניים, יש להוסיף משקל המאזן את כמות-התנועה של הגליל בשניה. נוכל איפוא לרשום:

כוח-הדף של הגליל = מסת הגזים היוצאים בשניה \times מהירות יציאתם.

מכאן שניתן להשיג כוח-הדף גדול על-ידי שריפת הדלק

* גורמים-משפיעים.

הפיה עד למהירות הקול. לאחר זאת מתבדרת הפיה; והמהירות הולכת ועולה, עד שהיא מגיעה בחתך-היציאה למספר פעמים מהירות הקול. תכנון הפיה קובע אף הוא את ערכו של כוח-הדחף. ראינו לעיל ש...

כוח-הדחף = מסת-הגזים היוצאת בשניה \times מהירות יציאתם — וזאת כשלחץ-היציאה של הגזים שווה ללחץ האטמוספרי. באם נתכנון את הפיה כך שלחץ-היציאה ישווה ללחץ האטמוספרי שבגובה פני-הים, הרי ככל שנגביה יעלה לחץ-היציאה על הלחץ האטמוספרי והכוח הפועל בכיוון יציאת הגזים יגדל בערך השווה למכפלת שטח חתך-היציאה בהפרש הלחצים.

ברור, שבערך זה יגדל גם כוח-הדחף. מכיון שהלחץ האטמוספרי הולך וקטן עם הגובה, ילך הפרש הלחצים ויגדל עם הגובה — והדחף של הרקטה יהיה מפסימלי כשהלחץ האטמוספרי ישווה לאפס — דהיינו, כשהרקטה תנוע בחלל.

עד כה בחנו את אפשרות הגדלת הדחף על-ידי הגדלת המסה העוזבת את הפיה בכל שניה או על-ידי הגדלת מהירות היציאה של הגז — דהיינו, על-ידי תכנון מבנה המנוע והפיה. טבעי הדבר שנשאל עצמנו האם אין טיב החומר-ההודף משפיע על הדחף? ואמנם ערכו של חומר-ההודף נקבע (בק"ג) על-פי הדחף, אשר יכול לתת ק"ג אחד של חומר-ההודף הנשרף תוך-שניה.

לערך זה אנו קוראים „תקיפה סגולית“; וברור, שחומר-ההודף אשר לו „תקיפה סגולית“ גבוהה יותר, יתן יותר דחף מאשר חומר-ההודף בעל „תקיפה סגולית“ נמוכה-יותר. אפשר להוכיח שהקשר בין ה„תקיפה הסגולית“ של חומר-ההודף ובין מהירות-היציאה של הגזים שלו נתון על-פי הנוסחה:

$$\text{מהירות היציאה של הגזים} = \text{תקיפה סגולית} \times \text{האוצת המשיכה של כדור-הארץ.}$$

מכיון שתאוצת המשיכה הנה, לצורך המעשי שלנו, גודל קבוע — הרי ש„התקיפה-הסגולית“ עולה עם עלית מהירות יציאת הגזים; מכאן, שערכו של חומר-ההודף נקבע על-פי מהירות היציאה של מוצרי-השריפה שלו. אם נבדוק מהם הגורמים הקובעים מהירות זאת, נמצא שהיא תלויה בשני יחסים:

- (א) בין טמפרטורת השריפה ובין משקל מולקולרי *;
- (ב) בין לחץ השריפה ובין לחץ היציאה מהפיה.

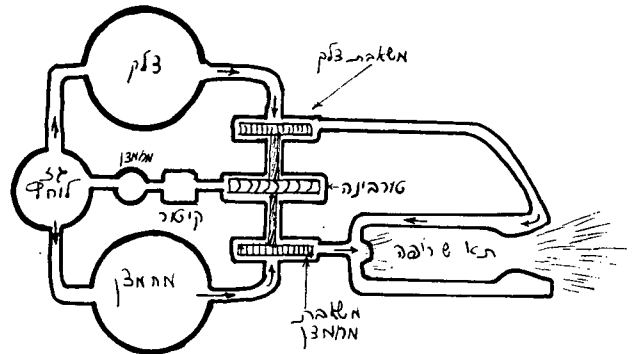
ננסה עתה להבין מדוע תלויה מהירות היציאה בשני יחסים אלה.

