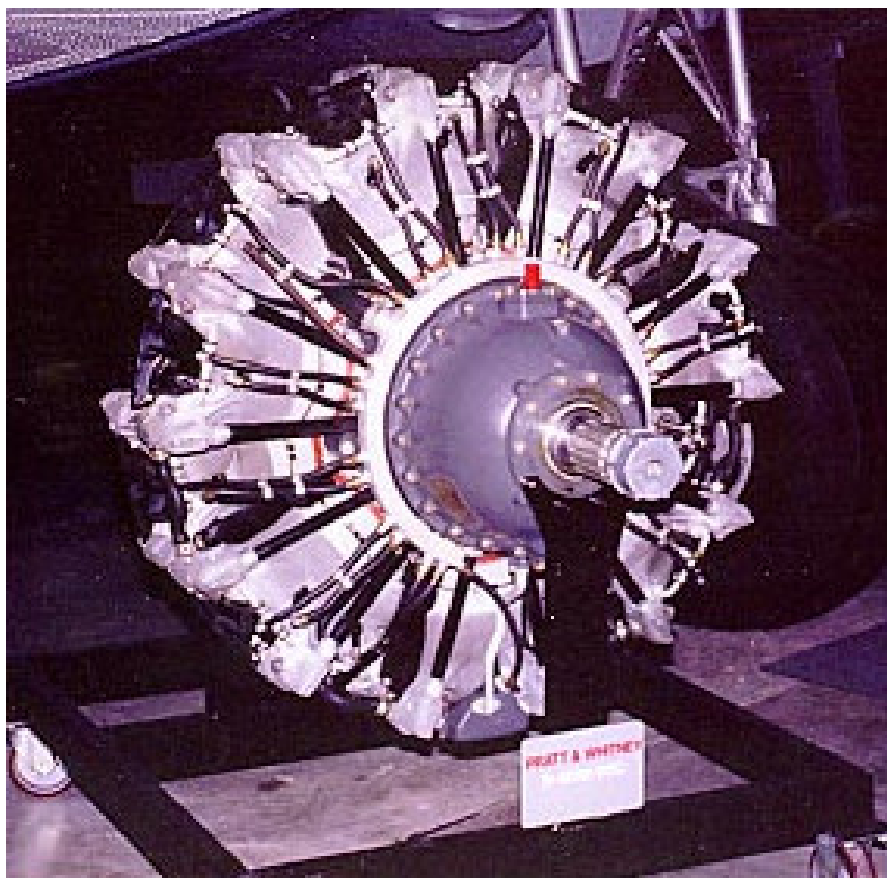


מערכת הנעה למטוסים



מערכת הנעה למטוסים

(תורגם מתוך: *Aircraft Power Plant Handbook* בהוצאת CAA משנת 1949).

פתח דבר

הספר הנדון נמצא ברשותי מזה עשרות שנים. גם בעבר, בתפקידי כמכונאי מטוסים בחיל האוויר, והן היום כטייס חובב, אני מעיין בו מדי פעם על מנת למצוא תשובות לשאלות הנוגעות למבנה המנוע, תפקודו ומערכותיו. למרות השנים הרבות שחלפו, הספר עדיין אקטואלי, וברובו משקף את נושא המנועים נכון לימים אלו. מתברר שמעט מאד השתנה בתחום מנועי השריפה הפנימית ברמת העיקרון, ומה שהיה נכון לפני שישים שנה, במפתיע, נכון וישים גם היום. מכל מקום, אל לנו לשכוח שמנועי מטוסים פותחו בתחילת המאה הקודמת והספר נכתב במחצית המאה הקודמת, ובהתאם יש להיזהר בהסקת מסקנות הרלוונטיות להיום. ואף על פי כן, מעניין לעקוב אחרי החשיבה שרווחה בתחום לפני מספר עשרות שנים מול המציאות המוכרת לנו היום.

מצאתי לנכון לחלק את הידע עם אנשים שתחום מנועי המטוסים אינו מוכר להם לעומק, או לאלו המחפשים מידע נוסף, ולבעלי רישיון טייס במיוחד. לפיכך תרגמתי פרקים נבחרים, שלעניות דעתי רלוונטיים גם היום לטייסי התעופה הכללית. ניסיתי לשמור בעת התרגום על דבקות בטקסט המקור אולם לעתים היה צורך לסטות ממנו מעט או לקצר/להשמיט בכדי לשמור על בהירות הכתוב. ישנן מספר הגדרות טכניות שלא מצאתי להן תרגום לעברית ולכן השתדלתי למצוא תרגום מתאים או שהשארתי את המונח המקורי. במקום שטעיתי אשמח לקבל תיקון/הערה וליישם במקום הרלוונטי.

הפרקים שתורגמו מתחלקים לפרקים כלליים ובעלי מידע תיאורטי, ופרקים המתארים את מערכות המנוע. לא כל פרקי המערכות ולא כל המידע תורגם. החלטתי לתרגם רק את אלה שיביאו תועלת לקורא של ימים אלו במסגרת התעופה הקלה, והשמטתי את הפרקים או חלקי המידע שאינם רלוונטיים יותר לתעופה של זמננו.

הפרקים התיאורטיים מכילים מידע בסיסי לחישובי כוחות והספקים, עליהם מבוסס המנוע. פרקים אלו, במידה והקורא בוחר לעיין בהם, מחייבים הבנה בסיסית בפיסיקה ותשומת לב לא קטנה.

הפרקים שהחלטתי לתרגם הינם:

- א. התפתחות מערכות הנעה למטוסים
- ב. דרישות מערכת הנעה הבסיסית
- ג. מחזורי מנוע ועקרונות
- ד. ביצועי מנוע
- ה. תכנון ומבנה מנוע
- ו. מנגנון הפעלת השסתומים ותזמון
- ז. רעידות
- ח. מערכת הקירור
- ט. אידוד והזרקה
- י. מערכת הצתה
- יא. מערכת גידוש
- יב. התנעה, מתח וויסות מתח (לא מתורגם)
- יג. דלקים ומערכות דלק
- יד. סיכה ומערכת השמן
- טו. התקנות מנוע
- טז. מדחפי מטוס
- יז. הוראות תפעול כלליות

איציק מה-יפית, מאי 2006.

ספר זה משמש להיכרות כללית בלבד עם מערכות המנוע ואינו מחליף את ספרות היצרנים

א. התפתחות מערכות הנעה למטוסים

הנוהג הנוכחי מייחס את המנוע, המדחף וההתקנות החיוניות לחיבור המנוע למטוס, לצורך פעולה נאותה, כיחידה אחת הנקראת "מערכת ההנעה". כיוון שכל אלה משפיעים על ביצועי ההתקנה כולה במטוסים מודרניים, הספר הזה נושא את הכותרת של "ספר עזר למערכת הנעה למטוסים". מנוע המטוס ומנוע המכונית דומים ביסודם בעקרון ובתכנון. שניהם הופכים אנרגיה כימית של תערובת דלק ואוויר לעבודה יעילה בתהליך זהה של בעירה פנימית. שניהם כוללים את אותו המנגנון הבסיסי. שניהם מספקים את הכוח המניע לכלי התעבורה שבו הם מותקנים. הפעולה של מנוע המטוס, מכל מקום, שונה בדרכים רבות מזו של מנוע הרכב. הביצועים הנדרשים למנוע הרכב הם מוגבלים יחסית, ומשקל יכול להיות בשימוש נדיב על מנת לוודא שוליים רחבים של בטיחות. אפילו הנהג הלא מנוסה יכול לעשות מעט מאד כדי להתעלל במנועו, ומשום כך מנוע הרכב הינו fool proofed. בניגוד לכך, ממנוע המטוס נדרש טווח ביצועים רחב, בעוד שמשקל מערכת הנעה חייב להיות מזערי לטובת היעילות הכוללת של המטוס.

ההתקדמות באומנות תכנון ובניית מנועים נמדדת בדרך כלל תחת הכותרות הבאות:

1. הגדלת תפוקה ליחידת משקל.
2. שיפור בתצרוכת דלק.
3. הקטנת שטח הפנים לתפוקה נתונה.
4. הגדלת האמינות ואורך החיים.

בימים המוקדמים של התעופה, סעיף 1 שלמעלה היה היחיד בעל החשיבות העליונה. זה היה נכון כיוון שרק טיסות קצרות, במהירות יחסית נמוכה, נחשבו מעשיות והגורמים האחרים היו בעלי חשיבות מזערית. מכל מקום, ימים אלו פינו מקום לתקופה מודרנית יותר בה שיפור בחומרים, תכנון ודלקים אפשרו הופעת מנועים בעלי 3,500 כוח סוס ויותר. מנועים אלו בני דורנו פועלים לשביעות רצון, תחת תנאי פעולה נורמאליים, יותר מ – 1,000 שעות. (להזכירכם, הספר נכתב לפני כשישים שנה)

מאמצים לפיתוח מנועים קלי משקל, שהיו שיקול עליון בימי התעופה המוקדמים, הצליחו עד לנקודה שבה התקדמות נוספת בכיוון זה הינה בחשיבות מזערית. כתוצאה מכך, ההתפתחות נעה לכיוון שאר הכותרות שלמעלה, עם תשומת לב שניתנת להתקנת המנוע במטוס. המאמץ כלפי האמינות היא כעת בחשיבות עליונה, ושלמות חייבת להיות היעד הסופי.

היום זה מובן באופן כללי שהתקדמות בכיוון אחד נקנית בדרך כלל יותר ויותר במחיר של הקרבה בכיוון אחר. שיפור התכנון מקבל צורה של פשרה נבונה ומאוזנת בין דרישות מנוגדות. בכל צעד מעשי, המתכנן נאלץ לבצע פשרות כיוון שהדרישות להשגת התוצאות בכיוון אחד הינם לעתים מנוגדות באופן הדדי למקובל באחרות.

מכשירי המנוע הבאים נחשבו כעזרים מספקים לטיסה מוצלחת בשלבי הפיתוח המוקדמים: מד סיבובי מנוע לחיווי מהירות פעולת המנוע; מחווי לחץ וטמפרטורת שמן לחיווי ביצועי מערכת הסיכה והטמפרטורה והצמיגות של השמן. בקורות המנוע, במרבית המקרים, הכילו מצערת, בקרת הצתה, בקרת תערובת, מתג הצתה ושסתום ניתוק אספקת הדלק. המצערת אפשרה לטייס לווסת את הכוח ומהירות המנוע; בקרת ההצתה אפשרה לו לווסת את תיאום ההצתה לצורך ההתנעה; בקרת התערובת ספקה לו את האמצעים להפחית את כמות הדלק ביחס להפחתת צפיפות האוויר בגובה; מתג ההצתה ושסתום הדלק מאפשרים לו לנתק את ההצתה ואספקת הדלק.

זווית להב המדחף הייתה קבועה כך שהמדחף תיפקד כבקרת שליטה על ביצועי המנוע, הסטייה הנדרשת מכך נשלטה על ידי המצערת.

כל האמור לעיל עדיין נכון ברב המטוסים הקטנים שבשימוש היום (להזכירכם – במחצית המאה הקודמת), אולם טווח הביצועים שלהם מתקרב לנקודה בה תוספת ציוד, כגון מדחפים בעלי פסיעה משתנה, יידרשו על מנת להשיג יעילות מירבית.

ניתן להשוות מדחף בעל פסיעה קבועה למכונית מרוץ בעלת מהירות קדמית אחת בלבד. מכוניות אלו מצוידות בהילוכים בעלי יחס מהירות כה גבוה עד כי הן נתקלות בבעיה להתחיל בתנועה במהירות נמוכה, ובדרך כלל מותנעות בדחיפה. הפיתוח של מטוסים גדולים וכבדים, שענה על הדרישות של מטוסים צבאיים ומסחריים, הסתיים בהגדלת עומס הכנף (יחס משקל לשטח הכנף). דבר זה דרש "תמסורת נמוכה" או קביעת זווית קטנה ללהבי המדחף על מנת להגדיל את מספר סיבובי המנוע, תפוקת הכוח ויעילות המדחף, ועל ידי כך הגדלת הסחב היעיל לאפשרות המראות במרחבים מוגבלים. זה בהשוואה לתמסורת שתי מהירויות ברכב, אחת להכניסו לתנועה, והשנייה לשימוש במהירות גבוהה יותר בכדי להשיג יעילות טובה יותר.

כתוצאה מפיתוח מרוכז, מטוסים הפכו בהדרגה ל"נקיים" יותר מבחינה אווירודינמית, עקב הסרת גרר אווירודינמי בלתי נדרש. דבר זה הושג על ידי פיתוח כני נסע מתכנסים, קווי מתאר טובים יותר וחיפויים משופרים. תוצאת התכנון "הנקי" הייתה עליה בטווח המהירויות; מכאן נדרש לקבל גם טווח זוויות להבי המדחף למניעת סיבובי יתר של המנוע וביצועי מדחף יעילים יותר, לאחר שהמטוס הגיע לגובה השיט והמהירות. דבר זה דומה לשילוב הילוך לגבוה יותר ברכב. המדחפים החדשים מצוידים במקבעי מהירות אוטומטיים השולטים בזווית הלהבים, שמצדם הם בעלי טווח רחב במטרה לנצל את היעילות הטבועה במטוסים מודרניים.

הפעלת מטוסים בגובה רב יותר, לצורך הענקת נוחיות גבוהה יותר לנוסעים ומהירות גבוהה יותר, דרשה פיתוח של מדחסי גידוש יעילים במטרה לשמור על הספק בגבהים בהם האוויר בעל צפיפות נמוכה יותר. כיוון שההשתנות האוטומטית של להבי המדחף נותנת טווח נרחב של מהירויות מנוע ללא תלות במצב המצערת, מדחס הגידוש מאפשר שינוי משמעותי בתפוקת הכוח, הנשלט על ידי המצערת. שני גורמים אלו, ביחד עם תפוקת הספק גדולה יותר, חייבו בקרה מדויקת יותר של יחס התערובת על ידי הטייס.

הדרישה לתוספת הספק על מנת לשאת מטענים גדולים יותר, יצרה התקדמות מהירה של תהליכים בתורת המתכות והתכנון, במטרה להגדיל את חוזק חלקי המבנה של המנוע ולהגדיל את אמינותו. באותה העת, המפעילים דרשו הקטנת עלויות התחזוקה והתפעול. תפוקת הכוח של המנועים גדלה פי עשר במהלך שלושים שנה, ובאופן טבעי גררה הגדלה משמעותית בצריכת הדלק לשעת טיסה.

חסכון בצריכת הדלק הינו בעל חשיבות גדולה, כיוון שהתחליף הוא מטען או טווח גדולים יותר. לפיכך, המאייד, המכיל יחידה פשוטה לאספקת תערובת נאותה במנועים קטנים בעלי מדחף פסיעה קבועה, הפך יותר ויותר לבעל מנגנון מורכב, הדורש תשומת לב של הטייס בכדי לשמר את הדלק ולשמור על טמפרטורות הפעולה בתוך המגבלות.

מעניין לציין שעם ההתקדמות המהירה של הביצועים, תקופת הפעולה בין שיפוצי המנוע עלה מבערך 75 שעות, בדגמים המוקדמים, למעל 1,000 שעות במודלים הנוכחיים הפועלים במסגרת המגבלות המותרות (כידוע כיום מדובר על יותר מ 2,000 שעות). מכיוון שיש יחס הפוך מוחלט בין הכוח המופק מהמנוע ומספר השעות בין השיפוצים, הזמן בין השיפוצים ירד משמעותית כאשר נדרשת תפוקת הספק גדולה יותר.

לסיכום, ההתקנות בתקופות המוקדמות של המנועים, מדחפים ואביזרים היו פשוטות מאד ובעלות יחס קבוע יחסית, בעוד במטוסי הימים האלו תפוקת הכוח, מהירות המדחף, גידוש וכו', היחס משתנה מאוד, והם בעלי מורכבות רבה יותר. הטייסים של דגמי המטוסים המוקדמים היו עסוקים בעיקר בפעילות הטיסה הנדרשת בכדי להגיע מנקודה אחת לאחרת. הטייס המודרני, הטס למרחקים גדולים יותר, חייב להבין בצורה יסודית את מגבלות הביצועים של המנוע בכדי להשיג יעילות תפעול מירבית הולמת לחסכון ובטיחות.

ב. דרישות מערכת הנעה בסיסיות

מנועים בני זמננו, ועתידיים, חייבים לענות על דרישות של תלות וסבילות. הגמול בדבקות לדרישות אלו והעונש להתעלמות מהם התאחדו ליצירת עידון בתכנון, שאינו עולה בכול סוג אחר של הנעה. בעיות תכנון קשות הופיעו, והתגברו עליהן בהתקדמות לקראת הישג זה. התקדמות נוספת תיעשה על בסיס המשכיות של עבודה החלטית בתחום ההנדסה. מקור הכוח לכל המטוסים האזרחיים הינו מנוע הבעירה הפנימית (שוב, לפני שישים שנה). עד כה, סוג זה של הנעה הוא היחיד שהוכיח את יכולתו לענות על כל הדרישות בתעופה האזרחית, למרות שהוכר בדרך כלל שמנועי המדחף הסילוניים ומנועי הסילון יציעו תחרות קשה למנועים בני זמננו. פיתוח של מנועי מטוס מוצלחים כוללים, כצמד ראשון, ניתוח של כל הדרישות הבסיסיות. מנוע המחליף את הסוגים הנוכחיים, יהיה זה מנוע קונבנציונאלי, מדחף סילון (Turboprop) או מנוע סילון, חייב לפגוש דרישות אלו ביתר הצלחה מאשר המנועים הנוכחיים. צעדנו הראשון, אם כך, בציפייה לעתיד, יהיה ניתוח של דרישות אלו והערכה לדרגה אליה הגיעו עד כה.

דרישות בסיסיות

הדרישות הבסיסיות והחשובות של מנוע המטוס, שהמתכנן חייב תמיד להתחשב בהן, הן:

1. **אמינות.**
2. **עמידות.**
3. **קומפקטיות.**
4. **משקל נמוך לכוח סוס.**
5. **תפוקה מוגדרת גבוהה.**
6. **עלות סבירה.**
7. **נצילות טרמית גבוהה.**
8. **חופש מרעידות.**
9. **פשטות אחזקה בשדה.**
10. **גמישות תפעולית.**

דרישות אלו אינן מפורטות בהכרח לפי סדר חשיבותן היחסי. מכל מקום, נראה שהראשון – אמינות, הוא החשוב ביותר, כיוון שמעשית כל האחרים, במידה זו או אחרת, שותפים לו. יתר על כן, נראה שקיימת חפיפה מסוימת ברשימה.

1. **אמינות** – כנאמר בפתיחה, המאמץ לגבי האמינות הינו בעל חשיבות עליונה. יש הסכמה לגבי התקנים של אמינות המנוע על ידי ה- CAA, יצרני המנועים ואנשי הרכש והתפעול. הניסיון המצטבר של העבר מאפשר יצירת תקני בדיקה המוכיחים בדיוקנות את יכולת מערכת הנעה לפעול בדרגות פעולה נתונות בתחום האמינות המוסכם. התחרות נותנת כל תגמול אפשרי ליצרן להציע את הדרגה הגבוהה האפשרית. שמרנות יתר בביצועי המנוע יאפשרו אורך חיים ארוך של המנוע, אולם ישיבה ממושכת על מדפי היצרן, כיוון שהמפעילים יבחרו בצורה הטבעית ביותר מנועים שמאפשרים העברת אחוז גבוה של התפוקה המירבית שלהם. מצד שני, התלהבות יתר ביחס לדרגות תפעול המנוע מוגבלת על ידי השיקול שמערכת הנעה חייבת לעבור מבחני הוכחה קשיחים ותדמית היצרן תפגע אם אמינות המוצר שלו תכשל בהגעה ליעדיו. הביצועים המוצעים, אם כך, הם אלה שלפי מיטב שיפוטו של היצרן לגבי התפוקה שהמנוע יכול להעביר, בתחום התקנים המקובלים של אמינות, וכפי שהוצגו בבדיקות של סוג המנוע.

נחיתת אונס והתרסקות מטוס, המסתיימים בכותרות בעיתונות, הם הפרסום השלילי היקר ביותר ליצרן. האמרה הישנה ביחס לאובדן המסמר והפסד במלחמה מתאימה מאד לחלקים העובדים במערכת הנעה של המטוס. באוויר, שום פריט במערכת הנעה, אפילו הזניח, אינו בלתי חשוב לחלוטין.

על ידי תשומת לב שקדנית וזהירה לפרטים הקטנים ביותר, מערכות הנעה השיגו בשנים האחרונות שיאים בלתי רגילים של מהימנות בחברות התעופה. בנושא המהימנות, ביטול מערכות קירור בנזלים אפשרה מניעת תקלות מנוע רבות. המהימנות המפתיעה הוצגה על ידי מנועי קירור אוויר בסדרת טיסות ארוכה, המתחילה בטיסת משלחת הקוטב וממשיכה בעשרות אלפים של טיסות מעבר לאוקיינוס, והיא ברורה כעת לכולם. אין הוכחה טובה יותר לשיפור המהימנות מאשר ביטול מערכת קירור מים.

כישלונות מערכת הנעה עדיין מתרחשים, אולם יש לזכור שלמרות שמספר שעות הטיסה גדל מאות מונים, כישלונות מערכת הנעה קטנו באחוזים. גורם זה משתקף בדרישות לגבי מנועים של Civil Air Regulations. בכדי לוודא את האמינות, כל דגם מנוע ומדחף חייבים לעבור בהצלחה בבדיקות מחמירות שמאשרות את כשירותם האווירית לפני קבלת האישור.

2. **עמידות** - עמידות ואמינות נחשבים בדרך כלל לגורמים זהים, כיוון שאי אפשר להזכיר אחד ללא השני. העמידות יכולה להיות מוגדרת כאורך חיי המנוע המושג באמינות הרצויה. העובדה שדגם מנוע סיים בהצלחה את ניסויי ההוכחה שלו הינו חיווי שהוא יכול לפעול בצורה נורמאלית במשך תקופה ארוכה לפני הדרישה לשיפוץ. מכל מקום, לא קיים מרווח מוגדר בין השיפוצים בדירוג המנוע.