על-פי התיאוריה הקינטית של הגזים משמשת הטמפרטורה ביטוי למהירות התנועה של מולקולות הגז; וככל שהטמפרטורה גבוהה, עולה מהירות התנועה של המולקולות. מכאן, שבשביל טמפרטורה גבוהה-יותר, תהיה מהירות הגז גבוהה יותר. אם נביא שני חומרים-הודפים בעלי משקל מולקולרי שונה לאותה טמפרטורה של בעירה, תהיה למולקולות של שני הגזים אנרגיה קינטית שווה; ומכיון שהמסה של מולקולה אחת תהיה קטנה משל השניה — תצטרך מהירותה להיות גדולה-יותר.

כיצד משפיע לחץ השריפה? על-ידי הגדלת לחץ השריפה

* משקל מולקולה של החומר.

עם התחלת הבעירה עולה הלחץ במנוע במהירות; בהתאם לתכנון מגיע לחץ זה לערך יציב כאשר כמות-הגזים הנוצרת במנוע שווה לכמות-הגזים הנפלטת ממנו.



מנוע דלק נוזלי

במנועים אלה הלחץ הנו גדול, הגזים — אשר מידת חומם גבוהה — מחממים את פלדת המנוע ומקטינים את חוזקה. מכאן שכל נסיון להגביר יתר-על-המידה את הלחץ במנוע על-מנת להגדיל את כמות הגזים הנוצרים עלול לגרום לפיצוץ המנוע. במנועים בעלי דלק נוזלי תלויה מהירות יצירת הגזים במהירות השאיבה של המשאבות — דהיינו בהספקת כמויות גדולות של דלק בכל שניה.

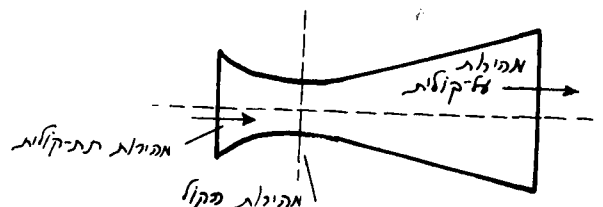
לדוגמה: בטיל "V-2" היה על הגרמנים לבנות טורבינה מיוחדת, בעלת הספק של 675 כוח-סוס ב-5000 סיבובים לדקה, כדי לשאוב אל תוך תא-השריפה 75 ק"ג חמצן ו-50 ק"ג אלפא-חמצן בשניה.

מערכת-שאיבה זו היתה באותה עת השג הנדסי יוצא-מן-הכלל; וברורים הקשיים בפניהם היו ניצבים המתכננים אילו רצו להגדיל יותר את כמות החומר הנשאב בשניה.

הבה ונבחון כיצד ניתן להוציא את הגזים מהמנוע במהירות מפסימלית:

בשעת הפריצה דרך פתח-היציאה יורד לחץ הגזים — ומהירותם תם גדלה. פתח המתוכנן במיוחד להפיקתה, באורח יעיל ביותר, של אנרגית-לחץ לאנרגיה-של-תנועה נקרא „פיה“.

כדי להשיג מהירויות-יציאה גדולות משתמשים בפיתח-לחץ, על



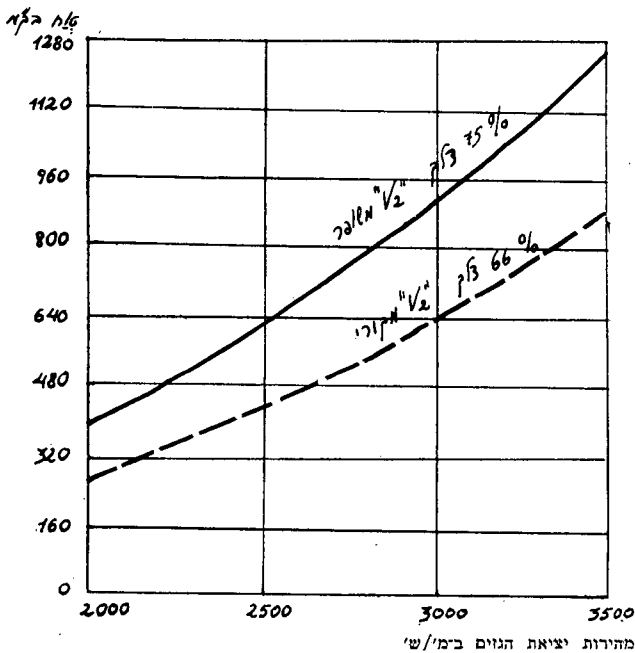
פיה

שם המהנדס השבדי אשר פיתח פיה זו בשלהי המאה התשע-עשרה, כשערך ניסויים להגברת מהירות זרימת הגזים.

בפיה זו, אשר מתכנסת בתחילה, יורד הלחץ — ומהירות זרימת הגז, שהיתה עד אז תת-קולית, עולה בחתך הצר של

מהו הקשר בין מהירות הרקטה בסוף הבעירה - לביצועיה?

אם הרקטה הנה בליסטית, היא טוחה תלוי: בנובה בו נפסקת הבעירה; בזווית ההטלה; במהירות הרקטה בסוף הבעירה. מכאן, שכדי להשיג טוח מפסימלי לגבי גובה זווית נתונים — נצטרך להגדיל את מהירות סוף-הבעירה של הרקטה. להלן מובא גרף המתאר את טוח הטיל "V-2" כפונקציה של מהירות יציאת הגזים. אילו היינו משפרים את הקונסטרוקציה, ובאותם תנאי משקל ומשקל-ראש, היינו לוקחים 75% דלק — במקום 66% דלק שנלקח ב-"V-2" המקורי.

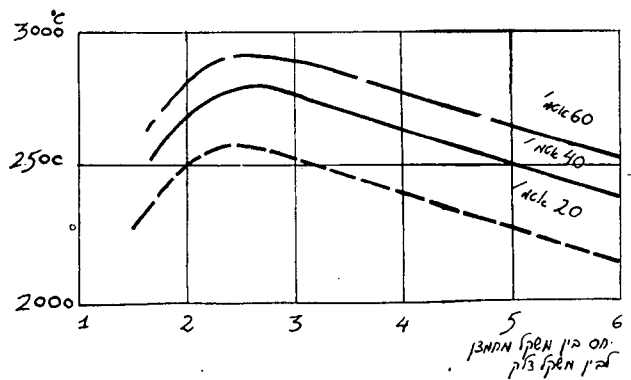


ההתפתחות ברוסיה לפני מלחמת העולם השנייה

במאמר הקודם הכרנו כבר את המהנדס סטנדר, אשר ב-1908 החל לעסוק בפיתוח מנוע-רקטה. אך מאמצי הרוסים הואצו החל מאוקטובר 1929, כאשר המציא שטילוב תא-שריפה היכול לעמוד בטמפרטורות גבוהות. גם בשטח החומרים-ההודפים עסקו הרוסים בפיתוח. מחקר סיסטמטי על דלקי רקטות ערך גלושקו וסיכמו בספר שיצא לאור ב-1936. בתקופה שבין 1930—1936 בנה גלושקו מספר מנועי רקטות. לשיא הצלחתו הגיע ב-1936 כאשר פיתח את המנוע ORM-65, אשר ניצל כדלק חומצה-חנקנית ונפט. מנוע זה סיפק דחף של בין 155—175 ק"ג; ו"תקיפה סגולית" של 210 שניות. הדלק סופק לתא-השריפה על-ידי לחץ, כאשר הדלק זורם בהקף תא-השריפה על מנת לקררו — ורק אחר כך מוזרק לשריפה. מנוע זה שימש ברקטת-השיוט 212, אשר הואצה בתחילת תנועתה על-ידי מאיץ מוצק-דלק.

להלן מובאת טבלה המציגה את פיתוח הרקטות ברוסיה בין השנים 1930—1936:

אנו מעלים את טמפרטורת השריפה; וברור שעל-ידי כך אנו מגבירים את מהירות היציאה של הגז.