העמידות המוכרת מוגדרת בעיקרה על ידי סוג ומצב הפעולה של המנוע. התקופה בין השיפוצים משתנה בהתאם לאחוז השימוש בהספק המתמשך המרבי, באופן כללי, התקופה משתנה בערך ביחס הפוך לרבע ההספק של הכוח המתמשך המרבי. תקופה זו תלויה במשתנים רבים, כגון מספר ההמראות שבוצעו, הטמפרטורה השוררת והסוג הייחודי של המנוע. הנקודה שיש להבינה היא שמשך פעולת מנוע אמינה (או עמידות) נקבעת בעיקרה על ידי השימוש המתמשך בתפוקת המנוע.

שימוש מושכל של תהליכי פעולת המנוע ואחזקתו, הביאו, לא רק לתוחלת חיים משופרת מאד של המנוע, אלא גם להגדלת הזמן בין השיפוצים, אשר עובר כעת את ה - 1,000 שעות על מספר מנועים בשימוש קווי התעופה.

3. **קומפקטיות** - קומפקטיות של מנוע חיונית לצורך התנגדות טפילה נמוכה, והיא חשובה במיוחד כאשר עוסקים במהירויות גבוהות. הצורה הגיאומטרית של המנוע נגזרת בדרגה גבוהה מהקומפקטיות הרצויה. במנועים מקוררי אוויר המגבלות נכפות על ידי הצורך להפטר מהחום סביב צלעות הקירור בזמן קצר. במנועים מקוררי מים בעיה זו מועברת למצנן (רדיאטור) אשר יכול להיות ממוקם בתוך הגוף או בכנפיים, וכך מוליכי האוויר מקבלים צורה אווירודינמית טובה. כל החום המשוחרר בצילינדר, למעט זה שמוחלף בעבודה, חייב לבסוף להיות מוסר ומוחלף באוויר של הסביבה. לפיכך, ניתן לראות שבעיית השגת הקומפקטיות, ובאותו הזמן להפטר מ 65 עד 75 אחוז בקירוב של החום בדלק, דרך צינור המפלט ומערכת הקירור, אינה בעיה קלה. מהנאמר למעלה ברור שכל הגדלה של הנצילות הטרמית מפשטת את בעיות הקירור, ובהתאם מפשטת את דרישות הקומפקטיות.

מגבלות משקל הינן, באופן טבעי, קרובות מאד לדרישות הקומפקטיות. ברור שכל שהמנוע מוארך ומתפרס, קשה יותר לשמור על משקל מיועד בתחום המגבלות המותרות. ביחס לכך, למנועים רדיאליים יש יותר יתרונות על פני הסוגים האחרים, כמו כן למנועים טוריים יש יתרון של שטח פנים נמוך.

4. **משקל נמוך לכוח סוס** - משקל נמוך לכוח סוס הינו דרישה בסיסית באווירונאוטיקה כאשר כוח המשיכה מפעיל השפעה עצומה. היחס בין משקל המטוס להספק המנוע מכונה כוח העמסה של המטוס. יחס זה שימושי כמצוין לביצועי המטוס. משקל מערכת הנעה חייב להישמר נמוך ככל האפשר על מנה לקבל מרווחי בטיחות ומטען יעיל גדולים ביחס למשקל המטוס. כוח העמסה של המטוס הגדול המוכר הינו בסביבות 26 פאונד לכוח סוס. ניתן לומר שמטוס בעל משקל מערכת הספק של 26 פאונד לכוח סוס יכול לטוס ללא מטען מועיל. יחס משקל/כוח סוס נמוך אינו חשוב רק כערך בפני עצמו אלא גם משום שמשקל מערכת הנעה משתקף חזרה במשקל המבנה. נהוג היה לומר: "נדרש פאונד לשאת פאונד", כלומר שכל פאונד המוסר ממשקל מערכת הנעה גורם להורדת פאונד אחד בקירוב במבנה.

מכל מקום, התמונה קצת יותר בהירה מהמתואר למעלה. משקל נמוך לכוח סוס היה בעל חשיבות עליונה 40 שנה קודם (לכתיבת הספר), כאשר יחס משקל מערכת הנעה/כוח סוס היה 6 פאונד לכוח סוס. כיום המטרה של משקל נמוך לכוח סוס הושגה לנקודה בה רווח נוסף בכיוון זה הינו בעל חשיבות נמוכה. מנועים בשימוש חברות התעופה כיום משקלם בערך פאונד אחד לכוח סוס. הפחתה נוספת במשקל לכוח סוס יגרום להקרה רבה מדי בדרישות האחרות.

המשקל הנוכחי ביחס לכוח סוס הושג על ידי התקדמות מדהימה בשיפור תורת המתכות, התכנון וניתוח מושכל של הכוחות הפועלים על החלקים השונים של מבנה מערכת הנעה. כמו כן, אסור לשכוח את התרומה של דחיסת הגידוש ודלק בעל ביצועים גבוהים בהשגת תפוקות הספק גבוהות ממנוע בעל נפח נמוך.

משקל לכוח סוס תלוי בצורה מסוימת בגודל המנוע. מכל מקום, אפילו החומרים האחרונים והסגסוגות מוגבלים לחלוטין ביחס לעובי המזערי שניתן להשתמש, ומשקל האביזרים אינו משתנה בהכרח ביחס להגדלת ההספק במנוע נתון.

יתר על כן, מנועים קטנים משתמשים בחומרים זולים יותר ותהליכי היצור אינם משיגים את דרגת העדינות הקיימת במנועים גדולים יותר, על ידי כך מביאים לעלות יחידה נמוכה. זה אכן משתקף בהגדלת משקל לכוח סוס, אשר במנועים קטנים עומד סביב 2 פאונד לכוח סוס.

5. **תפוקה מוגדרת גבוהה** - ניתן להניח שההצלחה הראשונה בטיסה ממונעת נדחתה במספר שנים עקב חוסר במנוע בעל הספק מתאים. כיום, המתכננים של מטוסים גדולים ממשיכים לתבוע מנועים בעלי יותר ויותר הספק. עם הצגת מנועי מדחף סילון ומנועי הסילון, והיכולת להגדלת ההספק הגבוה הטבוע במבנה הפשוט יותר שלהם, נראה שתעשיית התעופה הולכת במהרה להתעורר למציאות שבמקום מנועים בעלי הספק בלתי

מספק הקיימים כיום, יש כל כך הרבה הספק זמין במנועי הסילון, כך שמתכנני המטוסים יאותגרו מאד במאמצם לייצר תכנון מתאים אשר יכול להשתמש במנועים בעלי הספק סופר גבוה בעתיד. הכוח הנדרש לכל מטוס נתון נקבע בדרך כלל מהערכה של התנגדות טפילה משולבת בהתנגדות הכנף ותכונות המדחף. דבר זה מאפשר למתכננים להעריך את ההספק הנדרש למהירות הטיסה המרבית. הפחתה בהתנגדות הטפילה תרמה משמעותית לשיפור בביצועים שהושגו במהלך 20 השנים האחרונות, אולם שיפור נוסף ממקור זה נראה יקר ביותר.

מסתבר שתפוקת הכוח היא פונקציה של גודל, מהירות ולחץ. מגבלות משקל נוקשות שולטות בבהירות בגודל המנוע שניתן להשתמש בו, והמהירות מוגבלת מאד על ידי נצילות המדחף. ניתן להשתמש בתמסורת הפחתת מהירות, כאשר תוספת הסיבוב והמחיר לכל כוח סוס מוצדקים. על ידי תמסורת הפחתת מהירות, מגבלות המהירות נכפות על ידי תמסורת השסתומים ועומסים של פני גל הארכובה. הגדלה של לחץ עבודה יעיל הינה אחת מהשיטות המוערכות להגדלת התפוקה. הגדלה מסוימת בכוח הבלימה משמעותו שניתן להשיג לחץ יעיל על ידי הגדלת לחץ הדחיסה. גידוש הינו אמצעי נוסף להגדלה. המגבלות לשתי השיטות האלו נקבעות על ידי יכולת הדלק לעמוד בפיוץ (דטונציה), כלומר, על ידי מספר האוקטן של הדלק שיהיה בשימוש, ועל ידי לחץ הצילינדר המרבי המותר. לחצים מרביים גבוהים משמעותם מבנה צילינדר כבד ומכאן הגדלת המשקל. גורם זה, במקרה, הינו המכשול העיקרי לשימוש מוצלח במנוע דיזל למטוסים.

6. **עלות סבירה** – למותר לציין ששום מערכת הספק לא יכולה לזכות בעדיפות על פני מתחרותיה אם היא יקרה מדי. דבר זה נכון אפילו למרות שלמות התכנון ואיכות העבודה. היא חייבת להיות מתומחרת כראוי. כאשר הכול כבר נאמר ונעשה, התועלת של כול המוצרים המסחריים נמדדת על ידי העלות שלהם. חומרי הגלם המרכיבים את המנוע – אלומיניום, ברזל, ניקל וכו' – הינם זולים יחסית במצבם הגולמי. הייצור, הנמדד בשעות אדם, הינו הרכיב היקר בעלות. מובן מאליה שמורכבות התכנון הינה נקודה להחלטה בנושא העלות. ניתן לומר שפשטות התכנון, שיכיל את כל הדרישות, מביאה בדרך כלל לשביעת הרצון העיקרית, כאשר כל שאר הנושאים נשקלו.

מנועים מקוררי אוויר, בדרך כלל, פחות יקרים לייצור. זה כנראה מושפע מהסרת הצורך, היקר יותר, במערכת קירור נוזלי במנועי קירור נוזלי. מבחינת התחזוקה, מנועי קירור אוויר פשוטים וזולים יותר לתחזוקה.

7. **נצילות טרמית** - נצילות טרמית גבוהה (חסכון בדלק) הינה בעלת חשיבות כפולה במטוסים. ככל שנצרך פחות דלק למשימה נתונה, כך יורד מחיר הדלק למשימה וניתן לשאת יותר מטען מועיל. בנושא חיסכון בדלק, מנועי מטוסים מודרניים משיגים בקלות צריכת שמן ודלק משולבת של 0.45 פאונד לכוח סוס לשעה ביחס דחיסה נורמאלי של בערך 6.8 ל – 1 בדלק רגיל במהירות שיט. ניתן להשיג שיפור של כ – 15% במקרים מיוחדים כאשר משתמשים ביחס דחיסה גבוה יותר וסידורים מיוחדים כגון סדר הצתה מתקדם ותזמון שסתומים משתנה. מיקום טורבינת מדחס גידוש בצינור הפליטה הינו סידור שיכול להגדיל את הנצילות הטרמית בעוד 15%. נראה שהיצרנים בדרכם לייצור מנועים שיכולים לפעול בנתוני שיט הטובים ביותר של 0.35 lb/bhp/hr כאשר כל השיפורים האפשריים מותקנים במנוע.

חיסכון בהפעלה הופך למרכיב עיקרי וחשוב בטיסות ארוכות. יש לזכור שככול שתפוקת הכוח עולה, המרווח בין השיפוצים יכול להתקצר ואמינות המנוע עלולה לקטון אף היא. ככל שמערכות הנעה הופכות לגדולות יותר, תצרוכת הדלק הופכת למרכיב חשוב יותר בטווח הפעולה של המטוס ובעלות התפעול.

8. **חופש מרעידות** – מכיוון שמבנה המטוס הינו קל ובעל גמישות מסוימת, רעידות מנוע חמורות יגרמו, במקרים מסוימים, להפחתת אורך החיים של חלקי מבנה מסוימים. אפילו אם המבנה אינו עומד בסיכון, מנוע רועד יכול לגרום נזקים רציניים לצנרת, חיוט, למערכות העזר, למנוע עצמו או למדחף. הצורך לחופש יחסי מרעידות מושג בדרך כלל על ידי שימוש במספר גדול יחסית של צילינדרים בכדי לבטל את ריטוטי הפיתול המועברים מהצילינדרים. לעתים משתמשים במשקולות איזון לצורך איזון המסות המסתובבות. חלק ממשקולות איזון אלו תלויות על מנת לספק שיכון דינאמי לרעידות הנגרמות ממכות הכוח, ועל מנת לבטל רעידות פיתול בלתי רצויות.

מתלי מנוע גמישים או דינאמיים, אשר מאפשרים תנועה מסוימת למערכת הנעה, הינם בעלי תועלת רבת ערך בהקטנת רעידות בלתי רצויות, והעברתם לחלקים אחרים של המטוס. סקרי רעידות מתבצעים בעזרת מתקנים מיוחדים על מנת לבודד תדירויות בלתי רצויות, ובכדי להפחית את המשרעת שלהן והלחצים הנובעים מכך. בדרך כלל סקרי הרעידות מתבצעים על שילוב המנוע והמדחף אצל יצרן המנוע, ובנוסף, נמשכים בדרך כלל דרך מתלה המנוע ומבנה המטוס עצמו במהלך טיסות הניסוי הראשונות.

9. **פשטות אחזקה בשדה** – פשטות האחזקה הינה דרישה החיונית במיוחד לחברות תעופה ומפעילים. אם נדרש 50% יותר זמן לשיפוץ סוג מנוע אחד בעל הספק זהה ביחס למנוע מתחרה, כאשר כל שאר המרכיבים זהים, גורם זה לבדו יהפוך את המנוע המדובר למתיישן. כיוון ששעות אדם הופכות מיידית לכסף, שום מפעיל

לא יפעל לאורך זמן עם ציוד שמאבד כסף. פשטות בתכנון ושימוש בחלקים סטנדרטיים, עד כמה שאפשר, מסייעים בשמירת בעיות תחזוקה בשליטה. ייצור במידות זהות חיוני לאמינות. באותו הזמן זה עוזר בחליפיות החלקים במנועים זהים. כל הפחתה במלאי חלקי חילוף תורמת בצורה ניכרת להקלת בעיות התחזוקה.

10. **גמישות תפעולית** – גמישות הינה היכולת של המנוע לפעול בחלקות ולספק את הביצועים הנדרשים בכל המהירויות, החל מסרק להספק מלא. הטווח הנרחב של דרישות הפעולה הציגו קשיים שלעיתים נדירות התממשו בתחומים אחרים של מערכות הנעה. בנוסף לדרישות של אמינות גבוהה, המנוע נדרש לפעול במצבים משתנים מאד בגבהים קיצוניים. עם הופעת מדחפים בעלי בקרה אוטומטית, טווחי פעולה רחבים וניכרים של מהירויות נדרשו על מנת להשיג את הביצועים הטובים ביותר למטוסים המודרניים.

דרישות אלו הכתיבו מערכת הצתה כפולה, עוקה יבשה במנועים גדולים, תכנון מאייד ייחודי, אמצעים משככי רעידות, מתלים ייחודיים ותכונות מיוחדות רבות אחרות שאינן חשובות במיוחד במערכות הנעה לשימושים יבשתיים וימיים.

בחירת מנוע מטוס – בואו נעזר בעשרת הדרישות הבסיסיות שלמעלה לצורך בחירת דגם מנוע המטוס. ראשית, נניח שהמנוע נדרש למטוס מסוים, אשר במקרה זה יהיה מטוס חד מנועי אשר נדרש למנוע בדרג של 200 כוח סוס. הגדרה זו מוציאה מיד מנועים מקוררי נוזל, לאור העובדה שניסיונות קודמים במנועים מקוררי נוזל בדרג זה אינם מסוגלים לעמוד בתחרות מול מנועים מקוררי אוויר. "להתגלח על זקנם של אחרים" הינו דרך טובה לבחירת המנוע.

לפיכך, האמור לעיל משאיר לשיקול את מנועי קירור אוויר, מהם קיימים שלושה סוגים, והם: מנוע רדיאלי, מנוע טורי ומנוע מנוגד. בנוסף לעשרת הדרישות שלמעלה, יש לשקול את גורמי שדה הראיה והתנגדות טפילה. הטבלה שלמטה נותנת תמונה של יתרונות לכל גורם, כאשר '1' הוא הטוב ביותר.

כמצוין למטה, דגם המנוע הנבחר יהיה קרוב לוודאי המנוע המנוגד. מכל מקום, קיימים הרבה צמתי החלטה וקשיי שיקול בכל בחירה, ולפיכך לא ניתן לתת המלצה אחת בלבד. קרוב לוודאי שהגורם השולט בבחירת דגם המנוע הוא העלות היחסית.

טבלה 1 – גורמי היתרון היחסי למנועים מקוררי אוויר
(1' הטוב ביותר)

גורם	מנוע רדיאלי	מנוע טורי	מנוע מנוגד
אמינות.....	1	1	1
עמידות.....	1	1	1
קומפקטיות.....	2	3	1
משקל נמוך לכוח סוס...	2	3	1
תפוקה מוגדרת גבוהה.	3	1 ¹	2
עלות (נמוכה).....	1	2	1
נצילות טרמית גבוהה..	3	1	1
חופש מרעידות.....	1	1	2
פשטות אחזקה.....	1	1	1
גמישות תפעולית.....	3	1	1
שדה ראייה.....	1	2 ¹	2
התנגדות טפילה.....	2	1	1

¹ עקב מנגנון זיזים עליון אשר מאפשר תוספת של 10% במהירות מעל מוטות הדחף.
² מנוע הפוך.

ג. מחזורי מנוע ועקרונות

ק ימים יחסי גומלין, עקרונות ומונחים רבים אשר הינם בסיס להבנת פעולת מנוע מטוס. אירועי המחזוריות עצמם הינם בסיסיים. הרבה מחזורי מנועים הוצעו אולם רק מעטים הוכחו כמעשיים מנקודת מבט אווירונאוטית. בכל המקרים, המחזור מורכב מתהליכים מסוימים בהם חום מתווסף ונדחה. התהליכים התרמו-דינאמיים המעורבים חשובים, אולם עקב המורכבות שלהם רק החיוניים מוצגים כאן.

מחזורי עקרוניים

המחזורי העיקריים הינם:

1. Carnot
2. Lenoir
3. Brayton
4. Otto
5. דיזל
6. שילוב (4) ו- (5)
7. מחזור "אוטו" עם תערובת מעשית, תנאים חימיים וחום משתנים
8. מחזור דיזל עם תנאים דומים כמו (7)

רק בשלושה מהמחזורי הנזכרים למעלה, (4), (5) ו- (6) היה שימוש במטוסים, וגם זה מעלה ספקות לאור העובדה שתכנון מנועי מטוסים המשלבים את (5) לא הוכח כמעשי. מחזור (1) הינו מחזור תיאורטי טהור בלבד. מחזור (2) לא היה מעולם בשימוש כיוון שלא ניתן היה להשיג את ערכי הדחיסה הגדולים הנדרשים לפני ההצתה. מחזור (3) גם הוא לא היה בשימוש עקב הסיבוך הכרוך וגודל המנוע הנדרש.

מחזור אוטו – למנוע הפועל על עקרון מחזור אוטו יש נפח דחיסה ניכר שלתוכו התערובת נדחסת, לאחר ניקתה לצילינדר, בפעימת היניקה. הבוכנה נמצאת בנקודה מתה בסוף פעימת היניקה, והתערובת נשרפת, תיאורטית, בנפח קבוע. לאחר פעימת העבודה, שסתום הפליטה נפתח והלחץ בצילינדר קטן, ובהמשך הבוכנה דוחפת החוצה את שאריות תוצר הדחיסה, למעט זו שנותרה בחלל הדחיסה. במצב זה המחזור אמור להסתיים והמדיום, שאמור להיות אוויר ואדי דלק, מתקרר בנפח קבוע בצילינדר כאשר שסתום הפליטה נפתח. וכך, המחזור מורכב משני נפחים קבועים ושני תהליכים אדיאבטיים¹.

מחזור דיזל – מנוע הדיזל דוחס אוויר ללא דלק ללחץ של בערך 500 פאונד. הטמפרטורה בסיום הדחיסה תהיה מספיק גבוהה לצורך הצתת הדלק המוזרק, אם הדחיסה מהירה מספיק כך שאובדן החום יהיה קטן. הבעירה מתבצעת בלחץ קבוע בקירוב, על ידי ויסות מנגנון הזרקת הדלק. שסתום הפליטה נפתח בסיום ההתפשטות האדיאבטית והלחץ נופל ללחץ אטמוספרי שלאחריו הבוכנה דוחפת את מרבית תוצר הדחיסה אל מחוץ לצילינדר.

מחזור אוטו-דיזל – הלחצים הנובעים מתהליך נפח קבוע במחזור אוטו הינם גבוהים באופן ניכר מאשר הלחץ הממוצע בפעימת העבודה. העלאת לחץ הדחיסה בפאונד אחד מעלה את הלחץ המרבי בערך בחמישה פאונד. לפיכך, העלאת יחס הדחיסה של מחזור אוטו יגרום למנוע להיות נתון ללחצים גדולים יותר באופן משמעותי בסיום תהליך הבעירה. כתוצאה מכך, מספר מנועי הזרקת דלק יכולים להתחיל בהזרקת הדלק מוקדם מספיק, כך שחלק מהדלק בוער בנפח קבוע ונישמר איזון של לחץ קבוע.

מחזורי פעולה – בנוסף למחזורי העקרוניים, קיימים גם מחזורי פעולה. מחזור פעולה של מנוע בעירה פנימית יכול להיות מוגדר בצורה נרחבת כסדרת מאורעות הנדרשת ליניקה, לדחיסה, להצתה, לשריפה והתפשטות של התערובת בתוך הצילינדר, ופריקת או ניקוי הגזים השרופים. קיימים שני סוגים של מחזורי פעולה בשימוש כללי, מחזור שתי פעימות ומחזור ארבע פעימות.

מחזור שתי פעימות – תמונה 1 מראה מנוע שתי פעימות בצורה מופשטת. יש לציין שגליל הצילינדר מצויד בפתחים, עיתוי הפתיחה שלהם נשלט על ידי תנועת הבוכנה בתוך הצילינדר. הפתח אליו המאייד מחובר הוא הפתח דרכו נכנסת התערובת לבית גל הארכובה. התערובת הטריה נדחסת ואז נכנסת לצילינדר דרך פתח גלוי בצידו השני. הלחץ בבית גל הארכובה מוקטן ומנת תערובת נוספת נכנסת. דבר זה נדרש למילוי מושלם של הצילינדר במהירות גבוהה. כניסת התערובת הטריה מסייעת לניקוי הגזים השרופים בעזרת מסיט הזרימה

¹ הערת המתרגם: בשם תהליך אדיאבטי קוראים לתמורה במצבו של החומר החלה כאשר אין אפשרות לחומר לקלוט חום ממקור חום חיצוני או למסור חום החוצה.

שעל ראש הבוכנה. מרווחי טבעות הבוכנה קבועות לפעמים למקומן בריחוק מהפתחים על מנת להקטין את האפשרות שקצוות הטבעות יתפסו בפתחים. סוג זה של מנוע מקבל סיכה על ידי מהילת שמן בדלק ביחס מתאים, כך שכאשר התערובת נדחסת בבית גל הארכובה, החום הנגרם על ידי פעולת המנוע ייצור אדי שמן ויסוך את החלקים הנעים.

אם נתייחס למנוע כמשאבת אוויר, ונשים לב שהבוכנה סגרה את הפתחים בתנועתה למעלה, ניווכח שמטען התערובת בתא הבעירה נדחס. תנועת הבוכנה יוצרת, כמו כן, לחץ שלילי (יניקה) אשר מושך את התערובת דרך המאייד לבית גל הארכובה. כאשר הבוכנה מגיעה למספר המעלות המתאים לפני הנקודה העליונה, מערכת ההצתה מציתה את התערובת וגורמת לה להישרף בעת שהבוכנה משלימה את תנועתה. אחרי הנקודה העליונה, המטען מתרחב ודוחף את הבוכנה לעבר הנקודה התחתונה ומעביר את הכוח לציר המדחף. תנועת הבוכנה סוגרת את השסתום האוטומטי במאייד ודוחסת את המטען בבית גל הארכובה. בעיתוי המתאים, הבוכנה מגלה את פתח הפליטה והיניקה, ומאפשרת למטען להידחס בבית גל הארכובה דרך פתח היניקה. התערובת מוסטת למעלה לתוך הצילינדר עקב צורת מסיט הזרימה על ראש הבוכנה. לחץ גז הפליטה הינו נמוך יחסית בנקודת זמן זו, לפיכך, לחץ התערובת הנכנסת גורם לניקוי טוב יותר של גזי הפליטה.

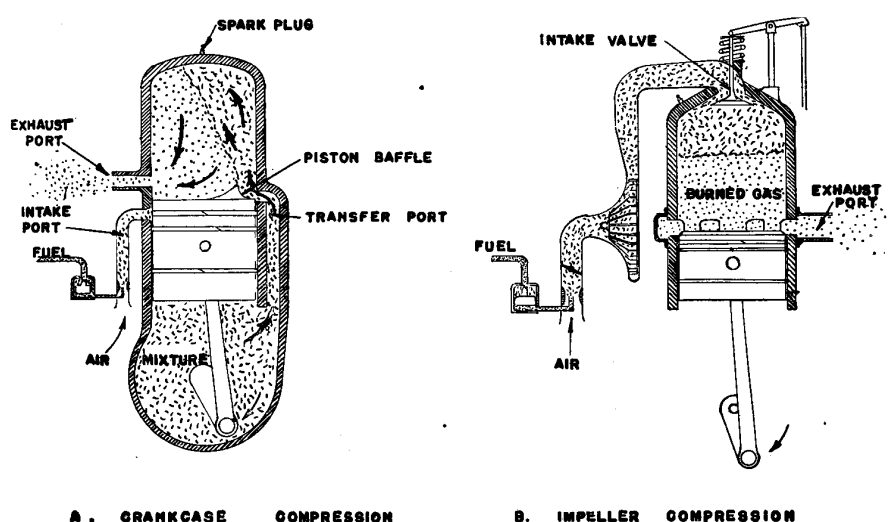
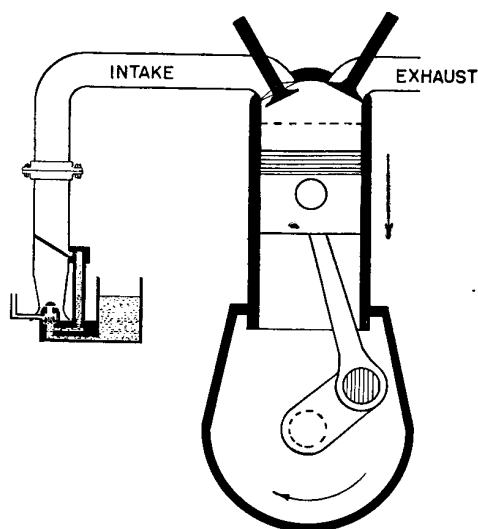


Figure 1.—Two-stroke cycle diagram.

מנוע שתי פעימות, כאשר משתמשים בו ללא מזרק דלק, מבזבז מעט מהתערובת הטרייה בעת פליטת גזי הפליטה, ומוהל את התערובת הטרייה עם הגזים השרופים שנשארו מהמחזור הקודם. חשוב לזכור ששתי פעימות של הבוכנה, או סיבוב של אחד של גל הארכובה, נדרשים להשלמת מחזור הפעולה. לפיכך, במנוע שתי פעימות כל הצילינדרים, ללא תלות במספרם, יציתו כל סיבוב של גל הארכובה. המהירות של מנוע מסוג זה נשלטת הן על ידי המצנרת והן על ידי ויסות עיתוי ההצתה. למרות שהמנוע אינו כה גמיש, יש לו יתרון של יותר פולסים בתפוקות הכוח, ובדגמים בהם יש פתחים, המנוע ניתן לפעולה במהירויות גבוהות ביותר, דבר המסייע בהשגת תפוקות הספק גבוהות. לתכונה זו יש נטייה לשיפור המשקל ליחס כוח סוס הנחשב כה נדרש במנוע מטוס. החסרונות העיקריים הינם בזבז הדלק כאשר משתמשים במאייד והקושי בקירור הצילינדר, שמיציר הצתה בכל סיבוב. מנוע שתי פעימות נמצא בשימוש נרחב במנועים חיצוניים המחוברים לסירות. מנוע שכזה הינו בדרך כלל בעל קנה קטן ומהירות פעולה גבוהה. עקב מידותיו הקטנות, תצרוכת הדלק הגבוהה אינה מעוררת תשומת לב במיוחד ויש לו אספקת מים רבה לקירור הצילינדר ושמידה על הטמפרטורה הרצויה. דגמים משופרים של מנוע זה מצויים במפוח ומערכת סיכה רגילה (ראה תמונה 1 [B]). הדלק מוזרק ישירות לצילינדר על ידי משאבה ונחיר. מכל מקום, בעיית הקירור עדיין קריתית. מנועים אלו היו בשימוש נרחב על מטוסים במהלך מלחמת העולם הראשונה.

מחזור ארבע פעימות – מנוע מסוג זה מציע הרבה יתרונות לשימוש במטוסים, אחד מהם הינו הסיוע לביצועים גבוהים בעזרת מדחס הגידוש. כיום המנוע מאד חסכוני מנקודת המבט של המפעיל והמתחזק. בדיון שיובא להלן, לגבי תזמון נקודת ההצתה והשסתום, יש להבין שקיימות מספר אפשרויות לנקודה בה הוא מתרחש במנועים השונים. ישנם גורמים רבים המשפיעים על העיתוי במנוע נתון, ויש לעקוב בקפדנות אחרי כל

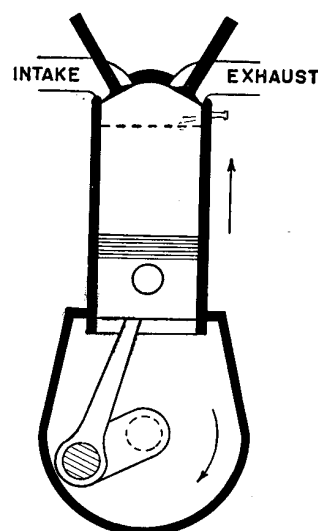
המלצות היצרן. ככל שביצועי המנועים משתפרים, העיתוי הופך להיות יותר קריטי. הדיון המפורט שלהלן ידגים את הצורך לנקודת הצתה מדויקת, כאשר מרכיבים מנוע לאחר שיפוצו. העניין בעל החשיבות הגבוהה בתזמון השסתומים הוא התרחשותו בקרבה יחסית למהלך הבוכנה. נמצא שיהיה מדויק יותר לתזמן את השסתומים ביחס למהלך גל הארכובה, כיוון שזה מאפשר שימוש ביחידת טבעת תזמון ומחווון על גל הארכובה. בתרשימים המצורפים ניתן יהיה להבחין שתזמון השסתומים במנועים השונים יינתנו במהלך הפעילות שבהם הם מתרחשים. יש לזכור שנחוצה תנועה קטנה בלבד, של גל הארכובה, בכדי לפתוח את השסתום במלואו, לפיכך, המעלות המוגדרות על ידי היצרן מייצגות את תחילת הפתיחה ולא את מצב הפתיחה המלא של השסתום.



INTAKE STROKE

EXHAUST VALVE CLOSSES APPROXIMATELY
8° TO 35° A. T. C.

Figure 2.—Intake-stroke diagram.



COMPRESSION STROKE

INTAKE VALVE CLOSSES APPROXIMATELY 45° TO 75° A. B. C.
IGNITION FIRES 20° TO 35° B.T.C.

Figure 3.—Compression stroke diagram.

פעילת היניקה – במהלך פעילת היניקה, הבוכנה נדחפת כלפי מטה בצילינדר על ידי גל הארכובה המסתובב. דבר זה יוצר לחץ שלילי וגורם לאוויר הנמצא במאייד הקובנציונאלי, אשר נמצא בלחץ אטמוספרי בערך, לעבור דרכו ולאסוף כמות מתאימה של דלק, ואז להיכנס לצילינדר ולמלא את החלל. כמות התערובת שנכנסת תהיה תלויה במצב פתיחת המצערת.

במנועים קודמים, שסתום היניקה היה נפתח כאשר הבוכנה הייתה בנקודה מתה עליונה בקירוב. ניסיונות מאוחרים יותר הוכיחו את העובדה שבאם שסתום היניקה היה נפתח הרבה יותר מוקדם, כמות גדולה יותר של תערובת הייתה נינקת פנימה. דבר זה יגדיל את תפוקת הכוח של המנוע. פתיחת שסתום היניקה מוקדם יותר מוגבלת על ידי מספר גורמים, אחד מהם הינו האפשרות של אש חוזרת בתוך מערכת היניקה, אשר עלול לגרום לסיכוני אש.

במספר מנועים, אשר נבחרו למטרות השוואה, הובחן שפתיחת שסתום היניקה וסגירת שסתום הפליטה חופפים. המשמעות הינה שפתיחת שסתום היניקה משתנה מ - 8° ל - 40° לפני נקודה מתה עליונה בעת שהבוכנה נעה כלפי קצה פעילת הפליטה, ושסתום הפליטה נסגר בהשגה של 8° ל - 40° אחרי נקודה מתה עליונה בעת שהבוכנה נעה כלפי מטה במהלך פעילת היניקה. החפייה של אירועים אלו מביאה ליתרון מסוים אשר יידון בהרחבה תחת נושא חפיית השסתומים מאוחר יותר.

אם מתייחסים למנוע כמשאבת אוויר, ירידת הבוכנה בצילינדר, כאשר שסתום הפליטה נסגר, תיצור יניקה משמעותית והאוויר יזרום דרך שסתום היניקה. צמצום, עקב גודלו הקטן יחסי של פתח היניקה יחסית לנפח הצילינדר, יקנה מהירות נכבדת לתערובת הנינקת בנקודה זו.

שסתום היניקה במנועים מוקדמים היה נסגר קרוב לנקודה מתה תחתונה. ניסיונות מאוחרים יותר הצביעו שאם השסתום היה נסגר מספר מעלות נכבד אחרי נקודה מתה תחתונה, היה נוצר יתרון לתנופה של התערובת הניקת עקב מהירותה. דבר זה היה מאפשר מילוי מושלם יותר של הצילינדר ועליה בתפוקת הכוח. במנועי מכונות מרוץ, שסתום היניקה נסגר מאוחר מאד בכדי לפצות על האיחור הנכבד בתנועת הגזים יחסית למהירות הגבוהה של הבוכנה.

בגלל הנפח הגדול של הצילינדר מעל הבוכנה, כאשר היא נמצאת בתחתית הצילינדר, תנועה קלה שם לא תשפיע במיוחד על זרימת הגזים הנכנסת.

התזמון המאוחר אינו יכול להתבצע בקיצוניות בגלל האפשרויות של נסיגת הגזים החוצה דרך סעפת היניקה, עקב תנועת מעלה של הבוכנה.

טווח סגירת שסתום היניקה במנועים שונים נע בין 50° ל 75° אחרי נקודה מתה תחתונה. זה ישתנה עם אפיוני הביצוע, נפח, מרחס הגידוש, מהירות וגורמים שונים אחרים הטבועים בכל מנוע.

פעִימַת הדחיסה – לאחר סגירת שסתום היניקה, תנועת הבוכנה כלפי מעלה דוחסת את התערובת על מנת לקבל את הבעירה וההתפשטות הרצויים. היחס של נפח הצילינדר כאשר הבוכנה בנקודה מתה תחתונה למצב בו הבוכנה בנקודה מתה עליונה (תא השריפה) נקרא יחס הדחיסה. התערובת ניצתת על ידי המצת כאשר הבוכנה מתקרבת לנקודה מתה עליונה בכדי לוודא בעירה מושלמת עד אשר הבוכנה חולפת מעט את הנקודה המתה העליונה. עיתוי ההצתה משתנה בין 20° ל 35° לפני נקודה מתה עליונה, תלוי בדרישות המנוע. מערכת ההצתה מספקת את הזרם במתח גבוה למצת. העיתוי המתאים מווסת על ידי מחברים מיוחדים המחברים את מערכת ההצתה לתמסורת.

כיוון שהתערובת בצילינדר נדחסת לרמה גבוהה, והמרווח במצת חייב להיות מתאים על מנת לייצר ניצוץ מתאים, מתח ההצתה על מנת לדלג מעל מרווח זה, תחת הלחץ, חייב להיות 20,000 עד 25,000 וולט. יש הרבה גורמים המשפיעים על עיתוי ההצתה, ויש לזכור שהיצרן השקיע זמן רב במחקר ובדיקות בכדי למצוא את העיתוי המתאים ביותר. לפיכך, יש למלא אחר המלצותיו.

פעִימַת העבודה – כאשר הבוכנה חולפת מעט את הנקודה המתה העליונה, לחץ הגזים השרופים מפעיל כוח על ראש הבוכנה בסדר גודל של 15 טון במנועים מסוימים. הטמפרטורה של גזים אלו נעה בין $3,000^{\circ}$ עד $4,000^{\circ}$ פרנהייט. אם הבעירה נורמאלית, הכוח יופעל בצורה של "לחיצה" מהירה.

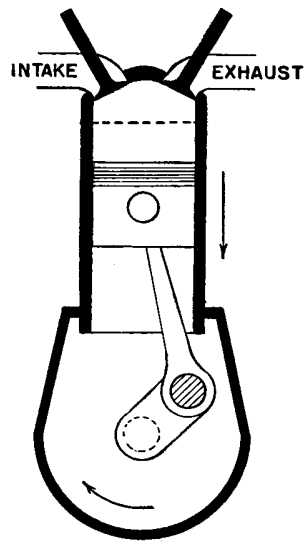
אם הטייס נוסק בצורה תלולה, ובכך מקטין את זרימת האוויר סביב הצילינדרים במנוע מקורר אוויר, או משתמש בתערובת ענייה מדי, או משתמש בדלק בעל מספר אוקטן נמוך מדי, יתרחש פיצוץ התערובת (דטונציה). הפיצוץ יכול לגרום נזק משמעותי למנוע. אנלוגיה לבעירה נורמאלית תהיה רוכב אופניים המפעיל את משקלו על הדוושות. הפיצוץ יכול להיות מתואר על ידי דוגמה של אדם חזק המכה על הדוושות עם פטיש חמישה קילו. במלים אחרות, במהלך בעירה נורמאלית ההתפשטות הינה הדרגתית מספיק בכדי לאפשר לבוכנה לספוג את הכוח. אם מתרחש פיצוץ, הבוכנה אינה יכולה לנוע מספיק מהר לשם הפיכת הלחץ העצום לפיתול, הצילינדר והבוכנה מוחלשים על ידי הטמפרטורה הגבוהה מאד, וכתוצאה יתכן ויגרם כשלון. הסבר זה מוצע כאן על מנת שהקורא יבין במלואה את משמעות הדטונציה שתידון מאוחר יותר במאמר.

אם הבעירה מתרחשת באופן נורמאלי, הבוכנה מאולצת לנוע כלפי מטה בצילינדר במהלך פעימה העבודה, והכוח מתורגם על ידי גל הארכובה לפיתול ומועבר למדחף. דבר זה שומר על הטמפרטורה של גזי הפליטה במגבלות בטוחות עד אשר הם נפליטים דרך מערכת הפליטה. כאשר מתרחשים פיצוץ או תקלה אחרת, השסתומים אינם מקוררים כראוי, לפיכך יכול להתרחש נזק לשסתומים ותושבות השסתומים.

עיתוי פתיחת שסתום הפליטה גרם ליצרנים לעמוד בפני, בין דברים אחרים, הרצון להשתמש בכל כוח ההתפשטות האפשרי. על מנת לבצע זאת, השסתום חייב להיפתח כאשר עדיין קיים מעט לחץ בתוך הצילינדרים בכדי לאלץ את הגזים לנוע החוצה דרך פתחי הפליטה מוקדם ככל האפשר. דבר זה היה נחוץ על מנת לשחרר את הצילינדרים מחימום יתר. חום זה חייב להיות ממאולץ החוצה מהר ככל האפשר לאחר השגת ההתפשטות הרצויה, על מנת להימנע מחימום יתר של דפנות הצילינדר וראש הבוכנה.

במהלך פעימת היניקה, כמות התערובת הנכנסת לצילינדר מוגדלת על ידי הפתיחה מוקדמת והסגירה המאוחרת של שסתום היניקה. טיהור הצילינדר מסתייע על ידי גזי הפליטה אשר נמצאים תחת לחץ ניכר עקב פתיחת השסתום בעת שקיים עדיין לחץ בצילינדרים והבוכנה נעה מעלה במהלך פעימת הפליטה.

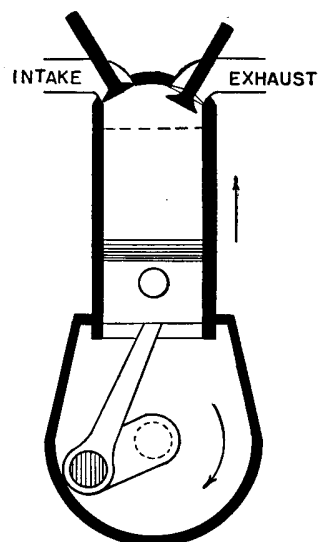
עיתוי הפתיחה של שסתום הפליטה משתנה בין 50° ל 75° לפני נקודה מתה תחתונה. העיתוי נקבע על ידי היצרן, לאחר שהושגה התפשרות יחסית במספר תנאים, חלקם הוזכרו למעלה.



POWER . STROKE

EXHAUST VALVE OPENS APPROXIMATELY 50° TO 75° B. B. C.

Figure 4.—Power-stroke diagram.



EXHAUST STROKE

INTAKE VALVE OPENS APPROXIMATELY 8° TO 30° B.T.C.

Figure 5.—Exhaust-stroke diagram.

פעִימת הפליטה – כאשר הבוכנה חולפת את הנקודה המטה התחתונה ומתחילה תנועתה כלפי מעלה בפעימת הפליטה, דחף נוסף מופעל על הגזים שעוברים דרך שסתום הפליטה. תנועה זו של הבוכנה מסייעת בטיהור אשר החל על ידי פתיחת השסתום. המהירות המוגדלת של הגזים החולפים בדרכם החוצה דרך שסתום הפליטה, עקב תנועת הבוכנה, יוצרת תנופה אשר מאוחר יותר גורמת להורדת הלחץ בצילינדר. היניקה גורמת להתחלת הזרימה של התערובת הטרייה לתוך הצילינדר על ידי פתיחת שסתום היניקה לפני סיום פעימת הפליטה.

פתיחת השסתום במספר דגמי מנועים מייצגים משתנה בין 8° ל - 40° לפני נקודה מטה עליונה במהלך פעימת הפליטה.

חפיית שסתומים – חפיית שסתומים הינה מספר המעלות של תנועת גל הארכובה סביב נקודה מטה עליונה, בסוף מהלך פעימת הפליטה, שבמהלכה שני השסתומים פתוחים בו זמנית. המטרה של החפייה הינה:

1. להגדיל את כמות התערובת הנשאבת לתוך הצילינדר על ידי ניצול היתרון של היניקה הנוצרת על ידי התנופה של גזי הפליטה.

2. לסייע בסילוק מושלם יותר של הגזים השרופים ולאִלץ אותם החוצה על ידי התערובת הקרה יותר הנכנסת לצילינדר.

3. לסייע בקירור פנימי של הצילינדר על ידי סחרור התערובת הנכנסת, בעלת הטמפרטורה הנמוכה יחסית.

חפיית השסתומים במספר מנועים משתנה מ - 16° בין פתיחת שסתום היניקה וסגירת שסתום הפליטה במנוע ללא מדחס גידוש, ל - 80° במנועים בעלי מדחס גידוש.