לסיכום: כדי להשיג מהירות-יציאה גבוהה, עלינו לנצל טמפרטורות-שריפה גבוהות ככל האפשר — ולהשתמש בחומרי-הדף אשר המשקל המולקולרי הממוצע של מוצרי-השריפה שלהם קטן ככל האפשר. בפיה אנו הופכים אנרגיה של חום לאנרגיה של תנועה.

מהירות הרקטה

הדחף הפועל על מסת הרקטה מאיצה למרומים. ראינו שככל שהרקטה מגביהה — גובר הדחף, בשל ההפרש בין לחץ-היציאה והלחץ האטמוספרי; יחד עם זאת — קטנה מסת הרקטה, בגלל הדלק הנשרף. הדחף הגובר והמסה הקטנה מגבירים את התאוצה, ולכן את מהירות הרקטה, עד למהירותה המפסימלית — מהירות סוף הבעירה.

מתוך ניתוח זה מתברר שמהירותה המפסימלית של הרקטה תלויה בשני גורמים עיקריים: מהירות היציאה של הגזים; יחס מסת הדלק למסה הכללית של הרקטה לפני ההמראה. אם נבדוק, ברקטות שונות בהן שונה אחוז מסת הדלק ממסת הרקטה לפני ההמראה, את מידת גידול מהירותה הסופית של הרקטה ביחס למהירות יציאת הגזים, נקבל את התוצאות שבטבלה הרצופה:

יחס בין מהירות סוף הבעירה למהירות יציאת הגזים	יחס בין מסה לפני ההמראה למסה לפני ההמראה — דלק	אחוז מסת-הדלק ברקטה
1/2	1.65	40%
1	2.72	63%
2	7.39	87%
3	20.1	95%
4	54.6	98.7%

בשל שיקולים הכרוכים בבעיות-מבנה לא ניתן לבנות טיל בו יעלה יחס המסות על 20 — וגם ערך זה הנו ערך גבולי — הרי שלא נוכל להשיג בטיל חדי-רגי מהירות העולה על שלוש פעמים מהירות יציאת הגזים.

פה גבוה. המנוע R-14 מיצר דחף של 100 טון, בלחץ של 60 אטמוספירות בתא-השריפה. המושג על-ידי משאבת-טורבינה דו-דרגתית. דלק לקירור קירות הפיה מגיע ישר ממכל הדלק; וחמצן נוזלי משמש כמחמצן לדלק (נפט או אלכוהול). כיום, על יסוד ספרים ונתונים טכניים המגיעים למערב, קל יותר לתהות על המתהווה בתחום זה בברית-המועצות. ונראה שגם עתה מצויים שם ארבעה טיפוסים של מנוע-רקטות בעלי דלק נוזל: הראשון הנו הטיפוס הסובייטי של ה-"V-2", בעל דחף של עשרים וחמישה טון; השני הנו מנוע משופר של ה-"V-2" שנקרא R-10 — ולו דחף של שלושים וחמישה טון; השלישי והרביעי הנם ה-R-14 וה-R-14 A — בעלי דחף של מאה טון ומאה ועשרים טון. שני המנועים הראשונים מנצלים כדלק את החמצן הנוזלי והאלכוהול ושני האחרונים משתמשים בחמצן נוזלי ונפט.

הסימון הרוסי	המתכנן	התאריך	הדחף
OR-1	טסנדר	1930-31	5 ק"ג
OR-2	טסנדר	1932	50 ק"ג
ORM-1	גלושקו	1931	—
ORM-5	גלושקו	1932	—
ORM-12	גלושקו	1932	—
ORM-50	גלושקו	1933	—
ORM-52	גלושקו	1933	300 ק"ג
ORM-65	גלושקו	1936	150-175 ק"ג

בדרכו של גלושקו המשיך המהנדס הסובייטי ל.ס. דושקין, אשר יצר מספר מנוע-רקטות בשנים 1943-1945.

הסימון הסובייטי	המפתח	התאריך	הדחף
Rb-1	דושקין	1943	300 ק"ג
Rb-2	דושקין	1945	600 ק"ג
Rb-3	דושקין	—	900 ק"ג

למעשה היו ה-Rb-2 ו-Rb-3 צירופים שונים של ה-Rb-1, אשר נתנו דחף כפול ומשולש של המנוע הבסיסי, ה-Rb-1.