ב הנעת מטוס מעורבים סידרה של תהליכים שבהם האנרגיה הגלומה בדלק משוחררת תחילה בצורה של חום, ולאחר מכן מוסבת לצורה אשר ניתן להשתמש בה כדי להתגבר על התנגדות האוויר או התגברות על משקל המטוס כנגד כוח המשיכה. בכל תהליך, חלק ממטען האנרגיה המקורית אובד, ויש לזכור את הכמות היחסית שהתקבלה, המועברת והנדחית בכל שלב.

תמונה 6 מראה מאזן חום שלם למנוע טיפוסי מגודש בעל הספק של 500 כוח סוס, בתפוקת הספק של שיוט. איור זה מראה את השלבים השונים של שינוי צורת האנרגיה. שני השלבים – מדלק להספק, ומהספק להספק בלימה – נדונים כאן בצורה שטחית. מטרת פרק זה לדון בהספק, הספק בלימה יעיל ממוצע, דירוגם, ויחסי הגומלין שלהם עם ביצועי המנוע.

ביצועי המנוע תלויים ראשית בתפוקת המנוע, ושנית ביכולת המנוע להמיר חלק מהתפוקה לעבודה יעילה. דבר זה מצביע שישנן שתי שיטות עיקריות שיש לעקוב אחריהן בהגדלת ביצועי המנוע, כלומר (1) על ידי הגדלת התפוקה ו- (2) על ידי הגדלת הנצילות של המנוע בהמרת התפוקה לעבודה. השיטה הראשונה רומזת על שימוש ביותר אוויר ודלק ליחידת זמן. דבר זה מושג על ידי יכולת העתקת הכוח, הגדלת מהירות המנוע והנצילות הנפחית. לכל יכולת העתקת כוח נתונה יהיה שילוב של מהירות ונצילות נפחית, שיגרמו לתוצאה של יותר מטען ליחידת זמן, כך שמירב הכוח יתפתח בבוכנות של המנוע. השיטה השנייה רומזת על השימוש ביותר מחזורים יעילים והפחתה למינימום בסטייה מהמחזור האידיאלי, וכמו כן באובדני החיכוך.

מהירות המנוע – מהירות מנוע בעירה פנימית מוגבלת על ידי המאמצים הפנימיים, חוסר היכולת של חלקים מסוימים לפעול כיאות, והקטנה מהירה של הניצולת הנפחית - מעבר למהירויות מסוימות. המהירות נשלטת על ידי אופי העבודה שצריכה להתבצע על ידי המנוע. מנועי מטוסים פועלים במהירויות גבוהות למדי במטרה להבטיח תפוקת הספק גבוהה ליחידת משקל. המהירות המרבית למנועים כאלו תלויה בעיקרון במהלך של המנוע. הניסיון מצביע שמהירות הבוכנה הרצויה משתנה מ - 2,500 עד 3,500 רגל לדקה, מהירויות גבוהות יותר יושגו על חשבון אובדן ניכר ביעילות.

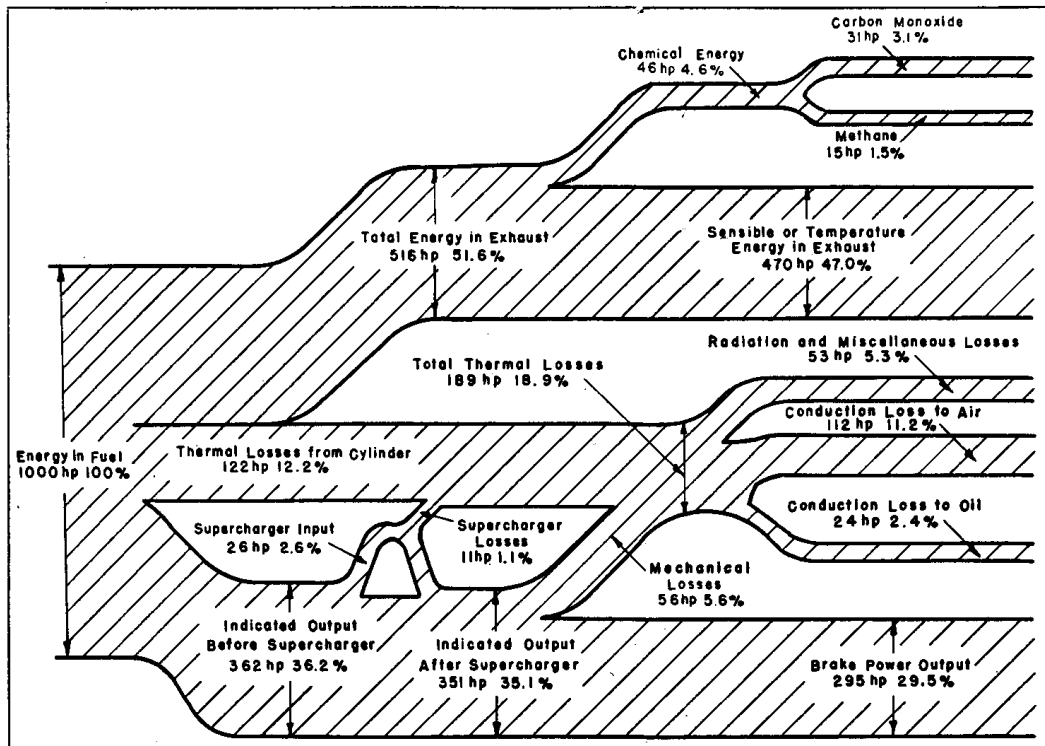


Figure 6.—Heat balance of typical supercharged engine operating at cruising power output (295 bhp).

הספק ומדידתו

כוח – ההגדרה של הספק מקיפה את שלושת הגורמים הבסיסיים של כוח, מרחק וזמן. לכוח מספר צורות – מכאני, חשמלי, כימי – אולם בבסיסו הוא כל דבר שיש לו יכולת ליצר בלימה או תנועה כגון לחץ, משקל, מתח (tension). תנועה לא תמיד תופיע בהכרח, כיוון ששניים או יותר כוחות, הפועלים במקביל על גוף מסוים, יכולים להיות מאוזנים והגוף יישאר ללא תנועה.

עבודה (כוח X מרחק) – המינוח ההנדסי לעבודה הינו התוצר של כוח לאורך דרך שעליה פועל הכוח, או:

$$\text{עבודה} = \text{כוח} \times \text{מרחק (בכיוון הכוח)}$$

לדוגמה: אם מרימים משקל של 50 פאונד לגובה של 11 רגל, העבודה המתבצעת הינה 50 lb X 11 רגל = 550 ft.lb. אותה העבודה תתבצע אם משקל של 10 פאונד יורמו לגובה של 55 רגל.

הספק (עבודה/זמן) – ההספק הינו שיעור ביצוע העבודה, במילים אחרות, כמות העבודה שבוצעה בתקופת זמן מסוימת. לפיכך:

$$\frac{\text{עבודה}}{\text{זמן}} = \text{הספק}$$

אם הקורא מטפס ארבע קומות של מדרגות, העבודה שבוצעה, כלומר התוצר של משקלו חלקי הגובה הכולל של המדרגות יהיה ללא תלות בשיעור הטיפוס. מצד שני, אם הקורא תחילה מטפס לאיטו במדרגות ומעט מאוחר יותר רץ במעלה המדרגות בשליש הזמן של הטיפוס האיטי, הדופק המהיר וההזעה המוגברת ישכנעו אותו שהוא פיתח יותר הספק במהלך הטיפוס המהיר מאשר במהלך הטיפוס האיטי.

ההספק מבוטא במספר יחידות – כוח סוס, קילואט, BTU לדקה, וכו' – שמהם הראשון הוא לבטח המוכר ביותר. כוח סוס אחד (HP) מוגדר כעבודה המבוצעת בשיעור של 550 ft.lb לשנייה או 33,000 ft.lb לדקה.

$$HP = \frac{X \text{ ft.lb. לשנייה}}{550} = \frac{X \text{ ft.lb. לדקה}}{33,000}$$

לפיכך: אם מנוע מבצע עבודה בשיעור של 16,500 ft.lb. לשנייה או 990,000 ft.lb. לדקה, המנוע יפתח הספק של 30 כוח סוס.

פיתול (כוח X מרחק בזווית ימנית) – באופן תיאורטי ניתן למדוד את ההספק המועבר על ידי מנוע המטוס בציר המדחף, כלומר, הספק הבלימה של המנוע (BHP), בשיטה אשר תציג קשיים ברורים. אולם המדידה המעשית של הספק לבלימה כוללת את המדידה של גודל ידוע כפיתול, או מומנט הפיתול. צורה בלתי נעימה של פיתול הינה כוח הפיתול אשר חייבת להיות מיושמת על ארכובה של מנוע חיצוני. ליתר דיוק, הפיתול מוגדר כתוצר של כוח על המרחק של כוח מהציר שעליו הוא פועל. או:

$$\text{פיתול} = \text{כוח} \times \text{מרחק (בזווית ימנית לכוח)}$$

לדוגמה: אם כוח של 20 פאונד מופעל בקצה זרוע בת 3 רגל, פיתול, או ממומנט פיתול של 20 lb X 3 ft = 60 ft. lb. מופעל על הציר שאליו הזרוע מחוברת.

יש לציין שציר זרוע אינם חייבים להיות מחוברים בצורה קשיחה זה לזה, ושהפיתול המופעל על הציר הינו עצמאי מקוטרו של האחרון ומתנועה יחסית בין הציר לזרוע. כוח של 20 פאונד בקצה זרוע של 3 רגל, בפיתול של 60 lb.ft., מופעל ללא תלות בתנועת הציר או הזרוע. אם הזרוע יכולה להסתובב על הציר בכוח של נאמר 15 פאונד, הפיתול המופעל על הציר הינו 45 lb.ft. ולהיפך, אם ציר מיצר פיתול של 80 lb.ft., הוא ייצר כוח של 40 פאונד בקצה זרוע בת 2 רגל.

ושוב, הפיתול המיוצר על ידי ציר הינו עצמאי מקוטרו ומתנועתו היחסית לזרוע. כשכוח של 40 פאונד נרשם על המחווון, הציר מיצר פיתול של 80 lb.ft. גם אם הוא מחליק על הגלגלת. אם הציר מחליק, כוח של 25 פאונד בלבד נרשם על המחווון, אז הפיתול המיוצר הינו 50 lb.ft.

פיתול הינו, לפיכך, מידת עומס. הוא מבוטא, למרות שלא בצורה עקבית, ב – ft.lb. ואין לבלבלו עם עבודה, אשר מבוטאת ב – lb.ft., ואשר הינה תוצר של כוח לאורך דרך בכיוון הכוח (לא בזווית ימנית לכוח). אם הפיתול המופעל על ידי ציר המדחף יכול להימדד, העבודה המבוצעת לסיבוב יכולה להיות מחושבת, ואם הסל"ד של הציר יידוע, ההספק המועבר יכול להיות מחושב כפי שיתואר להלן.

מעצור פרוני – קיימים מספר אמצעים למדידת פיתול, בהם מעצור פרוני, דינמומטר ומד פיתול. מעצור פרוני הוא דוגמה אופיינית למכשירים אלו.

מעצור פרוני מורכב בעיקרו ממעטפת, או מעצור, העוטפים תוף המחובר לציר המדחף. למעטפת מחוברת זרוע בעלת אורך ידוע, בקצה היא מחוברת למערכת מחוונים. כאשר ציר המדחף מסתובב, הוא נוטה לסובב עמו את המעטפת. סיבוב המעטפת נמנע על ידי הזרוע, והכוח הדרוש לעצירת התנועה של הזרוע נרשם על גבי המחווני. אם הכוח המתנגד לסיבוב, כפי שמקבלים על המחווני, מוכפל באורך הזרוע, התוצאה הינה הפיתול המופק על ידי הציר הסובב.

מכאן:

$$\text{פיתול} = \text{התוצאה על המחווני} \times \text{אורך הזרוע.}$$

לדוגמה: אם המחווני מראה 200 פאונד ואורך הזרוע הוא 3.18 רגל, הפיתול המופק על ידי הציר הינו:

$$200 \text{ lb} \times 3.18 \text{ ft} = 636 \text{ lb.ft}$$

עבודה לסיבוב (פיתול X 2π) – כאשר הפיתול ידוע, העבודה המבוצעת לסיבוב של ציר המדחף ניתן לחישוב ללא קושי. נניח בתחילה שציר מדחף המנוע נייח בעוד מנגנון מעצור הפרוני נע. דבר זה ידרוש עבודה, כיוון שיש להתגבר על החיכוך בין תוף ציר המדחף ומעטפת המעצור. הכוח המושקע בקצה הזרוע בכדי לאזן, כלומר להתגבר על התנגדות החיכוך, מופיע על המחווני. המרחק שדרכו יש לדחוף את הכוח בסיבוב אחד הינו 2π X אורך הזרוע. התוצר של הכוח לאורך המרחק שהכוח זז (או פועל) הינו העבודה המבוצעת; או:

$$\begin{aligned} \text{עבודה לסיבוב} &= \text{החייוני על המחווני} \times 2\pi \times \text{אורך הזרוע} \\ \text{וכיוון שהפיתול} &= \text{החייוני על המחווני} \times \text{אורך הזרוע} \\ \text{העבודה לסיבוב} &= 2\pi \times \text{פיתול} \end{aligned}$$

כיוון שהחיכוך המתהווה מהתנועה היחסית של תוף ציר המדחף ומעטפת המעצור, אותה העבודה תתבצע על ידי הציר המדחף בסיבוב אחד כפי שבוצע במעצור הפרוני כאשר הוא נייח.

לדוגמה: אם המחווני מראה 200 פאונד ואורך הזרוע הינו 3.18 רגל, העבודה המתבצעת על ידי ציר המדחף בסיבוב אחד הינה: $200 \text{ lb} \times 2\pi \times 3.18 \text{ ft} = 4,000 \text{ ft.lb}$. או אם ידוע שהציר מייצר פיתול של נניח 1,000 lb.ft, העבודה המתבצעת לסיבוב של הציר תהיה:

$$2\pi \times 1,000 \text{ lb.ft} = 6,280 \text{ ft.lb} \quad (\pi=3.14)$$

הספק (K X פיתול X סל"ד) – אם העבודה לסיבוב מוכפלת בסל"ד, התוצאה תהיה עבודה לדקה, או הספק. אם העבודה לדקה מבוטאת ב – ft.lb לדקה, וערך זה מחולק ב – 33,000, התוצאה תהיה תפוקת ההספק בכוח סוס של הציר. לפיכך:

$$\begin{aligned} \text{הספק} &= \text{עבודה לסיבוב} \times \text{סל"ד} \\ &= (2\pi \times \text{פיתול}) \times \text{סל"ד} \end{aligned}$$

לפיכך:

$$\text{סל"ד} \times \text{זרוע (ft)} \times \text{מחווני (lb)} \times 2\pi = \frac{\text{הספק}}{33,000}$$

$$= \frac{\text{סל"ד} \times \text{פיתול (ft.lb)} \times 2\pi}{33,000}$$

$$K = \text{פיתול} \times \text{סל"ד}$$

כאשר: $K = 2\pi/33,000 \times 1.904 \times 10^{-4}$ (באם הפיתול הוא ב – lb.ft).
לדוגמה: אם המחווני מראה 200 פאונד, אורך הזרוע 3.18 רגל, וסל"ד הציר הוא 1,650 סיבובים, תפוקת ההספק תהיה: $200 \text{ hp} = 200 \text{ lb} \times 3.18 \text{ ft} \times 1650 \text{ RPM} \times K$.
ההספק הנמדד הוא כמובן הספק המנוע לבלימה (bhp).

הספק – פיתול – סל"ד – כשהחיכוך בין מעטפת המעצור ותוף ציר המדחף גדול מספיק בכדי לכפות עומס, אולם אינו גדול מספיק בכדי למנוע מהמנוע מלהסתובב, אין צורך לדעת את כוח החיכוך המעשי בין המעטפת לתוף. אם לא נוצר עומס, לא היה נוצר פיתול שנדרש להימדד, והמנוע היה מסתובב בסיבובים גבוהים מאד.

אם העומס היה גדל לנקודה שבה הוא היה עוצר את המנוע, למרות שיש עדיין פיתול למדידה, לא היה קיים סל"ד – באף מקרה לא ניתן לחשב את הספק המנוע לבלימה. מצד שני, נניח שקיים כוח חיכוך הגיוני בין התוף למעטפת: אם החיכוך יגדל ופעולת המנוע תואט עקב הכוח הגדול יותר שנכפה, הנטייה של הציר להסיט את המעטפת תהיה גדולה יותר, הזרוע תעביר יותר כוח למחווה והפיתול יגדל. כל עוד גידול הפיתול הוא יחסי להקטנת הסל"ד, ההספק המועבר לציר נשאר ללא שינוי – כפי שמשמע מהנוסחה:

$$\text{הספק} = K \times \text{פיתול} \times \text{סל"ד}$$

זהו יחס חשוב, כיוון שהוא מראה שההספק הינו תלות (פונקציה) של הפיתול והסל"ד. **איזון פיתול** – כאשר מנוע המטוס פועל בסל"ד קבוע, הפיתול המיוצר על ידי המנוע בציר המדחף חייב להיות שווה לפיתול המיוצר על ידי מעצור הפרוני, המדחף או כל כלי המייצר עומס. אם איזון זה מופרע – עקב שינוי מצב המצערות או זווית להבי המדחף – הפיתול הלא מאוזן יאיץ או יפחית את פעולת המנוע עד אשר האיזון יושג מחדש, או עד אשר המנוע יכשל עקב מהירות יתר או עצירה. כיוון שהסל"ד שווה בהכרח גם למדחף וגם לציר המדחף, הכוח שנקלט על ידי המדחף בסל"ד קבוע שווה לזה המסופק על ידי המנוע, כל עוד משוואת הפיתול קיימת.

הפיתול הנקלט במדחף (התנגדות אוויר) – במטוס האמיתי, מעצור הפרוני מוחלף על ידי המדחף, אשר קולט, או מאזן, את הפיתול המועבר לציר המדחף על ידי המנוע. המרחק ממרכז הלהב למרכז המדחף ניתן להשוואה לאורך זרוע המעצור. התנגדות האוויר של המדחף דומה לחיכוך בין המעטפת לתוף. שינוי זווית להבי המדחף דומה לוויסות החיכוך במעצור פרוני. מספר מנועים משלבים מחווה פיתול במקטע החרטום. בשימוש ביחד עם מד הסל"ד, ניתן לבצע חישוב ישיר של הספק המנוע לבלימה. אולם כאשר לא משולב מחווה פיתול, לא ניתן לבצע אנלוגיה למחווה של מעצור הפרוני וההספק חייב להיות מחושב בעקיפין במונחים של לחץ סעפת וסל"ד, לאחר ביצוע תיקונים למשתנים כגון טמפרטורת האוויר במאייד.

במעצור הפרוני, הפיתול מווסת על ידי החיכוך בין תוף ציר המדחף ומעטפת המעצור. אין קשר קבוע לסל"ד כיוון שמקדם החיכוך בין התוף והמעטפת נשאר קבוע בטווח סיבובים גדול. למשל: אם ציר מסתובב מיצר פיתול של 1,000 lb.ft ב – 2,000 סל"ד, הוא ייצר את אותו פיתול בסל"ד של 2,400 סיבובים.

לגבי המדחף, מאידך, העומס נוצר על ידי התנגדות האוויר, ולגבי מדחף בעל פסיעה קבועה, הפיתול הוא לחלוטין תלות במספר הסיבובים. בניסיון נמצא שבטווח נרחב של מהירויות קצה להב המדחף, הפיתול משתנה ישירות בריבוע של סל"ד המדחף. במלים אחרות:

$$\text{פיתול} = K \times \text{סל"ד}^2$$

כאשר K הוא מקדם שערכו תלוי במספר גורמים כגון צפיפות האוויר, מספר הלהבים במדחף, גודל הלהבים, צורת הלהבים וזווית הלהבים. במלים פשוטות, אם מהירות הסיבוב של מדחף פסיעה קבועה מוכפל, ערך הפיתול על הציר יוכפל בארבע. או, אם מדחף קולט פיתול של 1,000 lb.ft ב – 2,000 סל"ד, הוא יקלוט פיתול של 1,440 ב – 2,400 סל"ד, בתנאי שהפסיעה של הלהבים נותרת ללא שינוי ומהירות קצה הלהבים לא יתקרב למהירות הקול.

גרף עומס המדחף – גרף זה מראה את הקשר בין הסל"ד של מדחף פסיעה קבועה וההספק הנדרש להניעו במהירות נתונה.

משוואת הגרף שאובה מהיחסים שנדונו בסעיפים למעלה, ולפיכך:

$$\text{כיוון ש - : הספק} = K \times \text{פיתול} \times \text{סל"ד}$$

$$\text{I - : פיתול} = K' \times \text{סל"ד}^2$$

$$\text{על ידי הצבה: הספק} = K \times \text{סל"ד}^3$$

$$\text{או בהצבה כיחס: } \frac{\text{הספק}_1}{\text{הספק}_2} = \frac{(\text{סל"ד}_1)^3}{(\text{סל"ד}_2)^3}$$

במלים אחרות, ההספק המתקבל על מדחף פסיעה קבועה הינו יחסי לסל"ד שלו בחזקה שלישית, יחס שנכון כל עוד קצוות הלהבים אינם מתקרבים למהירות הקול. במילים פשוטות יותר, ההספק צריך להיות גדול 8 פעמים בכדי להכפיל את המהירות ופי 27 בכדי לשלש אותה.

סל"ד המדחף	הספק נדרש
1,000	80
1,500	270
2,000	640
2,500	1,250
3,000	2,160

המספרים ישימים, כמובן, לסוג מסוים של מדחף. מדחפים גדולים יותר ידרשו הספק גדול יותר לכל סל"ד נתון, ולהיפך. אולם, היחס בין הסל"ד וההספק ישמר תמיד לפי הנוסחה:

$$\text{הספק} = K \times \text{סל"ד}^3$$

אם נתבונן במספרים שלמעלה, נראה שככל שהסל"ד עולה, ההספק הנוסף שנדרש לתוספת הסל"ד (למשל 500 סל"ד) משתנה במהירות. רק 190 כוחות סוס נוספים נדרשים להעלאת הסל"ד של המדחף בדוגמה שלמעלה מ- 1,000 סיבובים ל- 1,500, אולם 910 כוחות סוס נוספים נדרשים להעלאת הסל"ד מ- 2,500 ל- 3,000 סל"ד.

כיוון שמספר הסיבובים הינו האמצעי היחיד לוויסות הפיתול, וההספק נקלט על ידי מדחף פסיעה קבועה, נובע מכך שאם תפוקת ההספק של המנוע משתנה, המנוע יאיץ או יפחית עוצמתו עד אשר הסל"ד מגיע לנקודה בה ההספק המועבר שווה להספק הנקלט. במקרה של מדחפים בעלי פסיעה משתנה, ההספק הנקלט הוא ללא תלות בסל"ד, כך שבשינוי פסיעת הלהבים, התנגדות האוויר ומכאן הפיתול או העומס, יכולים להשתנות ללא קשר למהירות המדחף.

לפיכך, במדחפים בעלי פסיעה משתנה, פיתול נתון יכול להיקלט במספר אין סופי של סל"ד, וכיוון שההספק הוא תלות של פיתול וסל"ד, הספק מסוים יכול להתפתח במספר לא מוגבל של שילוב פיתול-סל"ד.

פיתול מנוע כפונקציה של לחץ סעפת – כל שנשאר עתה הוא לדון בתהליך שבו המנוע מייצר פיתול, וזה נקלט במדחף. התהליך הינו זה המוכר, שבו מספקים כוח בזווית ימנית לזרוע. הסיבוכים הנובעים ממצב זה הינם שכמות הכוח ואורך הזרוע משתנים ברציפות. הכוח אינו משקל או התנגדות קבועה, אלא לחץ משתנה – הלחץ הנוצר על ראש הבוכנה על ידי הגזים המתפשטים בחלל הצילינדר. כוח זה מגיע למקסימום מיד לאחר תחילת פעימת העבודה ומיד לאחר מכן, במהלך פעימת הדחיסה, משיג ערך שלילי. אורך הזרוע במקסימום שלה הינה בקושי אורך גל הארכובה מוכפל על ידי מערכת התמסורת. כל אימת שהבוכנה בנקודה מתה עליונה או תחתונה הוא אפס. מכל מקום, למרות העובדה שמנוע מספק למעשה את הפיתול בצורה לא שוויונית, התדירות והמשך של מתקפי ההספק, ביחד עם המומנטום של החלקים הנעים, מאפשרים להתייחס לפיתול, וביחד איתו לסל"ד וההספק, כמיוצרים בצורה מתמשכת.

כל גורם אשר ישנה את הלחץ הממוצע הפועל על הבוכנה ישנה את הפיתול. אם התערובת, הטמפרטורה וסוג הדלק נשארים ללא שינוי, הלחץ המתפתח בצילינדר יהיה תלוי במסה של התערובת שמאולצת להיכנס לתוכו. זו מצידה תהיה תלויה בלחץ השורר בפתח היניקה, אשר בעקרון דומה ללחץ הסעפת. מכאן, הפיתול הופך להיות תלות של לחץ הסעפת ומשתנה ישירות איתה בכל טווחי פעולת המנוע.

בקורות המנוע – השימוש בידית המצערת ובבקורת פסיעת להבי המדחף משתמע בנוסחה:

$$\text{הספק} = K \times \text{פיתול} \times \text{סל"ד}$$

כיוון שהפיתול משתנה בקירוב עם לחץ הסעפת, למטרת דיון זה נכתוב:

$$\text{הספק לבלימה} = K \times \text{לחץ סעפת} \times \text{סל"ד} + C$$

כאשר C ו- K הינם מקדמים שערכם תלוי באופייני המנוע ותנאי הפעולה שלו.

ההספק, או הספק הבלימה, הינו לפיכך פונקציה של לחץ הסעפת והסל"ד. לחץ הסעפת מבוקר בעיקרו על ידי המצערת, ובמספר סוגי מנוע על ידי בקורות מדחס הגידוש. פתיחת המצערת במנוע המצויד במדחף מהירות קבועה ופסיעה משתנה לא ישנה את הסל"ד. אולם זה יגדיל את לחץ הסעפת, הפיתול וההספק. בצורה זו ההספק יכול לגדול ללא שינוי בסל"ד עד אשר תכולת האוויר בסעפת היניקה מגיעה למצערת מלאה, או עד אשר לחץ הצילינדר חורג ממגבלותיו או מתחילה דטונציה.

במקרה של מנוע מצויד במדחף פסיעה קבועה, הגדלת לחץ הסעפת מלווה בהכרח בהגדלת הסל"ד עד אשר הפיתול הנקלט במדחף מאזן את הגדלת הפיתול המיוצר על ידי המנוע. אין אמצעים לוויסות פיתול המנוע, למעט על ידי הסל"ד. בהתאם, במדחף פסיעה קבועה הפועל בגובה נתון, לכל מצב מצערת, או לחץ סעפת, מקבלים סל"ד והספק תואמים.

הסל"ד נשלט על ידי ויסות הפיתול הנקלט על ידי המדחף. במלים אחרות, על ידי הגדלה או הקטנה של התנגדות האוויר על המדחף. במדחפים בעלי פסיעה משתנה דבר זה מושג על ידי ידית בקרת הפסיעה אשר מווסתת את זווית הלהבים. ניתן להגדיל את ההספק על ידי הגדלת הסל"ד, בלחץ סעפת קבוע, עד אשר מושגת מהירות מנוע שבה העומסים הרדיאליים והציריים חורגים מהמגבלה. באופן תיאורטי, המנוע יפתח את ההספק המרבי כאשר משולבים לחץ סעפת (פיתול) וסל"ד מרביים מותרים. למעשה, מאפייני הגידוש ונצילות נפחית משתנים עם מהירות המנוע. שינוי במהירות המנוע מלווה בדרך כלל בשינוי משני בלחץ הסעפת, אם מצב המצערת נשאר ללא שינוי. מסיבות אלו, הספק מרבי בלחץ סעפת קבוע אינו מושג בהכרח במהירות הגדולה ביותר של המנוע. יתר על כן, יש לזכור שעקב שינויים ביעילות המדחף עם שינוי הפסיעה והסל"ד, הספק סחב המדחף אינו עולה בקנה אחד בהכרח עם הספק הבלוימה המרבי של המנוע.

כאשר משתמשים במדחף פסיעה קבועה, למפעיל אין שליטה על הסל"ד למעט, כפי שהוסבר, על ידי המצערת (כלומר, לחץ סעפת). בסייגים שזה עתה הוזכרו, המנוע יפתח את הספקו המרבי כאשר לחץ הסעפת הינו בערכו הגבוה ביותר, כיוון שזה יהיה תואם לסל"ד המרבי.

לחץ אפקטיבי ממוצע לבלימה (BMEP) – אחת מהמגבלות הבסיסיות המוטלות על פעולת המנוע הינה הלחץ המתפתח בצילינדרים במהלך הבעירה. מצד אחד, ככל שהלחצים גדלים, התוצאה הינה הגדלת ההספק; מצד שני, אם הלחצים גדולים מדי, הם יוצרים עומסים מסוכנים המובילים לטמפרטורה עודפת שיכולה לגרום לכישלון המנוע. זה חשוב, אם כך, שלרשות המפעיל יעמדו מספר אמצעים להערכה של לחצים אלו, לא רק לצורך הגנה על המנוע, אלא גם להנחות אותו לגבי נצילות ההספק.

לחצי הצילינדר אינם מתועדים על מכשיר או מחוון כל שהוא בתא ומדידתם הישירה הינה קשה מאד למעשה. הם קשורים ללחץ הסעפת, כיוון שכל הגדלה של האחרון גורמת למשקל גדול יותר של התערובת שמאולצת לתוך הצילינדר, ובהתאם, כמות גדולה יותר של אנרגיה משוחררת על ידי הבעירה. מכל מקום, מספר של גורמים אחרים חייבים להילקח בחשבון, בפרט מהירות המנוע. במצב המיטבי, לחצי הסעפת הינם מידות איכותיות בלבד. הדרך הרצויה ביותר להערכת לחצי הצילינדר מתבררת כעקיפה, והציון השגרתי שלה הינו בדרך כלל ה – BMEP.

לחץ אפקטיבי ממוצע מכשירי (IMEP) ולחצים בפועל – לעתים נוח לחשוב על לחצי הצילינדר השונים כלחץ אחד משולב אשר פועל במהלך פעימת העבודה בלבד, ואשר ביכולתו ליצר את ההספק המכשירי (IHP). הלחץ הממוצע היעיל במהלך פעימת העבודה ידוע כלחץ אפקטיבי ממוצע מכשירי (IMEP).

היחס בין IMEP והעקומה המעשית של הלחץ מבוסס על ניסיון, וטווח תחילת הדטונציה נבדק ביסודיות. בהתאם, אם ה – IMEP של מנוע יכול להימדד, ניתן יהיה לחזות את שיאי הלחצים ותופעות בעירה אחרות הנחשפות על ידי העקומה, בדיוק מספק למטרות מעשיות.

חישוב IMEP – באם ההספק המכשירי של מנוע ידוע, ה – IMEP ניתן לחישוב מהנוסחה:

$$IMEP(psi) = \frac{792000}{Displacement} \times \frac{IHP}{RPM} = K \frac{IHP}{RPM}$$

מקור נוסחה זו הינו בקצרה כדלהלן:

הכוח, בפאונדים, המופעל בכל צילינדר הינו תוצר של ה – IMEP (ב – psi) המוכפל בשטח (באינטש מרובע) של ראש הבוכנה עליה הוא מופעל, או:

$$F_{(lb)} = IMEP_{(psi)} \times A_{(sq.in.)}$$

המרחק, ברגל, דרכו הכוח נע במהלך פעימת העבודה הינו מהלך הבוכנה (באינטשים) מחולק ב – 12, או:

$$D_{(ft)} = S_{(in)} / 12$$

העבודה, ב – ft.lb., המתבצעת במהלך פעימת העבודה הינה, לפיכך:

$$\text{עבודה (ft.lb.)} = F \times D = \text{IMEP} \times A \times S / 12$$

אם המנוע הוא בעל N צילינדרים, העבודה המבוצעת לסיבוב של המנוע היא:

$$\text{עבודה לסיבוב} = \frac{\text{IMEP} \times A \times S \times N}{12 \times 2}$$

(N מחולק ב-2 כיוון שההצתה בכל צילינדר מתבצעת פעם בכל סיבוב שני)
ה-displacement, באינטש מעוקב, של מנוע הינו תוצר של שטח הבוכנה (A) מוכפל במהלך (S) ובמספר הצילינדרים (N). ולפיכך:

$$\text{עבודה לסיבוב} = \frac{\text{IMEP} \times \text{Displacement}}{24}$$

העבודה לדקה הינה העבודה לסיבוב כפול מספר הסיבובים, או:

$$\text{עבודה לדקה} = \frac{\text{IMEP} \times \text{Displacement} \times \text{RPM}}{24}$$

בחלוקת העבודה (עדיין ב-ft.lb.) לדקה, מוכפלת ב-33,000 נקבל את ה-IHP, כך:

$$\text{IHP} = \frac{\text{IMEP} \times \text{Displacement} \times \text{RPM}}{24 \times 33,000}$$

בהעברת הנתונים הידועים לצידה האחד של המשוואה נקבל:

$$\text{IMEP} = \frac{792000}{\text{Displacement}} \times \frac{\text{IHP}}{\text{RPM}}$$

ובאם לא יעלם לנו צילינדר וה-displacement נשאר קבוע, הנוסחה תצומצם כדלהלן:

$$\text{IMEP}_{(psi)} = K \frac{\text{IHP}}{\text{RPM}}$$

זו אמורה להיות דרך משביעת רצון לחישוב ה-IMEP, ובהתאם חיזוי של לחצי הצילינדר המעשיים, לולא העובדה שקשה למדוד את ה-IHP ישירות.

חישוב של IHP (IHP = BHP + FHP) - לא כל ההספק המפותח בצילינדרים (כלומר IHP) מגיע לציר המדחף. חלקו מתבזבז בתהליך ההתגברות על החיכוך הפנימי, חלקו מופנה להנעת אביזרים כמו המגנטו ומשאבות הדלק, וחלקו מופנה להנעת מערכת מדחס הגידוש. ההספק הזה מכונה הספק החיכוך (FHP). הנותר הוא ההספק השימושי המועבר לציר המדחף ומכונה הספק לבלימה (BHP).

$$\text{IHP} = \text{BHP} + \text{FHP}$$

יחס זה מאפשר חישוב פשוט יחסית ומדויק של ה-IHP, ומציע קיצור דרך לקביעת לחצי הצילינדר. הספק לבלימה ניתן לחישוב על ידי מעצור פרוני, מד כוח או מד פיתול. למעשה, כל אימת שהיחס בין הספק לבלימה, סל"ד ולחץ סעפת כילו למנוע נתון, ההספק לבלימה ניתן לחיזוי מתוך עקומת ההספק, אם שני האחרים ידועים ויש תיקון לטמפרטורת האוויר במאייד. הספק החיכוך אינו סכום קבוע, אלא גדל עם הסל"ד ומהירות מאיץ מדחס הגידוש. ניתן למוצאו לכל שילוב סל"ד ודרגת גידוש נתונים על ידי מדידה, על מד הכוח, של הכוח הנדרש לסיבוב המנוע כאשר הצילינדרים אינם מוצתים. כיוול שכזה מבוצע בדרך כלל לכל סוג של מנוע, ומכסה

את כל טווח המהירויות. כאשר הספק בלימה והספק החיכוך ידועים, ניתן לחשב את ההספק המכשירי – IHP, וממנו למצוא את ה – IMEP ולחצי הצילינדר.

BMEP – הגדרה וחישוב – באופן מעשי, לחצי הצילינדר אינם מחושבים מתוך IHP אלא מתוך BHP. בצורה אנלוגית ניתן לומר ש – IMEP הינו סכום של שני לחצים; אחד המייצר את ההספק הנדרש להתגבר על החיכוך (FHP), השני לייצור ההספק נטו המועבר לציר המדחף (BHP). הראשון נקרא לחץ אפקטיבי ממוצע לחיכוך (FMEP); השני ידוע בשמו כלחץ אפקטיבי ממוצע בלימה (BMEP). כיוון שלא ה – BHP ולא ה – BMEP מביאים בחשבון את החיכוך, ניתן להתייחס למנוע, בהקשר זה, כחסר חיכוך, שבו כל ההספק המפותח על ידי ה – BMEP בתוך הצילינדרים מועבר ללא הפסד כ – BHP לציר המדחף. בהחלפת BHP ל – IHP, BMEP ניתן לחישוב על ידי משוואה הזוהי בצורתה ובמקורה לזו שהשתמשנו בה קודם לחישוב IMEP, כלומר:

$$BMEP(psi) = \frac{792000}{Displacement} \times \frac{BHP}{RPM} = K \frac{BHP}{RPM}$$

וכך, אם נוסחת BMEP זו תחולק על ידי נוסחת ה – IMEP התואמת, נראה ש:

$$\frac{BMEP}{IMEP} = \frac{BHP}{IHP}$$

לפיכך, BMEP הינו משהו אבסטרקטי – לחץ מדומה שאין לו קיום אמיתי בצילינדרים. IMEP גדול בבירור מאשר BMEP, כיוון שמכיל גם את ה – BMEP וגם את ה – FMEP. (תלוי במדה רבה בסל"ד, ה – BMEP יכול להיות ב – 10 עד 50 psi פחות מה – IMEP, ויכול לייצג לא יותר מאשר 85% מהאחרון.) יתר על כן, הלחצים המרביים המעשיים, כפי שנראה על עקומת לחץ הצילינדר, גדולים יותר מאשר ה – IMEP. ואף על פי כן, האבסטרקטיות הזו מוכיחה עצמה כשימושית במציאת הלחצים המעשיים והגדרת מגבלות התפעול.

BMEP כאינדקס ללחצי הצילינדר – ה – BMEP ניתן לחישוב בקלות בכל שלב של הפעולה כביטוי של שלוש קבוצות: BHP (מעקומת ההספק, מד פיתול, מעצור פרוני או מד כוח), סל"ד (ממד הסל"ד), והקבוע (792000/displacement). יתר על כן, ה – BMEP נושא יחס מוגדר ל – IMEP (BMEP/IMEP=BHP/IHP), אשר נוצר במהלך טווח פעולת המנוע על ידי הכיול של ה – FHP (IHP=BHP+FHP). כיוון שניתן להסיק את לחצי הצילינדר המעשיים ומאפייני הבעירה האחרים מתוך ה – IMEP, וכיוון שהיחס של ה – BMEP ל – IMEP ידוע, יוצא מכך שלחצים אלו ותנאים אחרים ניתנים להסקה מתוך ה – BMEP ומתוך ה – IMEP. העובדה שניתן לחשב את ה – BMEP בקלות רבה מאפשרת שימוש ב – BMEP בצורה נוחה יותר לצורך קביעת מגבלות או ערכי ביצועי המנוע.

כיוון שעליית ה – BMEP משמעותה בדרך כלל הגדלת לחצי הצילינדר המעשיים, שיקולי המבנה יכתיבו שתחום הפעולה יהיה מתחת לערך BMEP מסוים, או שהלחצים יגרמו לכישלונות חמורים. כיוון שלחצי צילינדר גבוהים ילוו בדרך כלל בטמפרטורות ראש צילינדר גבוהות, יוצא מכך שערכי ה – BMEP גם הם יקבעו שורה של מגבלות למניעת דטונציה, להגנה על חומרי הצילינדרים כנגד טמפרטורות חורגות, ואפילו לבחירת סוג מצת ההצתה.

מגבלות BMEP לא יהיו בהכרח זהות לכל טווח הפעולה של המנוע, כיוון שה – IMEP ולא ה – BMEP, כופה למעשה את המאמצים המכאניים והטמפרטורות הגבוהות. אם, לדוגמה, מנוע שני שלבים, שתי מהירויות, פועל במהירות גבוהה בשלב העזר הגבוה, ה – FHP יהיה משמעותית גבוה יותר מאשר מנוע הפועל במהירות נמוכה. בהתאם, חלק קטן של סך ה – IMEP יהיה זמין כ – BMEP במקרה הראשון מאשר בשני, ומגבלות ה – BMEP חייבות להיות נמוכות אם רוצים לשמור IMEP בטוח ולמנוע חריגת לחצי שיא.

שימוש במגבלות BMEP בפעולת המנוע – מתוך היחס:

$$BMEP = K \frac{BHP}{RPM}$$

מתוך הנוסחה ניתן לראות שה – BMEP משתנה ישירות עם ה – BHP וביחס הפוך לסל"ד. בעקרון, רצוי להריץ את המנוע בסל"ד הנמוך ביותר האפשרי עקב יעילות המדחף, כיוון שה – FHP יהיה נמוך, צריכת דלק ושמן מופחתים, בלאי נמוך, וכפועל יוצא של המהירות הנמוכה של מאיץ המגדש, מטען

האוויר-דלק המסופק לצילינדרים, הקר ביותר. התוצאות היעילות ביותר יושגו איפה על ידי הפעלה במקסימום או קרוב לו של מגבלת ה – BMEP, כיוון שככל שה – BMEP גבוה יותר, יותר BHP יושג בכל סל"ד נתון, או אם לנסח זאת אחרת, מירב ה – BHP יובטח בסל"ד הנמוך ביותר. סוג פעולה זה ישים בשיט, כאשר אין צפי להגדלה פתאומית בהספק, אשר עלול לגרום לחריגה ממגבלת ה – BMEP הבטוח.

כהמחשה לנאמר למעלה, נניח שטייס המטיס מנוע R-1980 רוצה לשייט בהספק בלימה (BHP) של 600 בסל"ד היעיל והחסכוני ביותר. התייחסות לנתונים המתאימים יורו לו שלצורך שיט במהירות מגדש נמוכה עם דלק 100 אוקטן, ה – BMEP המירבי המומלץ הינו 150 psi. החלת הנוסחה:

$$BMEP = K \times BHP/RPM,$$

הקבוע K יהיה $400=792000/1980$, ולטייס ניתנת הבחירה של צירופי סל"ד – BMEP כדלהלן:

BHP	סל"ד	BMEP
600	1000	240
600	1200	200
600	1500	160
600	1800	133
600	2100	114 וכו'

כיוון שה – FHP קטן עם הסל"ד, כמו שקורה לבלאי, נראה ששני הצירופים הראשונים מציעים אפשרויות מפתות בנושא חסכון בדלק ושמירה על אורך חיי המנוע. מכל מקום, הם מחייבים פעולה בזווית להבי מדחף גבוהה בכדי להשיג את הסחב והפיתול הנדרשים, ועקב כך יוצרים עומס כבד על המנוע המסתובב באיטיות. דבר זה מחייב לחצי צילינדר גבוהים, כפי שרואים על ה BMEP התואם, וכתוצאה, לחצים על הבוכנה וחלקי הצילינדר וטמפרטורות ראש צילינדר גבוהות עם אפשרות לדטונציה. העומסים על גל הארכובה הופכים להיות חריגים, והבלאי בנקודות אלו יכול להיות גדול יותר מאשר בסל"ד גבוה.