לאחר מלחמת-העולם השנייה

מיד עם סיום המלחמה היתה התמונה מעורפלת והגיעה רק אינפורמציה בעלת ערך מועט על ההתקדמות שחלה ברוסיה בשטח ההנעה הרקטית. על כל פנים ידוע שהרוסים ניצלו מאוד את הטכנולוגיה הגרמנית בפיתוח רקטות ובשלב הראשון שיפרו את המנוע הגרמני של הטיל "V-2". מקור חשוב לאינפורמציה על אודות המאמצים הרוסיים שימשו הטכנאים ואנשי-המדע הגרמניים אשר שוחררו לאחר שנים של עבודת-כפיה בתחום הרקטות. מתוך האינפורמציה של ה"חוזרים" ניתן

לשרטט את התמונה לפחות בקויה הכלליים ביותר. ה-אינפורמציה על אודות ה-קטה R-14 ועל המנוע שלה הנה בעלת חשיבות יוצאת-דופן; שכן ניתן ללמוד ממנה על תפיסת-היסוד הרוסית בבנין מנועי רקטות.

בסיום מלחמת-העולם המ-טרה בברה"מ היתה לקבוע שימוש בדלק סטנדרטי, ו-להשיג ביצועים טובים של רקטות על-ידי מנועים פשוטי-מבנה בעלי דחף גבוה, הפועלים בלחץ-שרי-

למטה מובאת טבלה המוסרת את התכונות העיקריות של המנועים הרוסיים.

המהנדסים הרוסיים נטלו את מנוע ה-"V-2" הגרמני ופיתחוהו עד למפסיומו. בעזרת מכונות-היצור שנפלו לידיהם יצרו הם, ובחננו בירי, מספר רב של מנועים; וכך השיגו, "בסיון בהעפ-לה" — שהנו הגורם העיקרי המאפשר להעלות אמינותו של מנוע. על-ידי העלאת ביצועי המנועים השיגה ברה"מ "קדי-מות" של 5-7 שנים בפיתוח מנועים גדולים בעלי דלק נוזלי. את שיפור המנועים השיגו הרוסים על-ידי השבחת פלדת תא-השריפה — דבר שאיפשר להם להעלות את עצמת הלחצים בתא. מתוך טבלת נתוני המנועים רואים אנו כי עליה בלחץ הבעירה בתא-השריפה מ-15 אטמוספירות שב"V-2" ל-60 אטמוספירות ב-R-14 A גורמת לעליה ב"תקיפה הסגולית" מ-210 שניות שב"V-2" ל-250 שניות ב-R-14 A; כלומר, עליה בדחף של כל ק"ג דלק הנשרף בשניה. כן רואים אנו מתוך הטבלה שבמנוע R-14 A נשרף בשניה חומר-הודף רב פי ארבעה מאשר ב"V-2"; והדחף שבגובה פנייהים עולה מ-25 טון ב"V-2" ל-120 טון ב-R-14 A. ברור, ששינויים אלה מחייבים שינויי-ממדים במבנה הפיה.

התכונה הטייל	"V-2" — רוסי	R-10	R-14	R-14 A
הדחף ע"פ הים	25 טון	35 טון	100 טון	120 טון
הדחף בריקנות	30 טון	41 טון	120 טון	135 טון
לחץ בתא-השריפה	15 אטמוספירות	20 אטמוספירות	58 אטמוספירות	60 אטמוספירות
דלק	75% אלכוהול	75% אלכוהול	נפט	נפט
מחמצן	25% מים	25% מים	—	—
יחס בין חמצן לדלק	1.23	1.23	2.28	2.28
תקיפה סגולית	210	211	242	250
ע"פ הים (בשניות)	120 ק"ג	165 ק"ג	415 ק"ג	480 ק"ג
משקל החומר-ההודף הזורם בשניה	40 ס"מ	40 ס"מ	40 ס"מ	40 ס"מ
קוטר צואר הפיה	75 ס"מ	85 ס"מ	150 ס"מ	126 ס"מ
קוטר היציאה מהפיה	3.42	4.5	16	10
יחס השטחים*	930 ק"ג	—	1090 ק"ג	—
משקל	—	—	—	—

* יחס השטחים שבין חתך היציאה לחתך צואר הפיה.