בכדי למנוע אימוץ המנוע, הטייס פונה לסל"ד הגבוה ולחצים נמוכים המוצעים בצד השני של הטבלה וכך נתקל בסדרה אחרת של קשיים. סל"ד גבוה יוצר FHP גבוה. בהתאם, אם נדרש לשמור BHP של 600, ה – IHP חייב לגדול, ואיתו תצרוכת הדלק – כיוון שה – IHP ולא ה – BHP שולט בסופו של דבר בתצרוכת הדלק. סל"ד גבוה מוביל גם לעומסים חוזרים חריגים. ככל ששינויי הסל"ד תכופים יותר, כך יגבר הבלאי או שהמנוע יתפרק. באותו הזמן, מהירויות גבוהות של מאיץ המגדש יכולים לגרום לטמפרטורת תערובת גבוהה ואפשרות לדטונציה. הפעלה נכונה נמצאת בוודאות איפה שהוא בין שני הקיצוניים.

מבחנים שבוצעו על ידי היצרן מוכיחים שהמנוע יכול לפעול בבטחה בטווח שיט (500 – 800 BHP לערך), במהירות מאיץ המגדש נמוכה עם דלק 100 אוקטן, למשכי זמן ממושכים עם לחצים וטמפרטורות צילינדר המיוצגים על ידי BMEP מירבי של 150 psi. פעולה מעל BMEP זה תכפה טמפרטורות ועומסים חריגים. פעולה מתחת לזה מבזבזת דלק ומקצרת את אורך חיי המנוע. בכל מקרה התוצאה תהיה נחיתת אונס. הטייס מצידו יקבע את הסל"ד כך שהמנוע יפעל במהירות הנמוכה האפשרית שתפתח את ההספק לבלימה הרצוי (600) ושלא יגרום לחריגת BMEP מעל המגבלה המירבית למהירות שיט, במקרה זה 1600 סל"ד ($150=400 \times 600/RPM$ [סל"ד = 1600]).

יש לציין שהבעיה המעשית אינה כה פשוטה בדרך כלל כפי שתואר למעלה. היתרונות של הפעלה בסל"ד מזערי הינן אמיתיות, לא רק עקב FHP, בלאי מנוע ותצרוכת דלק נמוכים, אלא גם עקב מהירויות מאיץ מגדש נמוכות הגורמות לטמפרטורת תערובת נמוכה והמאפשרות "להוציא" מהמנוע הספקים גבוהים עם סיכוי נמוך לדטונציה. מאידך, יעילות המדחף משתנה עם הסל"ד וזווית הלהבים של המדחף. בסוג מדחף מסוים יתכן ויהיה יעיל יותר לפעול בסל"ד של 1700 עם BMEP של בערך 142 psi להפקת הספק הבלימה המבוקש של 600 BHP. אילוצים אחרים יכתיבו גם הם פעולה בשיט מתחת ל – BMEP המירבי המומלץ ומעל הסל"ד המתאים לו.

סל"ד, לחץ סעפת ושינויי BMEP במצערת חלקית – אם מנוע מופעל במצערת חלקית בכל סל"ד מעל טווח הסרק, נפח האוויר הנשאב על ידי הבוכנות הוא גדול; מכל מקום, עקב סגירתו החלקית של פרפר המצערת, מסת האוויר הזורמת לצילינדרים מצומצמת ולחץ הסעפת נמוך. אם הטייס מקטין את מהירות המנוע, שיעור השאיבה של הבוכנות מוקטן. למרות שנפילת הלחץ בפרפר תקטן גם היא, אם קביעת המצערת נשארת ללא שינוי, הפרפר יגרום לפחות צמצום יחסי בזרימת האוויר המופחתת המגיעה לבוכנות בסל"ד נמוך. (מסת האוויר הזורמת דרך נחיר קבוע משתנה בשורש ריבועי של נפילת הלחץ) עקב כך לחץ הסעפת ייטה לעלות ככל שמהירות המנוע תקטן, תופעה שניתן להבחין בה, למשל, במהלך בדיקות קרקעיות של מדחף פסיעה משתנה.

הועיל וה – BHP הוא תלות של סל"ד ולחץ סעפת, כלומר: הספק לבלימה $K \times \text{סל"ד} \times X$ לחץ סעפת $C +$, נובע מכך שהקטנת BHP אינה יחסית להקטנת הסל"ד, אם מצב המצערת נותר ללא שינוי, כיוון שלחץ הסעפת אינו קבוע אלא גדל למעשה.

מתוך הנוסחה הכללית: $BMEP = K \times \text{RPM} \times BHP$, ניתן לראות שאם הסל"ד קטן מהר יותר מה – BHP, הערך של BHP/RPM גדל, וערכו של BMEP גדל גם הוא. בהתאם, כאשר פועלים במצערת חלקית, זה יהיה נכון לפעול בהתאם לתהליך הבא:

- הקטן לחץ סעפת בעזרת ידית המצערת לפני הקטנת הסל"ד.
 - ולהיפך, הגדל סל"ד לפני עליית לחץ הסעפת.
- אי הקפדה על כללים אלו יכולה להוביל ללחצי צילינדר חריגים כאשר פועלים בקרבת מגבלות ה – BMEP המרביות המותרות, או לדטונציה, אם משתמשים בדלק בעל ערך נמוך לעמידה בדטונציה. ללא התחשבות בתנאים, הם מחייבים אימון בהפעלה לפי שמיעה.
- שיקולים אלו אינם ישימים לפעולה במצערת מלאה, כיוון שכאשר אין צמצום בזרימת האוויר, ה – BHP משתנה פחות או יותר עם הסל"ד, והתוצאה היא שה BMEP נשאר בעיקרון קבוע.

מדורגים

הצורך במגבלות תפעול – ניתן ליצר מנוע שישרוד לעד. על ידי שימור מתאים, אחסונו במיכל מתאים ובטמפרטורה מבוקרת, הוא יהיה במצב נאות לאחר מספר שנים כמו שבתחילת האחסנה. מכל מקום, בכדי לשרת מטרה שימושית, המנוע חייב לפעול, ובפעולתו הוא נתון לבלאי שבהכרח יגביל את אורך חייו. הדיון הקודם עסק בכוחות השונים הנדרשים למנוע בתהליך יצור ההספק. עם דחיפת ידית המצערת, לחצי הצילינדר עולים והעומסים הנובעים מלחצים אלו גדלים. ברור שיש מגבלה לעומסי הלחץ שניתן לכפות בביטחון על המנוע, הבוכנות, טלטלים, מיסבים וחלקי המנוע האחרים. באופן דומה, בקרת סיבובי המנוע דרך מקבץ הסל"ד חייבת להיות בתחום מגבלות מוגדרות על מנת למנוע התהוות כוחות צנטריפוגליים וכוחות חוזרים חורגים. בנוסף לעומסים המכאניים, דטונציה יכולה להיות גורם מכריע בהגדרת מגבלה ספציפית ללחץ או לסל"ד בשימוש בדלק מסוים. כשמגבלות הלחץ והסל"ד נקבעו, מגבלת ההספק מוגדרת אוטומטית. תפעול מנוע מוגבל על ידי מגבלות הנכפות על הצילינדר וטמפרטורת השמן ולחצי שמן ודלק.

מגבלות התפעול שבתוכם דרגת האמינות המקובלת ניתנת להשגה ידועות כמדורגי המנוע. תפעול בטווח המדרוגים מבטיח מהימנות, כפי שהוכח רבות על ידי סוג המנוע או מבחני הוכחה שנדרשו על ידי השלטונות. תפעול מחוץ למגבלות אלו אינו יכול להבטיח אמינות זו, והטייס נשען על שולי בטיחות שלא הוכחו. ככל שהאמינות תופשת מקום בעל חשיבות גבוהה, וככל שהמדורגים מגדירים את הגבולות העליונים של ביצועים מהימנים, הם מהווים התחלה הגיונית לדיון בתפעול מנוע.

מדורגים של מנוע מסוים ניתנים להימצא במפרטי המנוע ובהנחיות התפעול הייחודיות, ובנוסף, הם מצוינים בעקומות התפעול הישימות.

מדורגים של תפעול ממושך – בדרך כלל, מדורג אחד מגדיר את ההספק המירבי שניתן להשתמש בו בתפעול מתמשך. דבר זה מוגדר כ – MC (מקסימום למעט המראה) או מרבי מתמשך. זהו ההספק המרבי המותר לתפעול מתמשך ו – MC סל"ד הוא מהירות המנוע המרבית שניתן להשתמש בה לתפעול מתמשך ללא תלות בהספק. זה אמור להיות 100% של ההספק והסל"ד, ומשרת כבסיס להשוואה של הספקים ומהירויות אחרות. למשל, "50% הספק" הינו 50% של הספק – MC.

מגבלות תפעול מומלצות – נהוג להמליץ על מגבלות מסוימות להגדרת הספק מרבי לתפעול חסכוני. מגבלות אלו, אשר התקבלו כמדורגים ותורגמו למגבלות מחייבות, הינן תוצאה טבעית של שימוש המעורב ברכש ציוד צבאי ואזרחי. המפרטים הצבאיים חייבו הגדרה של מאפייני תפעול מסוימים באחוזי הספק סדירים מוגדרים. 67% מההספק הסדיר ב – 87.5% של מהירות המנוע הסדירה, לפי הנהוג, הופכים להגדרה של הספק שיוט וסל"ד מרביים. מתוך הגדרה זו נקבע המאיד כך שכל תפעול מתחת ל – 67% הספק ו – 87.5% סל"ד הינו בטוח החסכוני של ספיקת הדלק. מעל הספק ומהירות זו ההעשרה הנדרשת למניעת דטונציה גורמת לתפעול בלתי חסכוני על בסיס חסכון בדלק. השירותים הצבאיים עדיין דבקים בהגדרה המדויקת של הספק, סל"ד ו – BMEP לשיוט, והוראות התפעול שלהם מתבססות על תפישה זו.

בביסוס של תהליכים לתפעול חסכוני, טוב יעשו מפעילים אחרים בהתחשבם בגורמים אלו בעת התקנת מגבלות תפעול, אם חסכון מירבי הינו גורם רצוי. הסיבות המקוריות להגדרת 67% הספק ו – 87.5% סל"ד כמגבלות לתפעול חסכוני עדיין שרירות, כיוון שהמידוד במאיד עדיין עוקב אחרי מאפייני ההעשרה המקוריים. תפעול שחורג מהאמור למעלה יגרום לעליה מהירה בתצרוכת הדלק אשר אינה הולמת את הביצועים הנוספים שהושגו.

בנוסף להספק וסל"ד, יצרן המנוע ממליץ על BMEP מרבי לתפעול חסכוני בתערובת ענייה. דבר זה מבוסס על בחינות חשובות וניסיון שרות, כיוון שזה מהווה מגבלה מעשית הנותנת את השילוב האופטימאלי לעמידות ויעילות. שלושת הגורמים המגבילים, הספק, סל"ד ו- BMEP נותנים למתפעל את שיקולי היצרן לטווח הפעולה המספק את היתרונות הגדולים ביותר הנמדדים בעמידות וחסכון.

ידוע שמפעילים מסוימים יכולים להחליט שטוב יותר עבורם לפעול מחוץ למגבלות מומלצות אלו. יש להם את היכולת לבחור בתחום טווח ההספק, סל"ד ו- BMEP, כל עוד אינם חורגים מהמגבלות המחייבות של הספק ומהירות מנוע בפעולה נורמאלית מתמשכת. מכל מקום, זה נשמע מעשי להישאר בתחום המגבלות המומלצות, אלא אם ניתן להוכיח שיש יתרונות אחרים שעולים בערכם על אובדן החיסכון והעמידות.

מדרגים למצבים מוגבלי זמן – כמו עם מרבית המכשירים המכאניים, מנוע מטוס יכול לעמוד במאמץ יתר זמני מבלי לפגום באמינותו ועמידותו. בהתאם, המדרג להמראה נקבע, הוצבו מגבלות שבתוכן המנוע יכול להיות מתופעל למשך זמן מוגבלים בהספק ומהירות גדולים יותר מאשר אלו שאושרו לתפעול מתמשך מירבי. **המראה** – בעוד ההמראה דורשת את תפוקת ההספק הגדולה ביותר, היא מצב בעל תחום זמן מוגבל. לקבלת תפוקה זו על בסיס תפעול מתמשך ידרש מנוע כבד בהרבה, ויעילות המטוס תגדל בהתאמה על ידי קביעת מדרג אשר יאפשר למנוע לעמוד בדרישות ההמראה, אולם יגביל ביצוע זה למשך זמן קצר.

מגבלות הזמן הספציפיות לתפעול אזרחי מוחלטות על ידי ה- CAA (Civil Aeronautics Administration). כיוון שמגבלת זמן זו נתונה לשינויים, יש להתייעץ לגבי הוראות התפעול הספציפיות לכל סוג מנוע נתון.

במנועים בעלי שתי מהירויות או שני שלבים של מדחס הגידוש, ההמראה מותרת בדרך כלל רק במהירות המאיץ הנמוכה או בשלב הנמוך של המדחס. יוצאים מהכלל לכלל זה ניתן למצוא בטיפוסי מנוע ייחודיים.

מספר מנועי מטוסים יכולים לפעול באופן מעשי ברציפות תחת תנאי עומס של הספק ומהירות למשך תקופות זמן ארוכות מאלו המותרות על ידי המדרגים. מכל מקום, תקופת התפעול האמינה מופחתת למשך זמן קצר ובלתי מעשי. על ידי אכיפת מגבלת זמן להספק המראה, האפקט המצטבר של עומס היתר מתחלק באופן שווה על פני הזמן בין השיפוצים, ואורך חיי המנוע היעיל מוארך בהתאם.

מאפייני דטונציה – דטונציה מוגדרת בצורה כללית כבעירה מהירה ובלתי נורמאלית, המתרחשת באופן סימולטאני עם הבעירה הנורמאלית. הדטונציה מאופיינת על ידי אופייה המידי, בניגוד לבעירה הנורמאלית החלקה והמתקדמת. גרף המייצג את לחצי הצילינדר במהלך תהליך הבעירה מראה עקומת לחץ עולה בחלקות כאשר הבעירה נורמאלית. במצב דטונציה, הלחצים עולים בצורה מהירה ואלימה לשיאים שהם לעיתים מעבר למגבלות המבנה של תא השריפה. הדטונציה היא מסוכנת ויקרה.

העלאה קיצונית של הטמפרטורה מגדילה את ההשפעה המזיקה של לחצי הדטונציה. חוקי בויל וצ'רלס המוכרים מציעים הסבר לקשר גומלין זה. לכל גז בנפח נתון, הגדלה בלחץ דורש הגדלה פרופורציונאלית בטמפרטורה:

$$\frac{Pressure_1}{pressure_2} : \frac{Temperature_1}{Temperature_2} : \frac{Volume_2}{Volume_1}$$

לחצי הדטונציה הם כה מהירים שתנועת בוכנה קטנה מתרחשת להגדלת הנפח, לכן:

$$\frac{P_1}{P_2} : \frac{T_1}{T_2}$$

שילוב הלחץ הגבוה והטמפרטורה הגבוהה של הדטונציה יוצר הרבה תוצאות בלתי רצויות. כמה מהתוצאות המכאניות המצויות מפורטות להלן:

- כשלון בוכנה וראש צילינדר עקב לחצים גבוהים על חלקים בעלי חום יתר.
- כשלון הסיכה עקב התפרקות השמן תחת טמפרטורות גבוהות.
- עיוות ושריפת שסתום ותושבת.
- טבעות בוכנה שבורות.
- כשלון חפי הצילינדר.
- העמסת יתר של מיסבים וחלקי מנוע אחרים.

אלו הם המאפיינים הכלליים של תוצאות הדטונציה. הגורמים החשובים התורמים לדטונציה נידונים בסעיפים הבאים.

בעיקרון, דטונציה תתרחש כאשר שינויים בתנאי התפעול מגדילים את שיא הלחצים או טמפרטורות הבעירה מעל מגבלות קריטיות.

הגורמים התפעוליים העיקריים הגורמים לעליית לחץ וטמפרטורה רשומים להלן ונידונים בפרוט בדפים הבאים.

- מאפייני הדלק.

- יחס דלק-אוויר.

- לחצי סעפת.

- טמפרטורות ראש צילינדר ותערובת מסופקת.

מאפייני דלק – במסגרת מחקרים נרחבים בתחום הנפט, פותח בזמן מחומר שהיה תזקיק בלתי יציב בעל תכונות משתנות, לסדרה של דלקים אמנים שהתכונות שלהם מגודרות בדיוקנות ונשלטות. דרוג האוקטן, המצביע על מצב של דלק נתון על סקאלה של התנגדות לדטונציה, הינו אחד מתוך כמה גורמים חיוניים הקובעים את התאמת מפרט דלק נתון למנועים מסוימים.

שכלול בשיטות מחקר הנפט, ודרישה לדלקים חדשים, חייבו שינויים מסוימים בשיטות הבדיקה. היחס המעשי באחוזים בין דלקים מעל 100 אוקטן ואיזו אוקטן לא ניתן לשמירה. ועל על פי, דרוג האוקטן עדיין מייצג את יכולת הדלק לעמוד בטמפרטורות ובלחצי בעירה גבוהים ללא דטונציה.

מנועי מטוסים מגודשים ובעלי יחסי דחיסה גבוהים, דורשים דלק בעל אוקטן גבוה בכדי לפתח את מירב ההספק הבטוח הניתן. דלק בעל אוקטן נמוך יגרום לבעירה בלתי מבוקרת או דטונציה, או, אם מקטינים את ההספק להימנע מסכנה זו, התפוקה הנובעת מכך היא שולית בדלק המוגדר.

שימוש באוקטן גבוה מהמוגדר לא יגרום נזק כל עוד מתחשבים בתפעול המנוע באופן כללי. מכל מקום, המתפעל חייב לדעת שקיימת אפשרות שחיימיקלים מסוימים עלולים להשפיע על מערכת הדלק והמאייד, כיוון שדלקים מסוימים בעלי אוקטן גבוה דורשים הכנה מיוחדת של המיכלים וחלקים אחרים במערכת הדלק.

יחס דלק-אוויר – ויסות בלתי נאות של התערובת נוטה לעתים קרובות ליצור דטונציה. המאייד תוכנן בקפידה למדוד תערובות מוגדרות תחת שני כיוונים אוטומטיים. המתפעל חייב לקשור כיווני תערובת אלה עם דרישות ההספק וגורמי התפעול. לעתים נדרשות התפשרויות כשעוסקים בגורמים מוגדרים כגון הספק, חסכון וקירור. מה שלא יהיו הגורמים המעורבים, תמיד נדרש לבחור את התערובת שתבער ללא דטונציה.

טמפרטורת אוויר מאייד גבוהה יכולה לקדם דטונציה ומחייבת יותר תשומת לב של הטייס, אם רוצים למנוע דטונציה. באופן כללי, הנטיות הגדולות ביותר לדטונציה נמצאות בטווח התערובת שבין חיסכון מירבי והספק האופטימלי.

לחץ סעפת – ללחץ הסעפת יש השפעה ישירה על הדטונציה. המתפעל יכול לשלוט בבעירה ולהימנע מדטונציה על ידי התאמת הסל"ד ולחץ הסעפת הנאותים. באופן תיאורטי ניתן לבחור במספר שילובים של סל"ד ולחץ סעפת שיספקו את אותו ההספק. סל"ד גבוה ולחץ סעפת נמוך מציעים יתרון ביחס למניעת הדטונציה. מנקודת מבט מעשית, מכל מקום, מהירויות מנוע גבוהות מדי מבזבזות הספק בהתגברות על הפסדי חיכוך, יצור בלאי מנוע מהיר ובלתי נורמאלי ואינם חסכניים ביחס לתצרוכת הדלק.

תערובת נכנסת וטמפרטורות ראש צילינדר – טמפרטורה גבוהה של תערובת נכנסת גורמת לדטונציה בצורה קיצונית. במספר מקרים טמפרטורה גבוהה של התערובת הנכנסת נגרמת מטמפרטורת אוויר חיצוני גבוהה או שימוש יתר בחימום אוויר מאייד. במקרים אחרים, טמפרטורה גבוהה של אוויר יניקה נובעת מחום עקב דחיסת האוויר הנורמאלי במדחס הגידוש. שימוש נאות במקרן הביניים יסייע למניעת חימום דחיסה עודף במערכת מדחס הגידוש.

טמפרטורות ראש צילינדר, שהינם משניים לקביעת התערובת, וטמפרטורת אוויר יניקה, יכולים לסטל את הסקאלה כלפי הדטונציה כאשר התנאים קריטיים. טמפרטורות הראש יכולות לעשות את ההבדל בין בעירה מבוקרת ודטונציה. טמפרטורות הראש מחייבות תשומת לב מיוחדת במהלך תפעול קרקע ובמהלך תמרונים במהירות נמוכה.

זיהוי דטונציה – זיהוי דטונציה, במהלך טיסה, יכול להיות קשה למדי. מחווי דטונציה מעבדתיים הם במידה מסוימת בלתי מעשיים לשימוש כללי. חיווי ויזואלי הינו לעתים יקר ערך. אם צינור המפלט חשוף לראיה, נשיפות עשן שחור, חלקיקי פחם לוהטים, או להבות כתומות, חדות וקטנות, יכולים להצביע על דטונציה. פרט לצידוד מיוחד, טמפרטורת ראש צילינדר מציעה את ההערכה הטובה ביותר לתהליך הבעירה הבלתי נראה. גידול מהיר בטמפרטורת ראש צילינדר, אלא אם מוסבר על ידי גורמים ברורים, מצביע לעתים על דטונציה. סגירת מצערת הינה הפתרון הבטוח והמיד.

מניעת דטונציה – למניעת דטונציה יש שלוש דרישות עיקריות:

- דלק מתאים.

- תהליכי תפעול נכונים.

- אחזקה נאותה.

יש להניח שהדרישות הראשונה והשלישית מיושמות בצורה סדירה. הדרישה השנייה נדונה במקום אחר בספר זה. לפי שעה, בקרת דטונציה מותנית בשלושת הגורמים הבאים:

- יחס סל"ד - לחץ סעפת.
- קביעת תערובת.
- טמפרטורות אוויר כניסה.

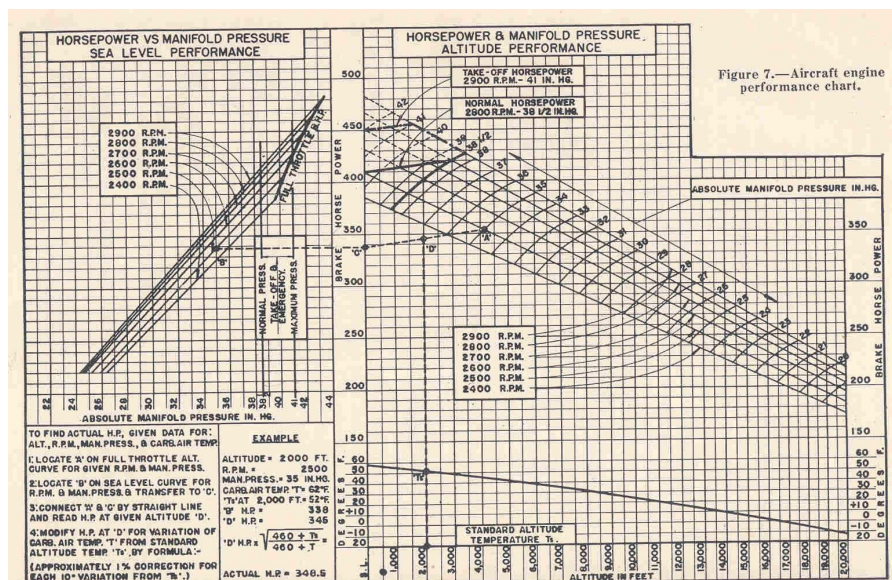
מאפייני הצתה מוקדמת – הצתה מוקדמת ודטונציה הינן דוגמאות נפרדות וברורות לבעירה בלתי נשלטת. הצתה מוקדמת, כפי שהשם מרמז, מתרחשת לפני ניצוץ סדיר. דטונציה מתרחשת לאחר שהמצתים הציתו את תערובת האוויר-דלק. הרבה נקודות טכניות מבדילות בין הצתה מוקדמת ודטונציה, אולם גורם הזמן – הצתה מוקדמת לפני הניצוץ, דטונציה לאחר הניצוץ – הינו הקל לזיכרון. הצתה מוקדמת מתייחסת להצתה של מטען האוויר-דלק על ידי נקודות של חימום מקומי בתוך תא השריפה. הצתה מוקדמת יכולה לבוע מאלקטרודת מצת לווהטת, שסתום פליטה, או יתכן חלקיקי פחם מחוממים עד לידי ליבון. כמו בדטונציה, גורמי פעילות כגון טמפרטורת אוויר נכנס, תערובת ענייה וקירור לא נאות, הם הגורמים ליצירת ההצתה המוקדמת. הצתה מוקדמת תלויה במידה כל שהיא במאפייני הדלק, סיבה טובה נוספת לשימוש זהיר במפרטי הדלק.

הצתה מוקדמת יכולה לגרום לדטונציה, ובצורה פרדוקסאלית, דטונציה יכולה לגרום להצתה מוקדמת עקב הטמפרטורות הגבוהות. יתר על כן, הצתה מוקדמת יכולה להיות הרסנית כמו הדטונציה. באופן כללי, הפרטים הבאים חייבים בתשומת לב המתפעל במניעת ההצתה המוקדמת:

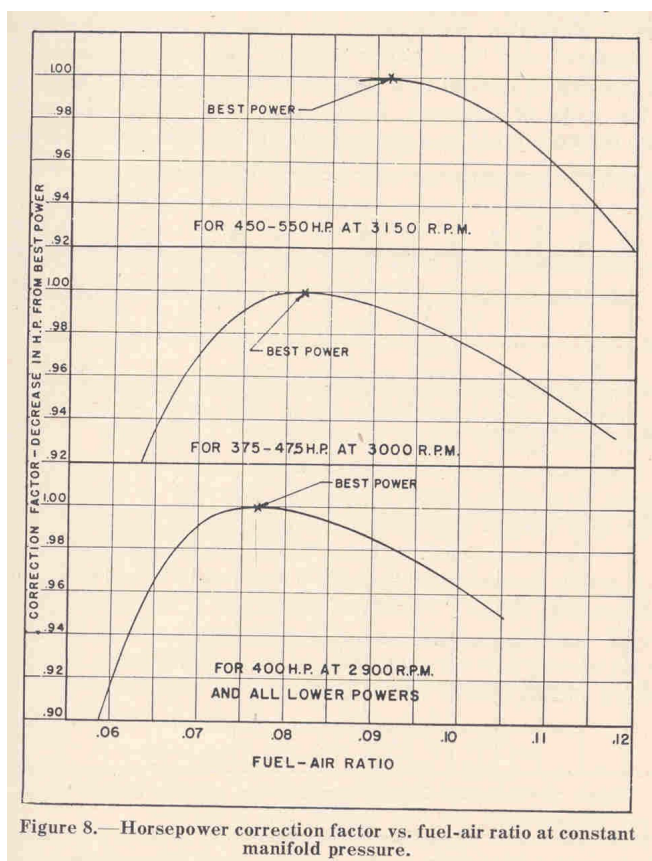
- טמפרטורות האוויר הנכנס.
- טמפרטורות ראש הצילינדר.

תרשימי כיול הספק – גרף ביצועי מנוע מטוס בתצורתו הבסיסית בגובה פני הים וכיול הגובה מוצגים בציור 7. עקומת גובה פני הים מראה את שינוי ההספק עם לחץ סעפת בסל"ד קבוע עד למצערת מלאה או הספק המראה, בטמפרטורת מאיד קבועה, בתערובת מסוימת (עשירה, הספק מיטבי או ענייה). כיול גובה פני הים של מנוע מושג על מתקן הבדיקה, בעזרת דינמומטר אלקטרוני או מכשיר מדידת הספק.

עקומת כיול הגובה, שנמצאת קרוב לעקומת גובה פני הים, מראה את שינוי ההספק בגובה בסל"ד קבוע ובתנאים אטמוספריים סטנדרטיים. עקומת כיול גובה פני הים הינה במהותה עקומת תפעול במצערת חלקית, בעוד שכיול הגובה הינו עקומת מצערת מלאה. סקאלת הגובה של העקומה אינה ליניארית במונחים של רגל, דבר המסביר את המרווח הלא שווה של הנקודות בציר האופקי, מרווח אשר מצטמצם באופן פרופורציונלי בכיוון הצד הימני של העקומה. סקאלת הגובה מצוירת כפונקציה של יחס הצפיפות (P/P_0) ולכן עקומות הסל"ד הקבוע הינן קווים ישרים. קווי לחץ הסעפת הקבוע הוצבו על קווי הגובה מתוך נתוני הבדיקות. ידוע באופן כללי, שביצועי הגובה של מנועים לא מגודשים ומנועים בגידוש קונבנציונאלי (דרגה אחת) יוצרים קו ישר כאשר מצוירים כנגד לחץ אטמוספרי, וההספק הבלימה ב – 20,000 רגל הינו 48% של ההספק בגובה פני הים. לפיכך, ניתן לראות שהספק הבלימה של כל מנוע בגובה הקרוב ל – 55,000 רגל יהיה אפס. במלים אחרות, כל ההספק הזמין של המנוע ינוצל לצורך התגברות על חיכוך המנוע.

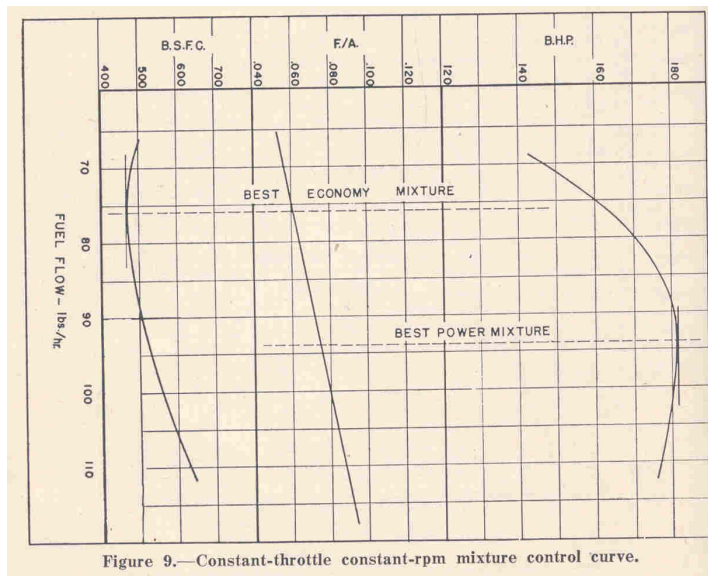


משתנים המשפיעים על דיוק עקומות ההספק – ישנם מספר משתנים, נשלטים ובלתי נשלטים, השונים מתנאי הכיול על מתקן הבדיקה של המנוע, שיש להם השפעה ניכרת על דיוק ההספק כפי שמשתקף בעקומות ההספק של המנוע. חלק מהמשתנים החשובים יותר, המשפיעים על דיוק עקומת ההספק, נידונים למטה.



1. **השפעת יחס אוויר-דלק** – הגורם הבודד המשפיע ביותר על תפוקת ההספק הינו יחס דלק-אוויר של המטען הנכנס לצילינדרים. אם התערובת ענייה מדי, אחד או יותר מקשיי התפעול הבאים יופיעו: תפעול מנוע קשה – כיבוי מנוע פתאומי, אש חוזרת – דטונציה, חימום יתר או אובדן ניכר של הספק המנוע. מאידך, תערובת עשירה מדי בצורה קיצונית, תגרום גם היא לתפעול מנוע קשה, או כיבוי, וכן אובדן הספק ניכר. ציור 8 מראה את השפעת שינויי התערובת בלחץ סעפת קבוע וסל"ד קבוע למספר סל"דים והספקים למנוע קונבנציונאלי מסוים. מעניין לציין שבהספק וסל"ד נמוכים, נקודת ההספק הטובה ביותר קיימת בתערובת ענייה יותר. ההשפעה של שינוי התערובת הינה קריטית יותר, בצורה משמעותית, בצד העני של ההספק הטוב ביותר מאשר בצד העשיר. שינויים בספיקת הדלק, ביחס לכיול הבסיסי של המאייד, יכולים להשפיע בסדר גודל של עד 8%.

איור 9 מתאר בצורה גראפית את המשמעות של שני המונחים, "תערובת חסכונית מיטבית" ו – "תערובת הספק מיטבית", והיחס ביניהם. קו המשיק בעקומה לשיא BHP כנגד ספיקת הדלק, נקודת השקתו מהווה את "תערובת הספק מיטבית", בעוד שקו ההשקה של הנקודה הנמוכה ביותר של BSFC כנגד ספיקת הדלק מהווה את "תערובת חסכונית מיטבית". באופן כללי, טמפרטורות ראש צילינדר מרביות יתרחשו בספיקת דלק בין "תערובת חסכונית מיטבית" ו"תערובת הספק מיטבית".



2. חלוקת התערובת - במנועים רבי צילינדרים, בהם סעפת יניקה ארוכה היא צורך, נמצא שזה בלתי אפשרי לקבל את יחס האוויר-דלק המדויק בכל הצילינדרים. מכל מקום, במנועים מודרניים שמשתמשים במפלג הזרקה (דלק מוזרק לתוך מרכז מאיץ הגידוש ונזרק החוצה בצורה רדיאלית על ידי הכוח הצנטריפוגאלי דרך מעברים קדוחים), ומערכות בהם הדלק מוזרק לתוך הצילינדרים, שינוי היחס דלק-אוויר בין הצילינדרים השונים הופך לזניח. חלוקת התערובת במנוע יכולה להיות מושפעת מתכנון כונס האוויר של המאייד ועל ידי מיקומו ביחס לרכיבים האחרים של מערכת הכוח. תכנון לקוי של כונס האוויר יכול לגרום לחלוקה לקויה (שינוי גדול ביחס התערובת בין הצילינדרים השונים) אשר יגרום לאובדן בהספק המנוע, או חימום יתר מקומי. כונס אוויר למאייד, במנוע חדש, חייב להיבדק לזרימה על מנת להבטיח שחלוקת לחצים משביעת רצון נשמרת במאייד, בתנאי תפעול שונים.

3. מגח כונס אוויר מאייד - מגח כונס האוויר למאייד מושפע בצורה ניכרת מהגורמים הבאים:

- מהירות המטוס.
- זרם האוויר של המדחף.
- זווית התקפה של המטוס.
- מאפייני תכנון התקנת המנוע.

לפיכך, ברור מאד שלכל סוג מטוס ולכל צורת תפעול (שיט, נסיעה, מהירות גבוהה וכו') יושג ערך שונה של מגח. כונס אוויר מתוכנן בקפידה, בטיסה ישירה ואופקית מהירה, ייתן ערכי מגח לפי הנוסחה האמפירית הבאה:

$$\text{מגח (מים אינטש)} = \frac{(V_{mph})^2}{2045} - 2$$

נוסחה זו מתייחסת לצפיפות אוויר סטנדרטית בגובה פני הים. ההשפעה של אובדנים בתעלת הכונס, ומהירות אוויר בכניסה למאייד, מפוצים על ידי החסרת 2. השימוש במסנן בכונס האוויר יקטין את לחץ המגח הזמין במידה רבה יותר; כלומר, הערך 2 יגדל ל- 3 או 4. לכל 12 אינטש של מים, תגרם הגדלת גובה קריטי של כ- 1,000 רגל למנועים בעלי מדחס גידוש קונבנציונאלי ביחס דחיסה של 1:2 בהספק נורמאלי.

4. טמפרטורת אוויר מאייד - טמפרטורת כניסת האוויר משפיעה על צפיפות האוויר הנכנס בסעפת היניקה. כיוון שכל תרשימי ההספק הקונבנציונאליים מתבססים על ההנחה ש"תנאים סטנדרטיים" שוררים בכניסה למאייד, יש לבצע תיקון לתרשימי ההספק למצבים שונים מ"תנאים סטנדרטיים". תיקון זה נעשה בדרך כלל על ידי השימוש בנוסחה הבאה:

$$BHP = BHP(\text{chart}) \left(\frac{(OAT)s + 460}{(CAT) + 460} \right)^{0.5}$$

כאשר -

(OAT)s הינו טמפרטורת האוויר החיצוני ל"תנאים סטנדרטיים".

(CAT) הינו טמפרטורת האוויר במאייד.

- כלל אצבע נוח לביצוע תיקון זה הינו הוספת 1% לכל 10°F (6°C) מתחת לתנאים הסטנדרטיים בתרשים הספק הבלימה, או החסרת 1% לכל 10°F (6°C) מעל התנאים הסטנדרטיים.
- נמצא, מכל מקום, שבמנועים מצוידים במדחסי גידוש קונבנציונאליים, טמפרטורת התערובת בסעפת הינה קריטריון טוב יותר לתכנון ההספק מאשר טמפרטורת אוויר מאיד.
5. **אדי מים** – תרשימי ההספק מתבססים בצורה מוחלטת על לחץ סעפת יבש. קרוב לגובה פני הים, באזור לח, אפשרי מאד לקבל טעויות של מספר אחוזים בהספק. עם העלייה לגובה, השפעת אדי המים קטנה, ובגובה 5,000 רגל נחשבת לזניחה.
6. **לחץ נגדי בצינור פליטה** – תרשימי הספק המנוע מבוססים על ההנחה שבצינור הפליטה נשמר לחץ אטמוספרי. אם הלחץ בצינור מעל הלחץ האטמוספרי, יגרם אובדן הספק. לחץ צינור הפליטה משפיע על הספק המנוע עקב העובדה שהיעילות הנפחית של הצילינדר קטנה עם הלחץ הנגדי בצינור הפליטה. ההשפעה של תכנון סעפת פליטה נתון, על הספק המנוע, קשה לחישוב, אולם ניתן לחזותו מתוך נתוני הבדיקות של מד הכוח או מד הפיתול. ההשפעה של לחץ נגדי בצינור פליטה נמוך מ – 2%.
7. **דטונציה** (ראה נושא בפרק זה).
8. **הצתה מוקדמת** (ראה נושא בפרק זה).
9. **טמפרטורת ראש צילינדר** – לשינויים בטמפרטורת ראש הצילינדר, מהערכים ששימשו לכיול המנוע, יהיו השפעות על הספק המנוע. השפעה זו נגרמת על ידי שינויים ביעילות הנפחית של הצילינדרים, עקב שינויי הצפיפות של התערובת הנכנסת לצילינדרים.
- השפעה זו בדרך כלל נחשבת כזניחה, ובמרבית ביצועי טיסות הניסוי לא מתבצע תיקון למשתנה זה.
10. **ביצועי מדחסי גידוש** – אם מנוע מתופעל בתנאים אטמוספריים בהם טמפרטורת האוויר גבוהה מהתקן, תפוקת מצערת מלאה הינה קטנה, לא רק בגלל השינוי בצפיפות האוויר במאייד, אלא גם עקב השינוי בביצועי מדחסי הגידוש. תיקוני ההספק למאפייני מדחסי הגידוש מורכבים מאד, ולא מבוצעים בדרך כלל למרבית טיסות הניסוי, כיוון שהם זניחים במרבית המקרים.
11. **הספק אביזרים** – מרבית המנועים מכילים רק עם האביזרים הנדרשים ביותר לתפעול המנוע. יש להפחית את ההספק הנקלט באביזרים כגון: גנראטורים, משאבות יניקה, משאבות הידראוליות, מאווררי קירור וכו', מגרף הספק הבלימה. יתכן בהחלט שההספק בחלק מהאביזרים יצרוך שיעור של 50 עד 75 אחוז מהספק ההמראה. יש להביא בחשבון גורם זה כשמבצעים תיקוני הספק לביצועי המטוס. בדיקות מד כוח, בתנאים מבוקרים וזהירים, נמצאו כשיטה המשביעת רצון ביותר לבדיקה ומדידה של השפעת האביזרים על ההספק לבלימה.
12. **מצב מערכת ההצתה** – מקובל להתקין מצתים חדשים לפני טיסות מבחן. למצתים בעלי מרווחים גדולים מדי, השפעה על ההספק ותצרוכת הדלק.
- כאשר מבצעים בדיקה במגנטו אחד, במערכת ההצתה הקונבנציונאלית, מומלץ שנפילת הסל"ד תהיה לפחות 20 סל"ד פחות מהמקסימום המותר, המוגדר על ידי יצרן המנוע.
13. **מצב כללי ובלאי של המנוע** – למנוע, שמשתמשים בו לצרכי טיסת בדיקה של ביצועים, חייבים להיות 20 שעות טיסה לפחות. למנועים חדשים יש לפעמים הספק חיכוך גבוה מהנורמאלי, אשר מפחית את ההספק לבלימה המועבר לציר המדחף.
- מאייד, אין להשתמש במנוע בעל למעלה מ – 600 שעות שירות לטיסות בדיקה. אובדן הספק מנוע כתוצאה מבלאי שירות יכול להגיע ל – 5%.
- שימוש במנועים משופצים לטיסות בדיקה, אלא אם מד כוח זמין, אינו נחשב משביע רצון כיוון שהשיפוץ יכול לגרום למשתנים אשר הינם קשים להערכה, כגון בוכנות בעלות מידות יתר וכו'.
- קריטריונים לנצילות** – מספר של נצילות שונות הוכרו כקריטריון לביצועי מנוע, מהם הבאים הינם בשימוש נרחב:

1. **נצילות טרמית** – הנצילות הטרמית היעילה של מנוע = תפוקה/תשומה. באם התשומה מבוטאת במונחים של צריכת דלק lb/BHP/hour, אזי היעילות הטרמית היעילה הינה:

$$= \frac{2545}{CV * \text{lb/BHP/hour}} * 100\%$$

כאשר CV = ערך קלורי נטו של דלק ב – BTU/lb.

לדלק מטוסים סטנדרטי שבו חום הבעירה (נמוך או ערך נטו) של הדלק, CV = 18,700 BTU/lb,

$$\frac{0.136}{\text{lb/BHP/hour}} * 100\% = \text{הנצילות הטרמית היעילה}$$

דוגמה: לתצרוכת דלק של 0.55 lb/BHP/hour, מקבלים נצילות טרמית יעילה של 24.7%, אשר הינה ערך כללי למנועי מטוסים מודרניים, במהירות והספק נורמאליים.

2. **נצילות נפחית** – הנצילות הנפחית מוגדרת בדרך כלל כיחס של משקל האוויר לדקה שנצרך למעשה על ידי המנוע, למשקל האוויר שיכול היה להיכלל בנפח המנוע לדקה, בתנאי לחץ וטמפרטורה הקיימים בכניסת המאייד.

בנוסף למגבלות מכאניות, כגון: שטח השסתומים, תזמון שסתומים, יחס דחיסה, מהירות המנוע ומערכת היניקה, הנצילות הנפחית תלויה בגורמים משתנים כגון: טמפרטורת מעטפת המים, טמפרטורת אוויר הקירור, גיאומטריית המנוע, החום הכמוס של התנדפות הדלק, הרכב התערובת, והחום המתקבל על ידי התערובת ממערכת היניקה.

הנצילות הנפחית של מנועים, במהירות והספק נורמאליים של המנוע, הינה בדרך כלל בסדר גודל של 80% - 85%.

3. **נצילות מכאנית** - כפי שהוזכר קודם, הנצילות המכאנית של מנוע הינה ההספק לבלימה מחולק להספק המכשיר. הקריטריונים הנ"ל לנצילות הינם בעלי חשיבות מרובה למנתחי ההספק, היות וחשיבותם להדיוטות הינה קטנה ביותר. מכל מקום, הפרט החשוב ביותר להדיוט הינו כמות הדלק שמנוע יצרך לצורך יצור כוח סוס אחד, לתקופת זמן נתונה. מאפיין זה מכונה תצרוכת דלק ספציפית (BSFC) ב - lb/BHP/hour, ואם מתבסס על הספק מכשירי, זה יכונה תצרוכת דלק ספציפית מכשירית (ISFC).