הערות	טוח (ק"מ)	אורך משוער	משקל-ההמראה (טון)	מנוע	דחף/טון	סמ
דרגה אחת	400	15 מ'	20	R-10 אחד	35	T-1
שתי דרגות	3,000	30 מ'	50	R-14 A אחד R-10 אחד	דרגה 1—120 דרגה 2—35	T-2
שלוש דרגות	9,000	36 מ'	82	R-14 שניים R-14 A אחד R-10 אחד	דרגה 1—200 דרגה 2—120 דרגה 3—35	T-3
שלוש דרגות	10,000	36 מ'	85	R-14 A שניים R-14 A אחד R-10 אחד	דרגה 1—240 דרגה 2—120 דרגה 3—35	T-3 A

על-ידי שימוש במנועי-הי-סוד שראינום לעיל, ובצ-רופיהם, השיגו הרוסים את הדחף הגדול לרקטות ה-מלחמתיות והמדעיות ש-להם. הטבלה משמאל מציגה את נתוניהם של עיקרי ה-טילים-הבליסטיים שבידי ה-רוסים, כפי שחושבו במערב. באיזה מנועים השתמשה ברה"מ במבצעי-החלל שלה? השימוש בטכנולוגיה הרק-טית הגרמנית, והשגת דר-גת אמינות גבוהה במנו-

לשלח מטענים בעלי משקל גדול יותר לטנחים גדולים יותר (כולל חלל). יתרון זה אין בו כדי להעיד על יתרון בכל שטחי ההנעה. יתר על כן בשטח ההנעה ע"י מנועים בעלי דלק מוצק לטנחים ארוכים יש כנראה לארה"ב עדיפות על ברה"מ. יתרון זה מוצא את ביטויו בשני הטיילים ארוכי-הטווח של ארה"ב: הפולריס — טיל לטוח 2500 ק"מ המשוגר מצוללת; המיניטמן — טיל תלת-דרגתי בין-יבשתי המשוגר ממטמור-רות (Silo) תת-קרקעיות.

הרי טבלה המעריכה את הרכב המנועים הרוסיים במבצעי החלל.

עם מעלים את ההשערה שהרוסים השתמשו במבצעי-החלל שלהם באשכולות בני מספר מנועים כמאצים. גישה כזאת נותנת בידיהם, במאמץ-פיתוח קטן יחסית, מאיץ בעל ביצועים גבוהים ביותר.

לסיכום

מתוך הניתוח הנ"ל מסתבר, שרוסיה הסוביטית עדיפה כעת על ארה"ב בשטח ההנעה של רקטות בעלי מנועים המנצלים דלק-נוזלי. רקטות אלו נותנות בידי ברית-המועצות את היכולת

מנועי המאיץ בדרגה 1	יחס דחף למשקל	דחף דרגה 1 (טון)	יחס משקל המטען למשקל הרקטה	משקל הרקטה בהמראה (טון)	מטען יעיל (ק"ג)	השנה	
אשכול של 2 מנועים R-14	1.4	200	1710	140	85	1957	„ספוטניק" 1
אשכול של 2 מנועים R-14	1.4	200	280	140	500	1957	„ספוטניק" 2
אשכול של 2 מנועים R-14	1.35	200	110	160	1300	1958	„ספוטניק" 3
אשכול של 4 מנועים R-14	1.35	400	65	295	4500	1960	„ספוטניק" 4—6
אשכול של 4 מנועים R-14 + דרגה 2 משופרת	1.4	400	44	285	6500	1961	„ספוטניק" 7—8
אשכול של 4 מנועים R-14	1.35	400	63	295	4700	1961	„ספוטניק" 9—10
אשכול של 4 מנועים R-14	1.35	400	63	295	4700	1961	„ווסטוק" 1—2
לשם השוואה — נבחון את הרקטה האמריקנית „אטלס"							
שני מנועים, בדחף 81 טון כל אחד	1.34	468	100	122	1250	1961	„אטלס"