ה יכרות עם המנוע הינה בסיס להבנת התפעול הנכון של המנוע. מנקודת מבט של המתפעל, מערכת כוח טיפוסית של מטוס כוללת:

- חטיבת הכוח.
- חטיבה קדמית ואחורית של בית גל הארכובה, ביחד עם המדחף.
- מערכת הסיכה.
- מערכת הקירור.
- מערכת היניקה הכוללת את מערכות המאייד ומדחס הגידוש.
- מערכת ההצתה.

סידרה של מכשירי תא הטייס, המתוגברת בהבחנה בהתנהגות מערכת הכוח והמטוס, מאפשרים למתפעל להחליט על הצורה בה החלקים השונים של המנוע מתפקדים. סדרות מקבילות של בקורות מאפשרות לו לשלוט על התפקוד שלהם. תפעול יעיל מחייב תאום נכון של כמה תפקודים של החטיבות והמערכות השונות של מערכת הכוח, על מנת לעמוד בהתהוות התנאים המשתנים, כאשר זוכרים את סוג הביצועים הרצויים, תוך תשומת לב לבטיחות והגנת המנוע.

תכנון – בתכנון מנוע מטוס אין להתעלם מההיבט של תצורה אסטטית. צורה יפה ופרופורציות מהווים לכשעצמם מדריך מצוין לנכונות התכנון. באופן כללי, יופי ויעילות הם שמות נרדפים.

קימת אמונה מוטעית שהאמינות, ואפילו היעילות, של כל מנוע הינם פונקציה של מספר הרכיבים שהמנוע מכיל. מספר הרכיבים בברור חייב להיות מינימאלי בהתאמה לתפעול יעיל. הלהיטות להקטנת מספר הרכיבים, לעיתים קרובות, מובילה להקרבת היעילות. במנוע מטוס, הרבה רכיבים חשופים למאמצים מסובכים של חום ולחץ; ואם הם ניתנים להקטנה בנפרד, יש לעשות זאת ללא היסוס. יתר על כן, לאף רכיב אסור להיחשף למאמצים הרסניים אם, על ידי צרוף רכיבים נוספים, ניתן לחלק מאמצים אלו. טוב יעשו המתכננים באם יבינו שהפשטות אינה תכונה מיוחדת, במרבית המקרים זהו דבר חיובי.

במבנה של מנוע בעירה פנימית, האמינות של החלקים העובדים הינה בעלת חשיבות רבה. דבר זה דורש לעיתים שימוש בחומרים חזקים, ולעיתים כבדים, שיוצרים מנוע כבד ומגושם. הבעיה העיקרית בתכנון מנוע מטוס הינה לבנות את הרכיבים חזקים וקלים, ועדיין לשמר את האמינות. כל הרכיבים הנעים חייבים להיות מעובדים ומאוזנים בזירות, על מנת להפחית רעידות והתעייפות למינימום, במיוחד במנועים שפועלים במהירות גבוהה יחסית. בבניית מנועי מטוסים, כל פרט חייב להיות מעובד להשגת יחידה מתוכננת היטב, אמינה בתפעול, בעלת משקל נמוך לכוח סוס, וחסכנית יחסית בתצרוכת דלק ושמן.

רכיבים ותפקוד – כפי שהשם מרמז, חטיבת הכוח הינה החטיבה במנוע שבה מפותח הכוח, והיא הראשונה לספוג את האימפקט של העומסים המיוצרים. היא כוללת בעקף את המכלולים המתוארים בסעיפים הבאים.

1. **צילינדרים** – מנוע המטוס הינו מנוע חום, אשר מפיק את הכוח שלו משריפה של תערובת בעירה של דלק ואוויר. מטען הדלק-אוויר ניצת על ידי מצת, והחום המופק על ידי השריפה של המטען גורם להתפשטות הגזים, הנוצרים במהלך השריפה. האנרגיה החימית של הדלק והאוויר הופכת לאנרגיה מכאנית של הגזים המתפשטים. ביחד עם הבוכנות, הצילינדרים יוצרים את התא שבתוכו השריפה, יוצרת הכוח, מתקיימת, ובהם נמצא הריכוז הגדול ביותר של חום ולחץ.

הצילינדר מורכב משתי יחידות: הגליל והראש. הגליל, שבתוכו נעה הבוכנה, חייב להיות בנוי מחומר בעל חוזק גבוה, בדרך כלל פלדה או ברזל מחושלים, על מנת להפחית את המשקל למינימום. כמו כן, הוא חייב להכיל את המאפיינים המתאימים תחת טמפרטורות גבוהות, ולהיות חומר מוביל טוב. החלל המוגבל (תא השריפה) הנוצר כאשר הבוכנה במצבה העליון ביותר, מוקף בהתקן (בדרך כלל סגסוגת אלומיניום) הנקרא ראש הצילינדר. בתא השריפה, תערובת האוויר והדלק ניצתת, על ידי המצת, ונשרפת תוך כדי מהלך הבוכנה לנקודה מתה עליונה. המטען הניצת מתפשט ודוחף את הבוכנה מטה בגליל הצילינדר. הראש מכיל גם פתחים שבהם ממוקמים שסתומי היניקה והפליטה, שיתוארו בהמשך.

כל פתח שסתום מצויד באוגן בסיס שמסייע בהתקנת חיבורי סעפות היניקה והפליטה. קצה הגליל, המנוגד לראש, מצויד באוגן מרכב לצורך חיבור מכלול הצילינדר לבית גל הארכובה.

באופן בסיסי, סוג הצילינדר שתוכנן למנועי מטוס לא השתנה בצורה משמעותית במהלך השנים האחרונות, ועדיין הוא ידוע כ – I, או מטיפוס שסתום עליון. מבחינת המבנה, היו מספר רב של שיפורים, במיוחד בצילינדר המקורר אוויר.

צילינדר מקורר אוויר בנוי משני חלקים עיקריים. הוא כולל גליל מברזל יצוק עם צלעות קירור, או גליל מפלדה מחושלת עם צלעות קירור אינטגרליות, או צלעות קירור מאלומיניום, וראש צילינדר מסגסוגת אלומיניום מחושלת. הראש מוברג בכיווץ על גליל הפלדה, אשר כולל אוגן בסיס קרוב לקצהו התחתון להצמדה לבית גל הארכובה של המנוע. תא השריפה של ראש הצילינדר הינו פחות או יותר כדורי בצורתו. תכונה זו מסייעת לדיכוי הדטונציה. צלעות הקירור מפוזרות בצורה יעילה מנקודה הקרובה לתחתית גליל הפלדה עד לקצה בית נדנדי השסתומים. יצרני המנוע משפרים בתמידות את תכנון צלעות הקירור, בכדי להגדיל את שטח הצלעות הכולל, עקב הטמפרטורות הגבוהות במנועים בעלי הספק גבוה. בראש הצילינדר יש התקנה לשני מצתים, מנוגדים זה לזה. קטע קטן של גליל הצילינדר משתרע מתחת לבסיס האוגן אל תוך בית גל הארכובה, כאשר הצילינדר מורכב במקומו. דבר זה מקטין את הקוטר הכללי של המנוע מבלי להקריב את טווח מהלך הבוכנה, ומספק חיבור נוקשה מאד של האוגן. בצילינדרים מטיפוס מאוחר, המשטח הפנימי של הגליל מעובד בניטרטים להשגת דופן מזוגגת וקשה, בכדי להקטין את הבלאי.

2. **שסתומים וקפיצי השסתום** – השסתומים מבקרים את כניסת מטען הדלק-אוויר לצילינדרים, במהלך פעימת היניקה, כולאים אותו במהלך פעימות הדחיסה והעבודה, ומשחררים את הגזים השרופים במהלך פעימת הפליטה.

טיפוס השסתום שבשימוש בצילינדרים למנועי מטוסים נקרא שסתום מפולש. בדרך כלל השסתומים עשויים מטונגסטן או פלדת סילכרום, המכילים את האיכות לשמירת החוזק הנדרש בטמפרטורות גבוהות. הראש הינו החלק של השסתום הפותח וסוגר את המעברים. יש לו פנים מעוגלות אשר נחות על פני תושבת השסתום שבצילינדר, כאשר הוא במצב סגור. שכבה דקה של סטליט מצפה את פני השסתום, וגורמת להאטה בשיתוך השסתום, חריצים ועיוותים, דבר הרצוי במיוחד לשסתומי הפליטה במנועים בעלי ביצועים גבוהים. על ידי השחזת פני השסתום בזווית קטנה יותר מאשר זו של תושבת השסתום (בערך חצי עד מעלה אחת), נוצר קו מגע אשר משפר את אורך חיי השסתום. הקנה הוא אותו החלק המהווה מוביל לראש השסתום בעת פעולתו. המוביל לקנה השסתום ממוקם בראש הצילינדר. מספר קנים של שסתומי פליטה חלולים, וממולאים בתמיסת מלח, כספית או נתרן מטאלי, על מנת לסייע בהפחתת טמפרטורת הפעולה של ראש השסתום. שסתומי פליטה, במיוחד במנועים מקוררי אוויר, בנויים מראש כבד וקנה בעל קוטר גדול מאשר שסתומי היניקה, בכדי לעמוד בפני הטמפרטורות הגבוהות, שבהם השסתומים פועלים.

השסתומים נפתחים על ידי זיזים, ונסגרים על ידי קפיצים סליליים. במנועי מטוסים, שני קפיצים או יותר ממוקמים על כל שסתום. השימוש בשסתום מרובה קפיצים מגביר את בטיחות התפעול, משווה את הלחצים הצדיים על קנה השסתום, מאפשר מתח קפיץ גדול יותר בשטח מצומצם, ומונע ריטוט קפיץ השסתום. היתרון החשוב ביותר של שסתום מרובה קפיצים הינו ביטול של ריטוט קפיץ השסתום. כאשר קפיץ אחד נוטה לרעוד במהירויות הזיז של $1/2$, $1/3$, $1/4$ וכו' מתוך המחזור הטבעי שלו, הקפיץ או הקפיצים האחרים, בעלי מחזור רעידות שונה, נוטים לדכא את הרעידות. קפיצי השסתום לחוצים למצבם על גבי קנה השסתום, ומאובטחים במקומם על ידי התקן נעילה.

3. **מנגנון השסתום** – מנגנון השסתום של מנוע מורכב מחלקים המפעילים את השסתומים. מספר החלקים תלוי בסידור של הצילינדרים על גבי בית גל הארכובה, ומיקום השסתומים. במנועי מטוסים השסתומים ממוקמים בראש הצילינדר, להשגת נצילות מירבית.

במנוע רדיאלי בעל שורה אחת, מנגנון השסתום כולל צלחת זיזים, הממוקמת בדרך כלל בחטיבה הקדמית של בית גל הארכובה, ומונעת על ידי גל הארכובה בצורה לא ישירה דרך תמסורת הזיזים, מוטות דחף ונדנד. צלחת הזיזים מפעילה בדרך כלל שתי שורות, אחת מפעילה את שסתומי היניקה והשורה השנייה את שסתומי הפליטה.

במנועים רדיאליים בעלי שתי שורות, שתי צלחות זיזים מופעלות: אחת בחטיבה הקדמית, אשר בדרך כלל מפעילה שסתומים בשורת הצילינדרים הקדמיים; השנייה בחטיבה האחורית, לשורה האחורית של הצילינדרים. במספר מקרים משתמשים בצלחת זיזים בעלת שורה אחת במקום בצלחת בעלת שתי שורות. במקרים אלו, שני השסתומים נשארים פתוחים במספר מעלות שווה של תנועת גל הארכובה.

במנועי מטוסים מטיפוס V, מנגנון השסתום מורכב ממכלול גל זיזים אחד או שניים, המותקנים מעל השסתומים בראש כל צילינדר.

כאשר משתמשים בשני גלי זיזים, באחד משתמשים לשסתומי היניקה, והשני לשסתומי הפליטה. שני גלי הזיזים מופעלים בדרך כלל על ידי תמסורת אחת, אשר מונעת בצורה לא ישירה על ידי גל הארכובה. כל גל זיזים מפעיל שני שסתומים, מסוט בצורת T מתווך בין הגל ושני קני השסתומים בכדי לספק אמצעי להפעלת שני השסתומים בו זמנית.

כאשר משתמשים בגל זיזים אחד, הוא מונע ישירות על ידי גל הארכובה, דרך ציר אנכי ותמסורת קונבנציונאלית. כל זיז יניקה וזיז פליטה מפעיל שני שסתומי יניקה ופליטה, דרך סידור זרוע נדנד ייחודי.

גלי זיזים מעובדים בדרך כלל מפלדת סילכרום מחושלת. הזיזים מטופלים בחום, להשגת משטח קשה באזור המגע עם השסתום. מיסבים, מסגסוגת קלה, מחוברים לראש הצילינדר לתמיכה בגל הזיזים, ומקבלים סיכה דרך חללו הפנימי של המיסב.

4. מכלולי הבוכנה – הבוכנות מקבלות את הכוח מהגזים המתפשטים, ומעבירות אותו לטלטלים. כמו הצילינדרים, הבוכנות נתונות לחום ולחצי הבעירה, כמו כן לכוחות המוחזרים.

הבוכנה במנוע משרתת כטובלן בהכנסת מטען הדלק לתוך הצילינדר, דחיסת התערובת, העברת העבודה המופקת על ידי הבעירה לגל הארכובה, ושטיפת הגזים השרופים מתוך הצילינדר. בוכנות המנוע בנויות מסגסוגת אלומיניום קלה, אשר מפחיתה את כוחות הפעולה למינימום, ומאפשרת העברה מהירה של החום מראש הבוכנה לחלקי המנוע הסמוכים להקרנת החום החוצה. בכך מושגת טמפרטורת פעולה נמוכה יחסית של הבוכנה. טמפרטורה נמוכה של הבוכנה גורמת להעברת חום נמוכה לתערובת הנכנסת במהלך פעימת היניקה, ובכך מגדילה את הנצילות הנפחית של המנוע, ומאפשרת יחס דחיסה גבוה ללא דטונציה. הבוכנות מחושלות או יצוקות במשקל אחיד להקטנת הרעידות למינימום.

ראש הבוכנה יכול להיות שטוח, קמור או קעור. במקרים אחדים, בבוכנות שטוחות מעובדות מגרעות לשימוש במנועים בעלי דחיסה גבוהה, על מנת לאפשר לשסתומים להיפתח ללא הפרעה של הבוכנה. באשר ליעילות התפעול, אין משמעות לסוג הבוכנה שבשימוש. צידו הפנימי של ראש הבוכנה בעל צלעות, להשגת חוזק, ולאפשר העברת חום גבוה לגל הארכובה.

בראש הבוכנה יש בדרך כלל ארבעה חריצים היקפיים, בכדי לקלוט שלוש טבעות לחץ וטבעת שמן אחת. החריץ התחתון מתוך ארבעת החריצים הינו עבור טבעת השמן. בחריץ זה יש קדחים במספר מקומות על היקפו, בכדי לאפשר לעודפי השמן מדפנות הצילינדר לחזור בצורה מאולצת לבית גל הארכובה דרך הטבעת. חריץ בהיקף הבוכנה, מתחת לפין הבוכנה, מכיל טבעת ניגוב שמן, אשר עוזרת לטבעת השמן למנוע תצרוכת שמן עודפת.

דפנות הבוכנה פועלות כמשטח מוביל, או מיסב לראש הבוכנה, ומכילות את בית פין הבוכנה, אשר הינו בעל מבנה חזק (בדרך כלל בעל צלעות), בכדי לשאת את עומס פין הבוכנה.

מטרת טבעות הבוכנה היא למנוע דליפות לחץ גזים מתא השריפה, להקטין למינימום את יניקת השמן לתא השריפה, ולהעביר את החום מראש הבוכנה לדופן הצילינדר. הטבעות מותאמות לחריצי הבוכנה, אשר מחזיקות אותן כנגד דפנות הצילינדר. מרבית טבעות הבוכנה עשויות מיציקת ברזל. הן חייבות להיות מסוגלות להפעיל מספיק לחץ קפיצי כנגד דופן הצילינדר, בכדי לבצע את התפקיד שלהם במינימום חיכוך. המרווח בטבעת הבוכנה, כאשר היא מתלכדת בתוך הצילינדר, הינו אלכסוני או ריבועי. רק חלק קטן של יניקת גזים מתרחש דרך המרווח הזה, ללא תלות בצורת החתך. הטבעות הן ממורכזות ובעלות עובי אחיד.

טבעת בקרת השמן דומה במבנה לטבעת הלחץ. מספר יצרנים משתמשים בשתי טבעות דקות. הן פועלות במחזורים על צידן התחתון, בכדי לאפשר יניקה של עודפי שמן מדופן הצילינדר בזרימה חופשית אל בית גל הארכובה, דרך החורים הקדחים בחריצים. טבעת גריפת השמן, המחודדת בהיקפה החיצוני, מורכבת בצורה המאפשרת לגרוף את עודפי השמן מדופן הצילינדר במהלך הבוכנה למטה. טבעות לחץ מודרניות דומות לטבעות גריפת השמן, אולם עם שיפוע קל. תכנון זה נמצא כחיוני לצורך התאמה מהירה של הטבעת בצילינדר. טבעת זו הופכת ליעילה יותר לאורך הזמן.

פין הבוכנה, העשוי מחישול סגסוגת פלדת ניקל, מחבר את מכלול הבוכנה לטלטל. הפין חלול להקלת המשקל. הסוג שבשימוש בבוכנות מטוסים חופשי לנוע בתוך הבוכנה, וידוע כפין צף. הוא מחוזק למקומו על ידי פקקי אלומיניום או נועלים קפיציים, אשר מונעים ממנו לחרוץ את דפנות הצילינדר.

5. טלטלים – הטלטלים מעבירים את תנועת הבוכנות לגל הארכובה, שם היא הופכת לתנועה סיבובית. בצידה של הבוכנה, הטלטלים נושאים בכוחות חוזרים, ועומסי הלחץ הנובעים מהשריפה, בעוד שבצידו של גל הארכובה העומסים הצנטריפוגליים נכפים על המכלול כתוצאה מהמהירות הסיבובית של המנוע.

יחידות אלו חייבות בהכרח להיות מפלדה באיכות גבוהה, מתוכננות ובנויות כיאות. בחיבור הטלטל לבוכנה יש, בדרך כלל, תותב מסגסוגת ארד בעל מאפייני מיסב טובים. צד החיבור לגל הארכובה מפוצל בדרך כלל, בכדי לאפשר את הרכבת הטלטל. צד זה מכיל מיסב, ומחוזק למקומו בעזרת ברגים. סוג הטלטל יהיה מותנה בדרך כל שהיא בסידור הצילינדר על המנוע.

הטלטלים מסווגים בהתאם לצורתם וצורת החיבור לגל הארכובה. כמו כן הם משתנים בחתך הרוחב שלהם, חלקם צינורי וחלקם בחתך I או H. קיימים שלושה סוגים של טלטלים, המסווגים על ידי סידור המיסב על גל הארכובה, והם: הפשוט, המפרקי והמפוצל. הטלטלים עשויים בדרך כלל מפלדת כרום ניקל. הצד הקטן של הטלטל מחובר לבוכנה על ידי פין הבוכנה, והצד הגדול מחובר לגל הארכובה בעזרת פין הגל.

הסוג הפשוט של הטלטל הוא טלטל בודד בתכנון קונבנציונאלי, ולעיתים רחוקות בשימוש במנועי מטוסים בעלי הספק גבוה, עקב הצורך בגל ארכובה ארוך וכבד, דבר הגורם למנוע כבד. חיבור טלטלים מהסוג הפשוט, אחד ליד השני, נעשה בדרך כלל במנועי מטוסים מנוגדים קטנים.

בסוג הטלטל המפרקי משתמשים בצורה נרחבת במנועים רדיאליים ומנועי V, והוא בנוי מטלטל ראשי שיש לו מוט אחד קצר, או יותר, המחובר לקצה הגדול בעזרת פני חיבור. סידור זה מאפשר בניית מנועים קטנים בעלי משקל נמוך, מבלי להקריב את אמינות התפעול.

בטלטל המפוצל משתמשים גם במנועי V, והוא מכיל שני מוטות הפועלים ביחד על כל פין גל ארכובה. 6. מכלול גל הארכובה – גל הארכובה מקבל את ההספק המופק בצילינדרים מהטלטלים, ומעביר אותו דרך תמסורת למדחף, למדחס הגידוש, למנגנון השסתומים, למשאבות השמן והדלק, למגנטו, למקבע הסל"ד, לגנראטור ולאביזרים אחרים. הגל נתון לצורך של מאמצים פיתוליים וצנטריפוגאליים.

גל הארכובה חלול בדרך כלל, בכדי להפחית משקל ולספק אמצעי להעברת שמן במנוע. כיוון שגל הארכובה נתון למאמצים גבוהים, הוא חייב להיות עשוי מהחומרים הטובים ביותר, מתוכנן ככאילו ובנוי בדיוק רב. הוא בנוי מקנה או אוגן קדמי, עליו מותקן המדחף, במנועים בעלי הנעה ישירה. גל הארכובה ממוקם בעזרת מיסבי סחב רדיאליים, המאובטחים הן לבית הגל והן לגל עצמו. מיסבי הסחב עמוסים בכוחות צנטריפוגאליים, ג'ירוסקופים וכוחות סחב הנוצרים על ידי המנוע והמדחף. זרוע הגל הינו החלק שבעזרתו נשלט מהלך הבוכנה.

הקנה האחורי של גל הארכובה מספק אמצעי להניע את מדחס הגידוש, מגנטו, גנראטורים, משאבות שמן ואביזרים אחרים הדרושים לפעולתה התקינה של מערכת הכוח. מיסבים ראשיים מאפשרים את מיקום הגל בבית גל הארכובה. מנגנון הפעלת השסתומים, לפתיחה וסגירת השסתומים בכדי לאפשר אספקת תערובת טרייה ושטיפת הגזים השרופים, מונע בדרך כלל על ידי הקנה הקדמי או האחורי בעזרת תמסורת.

קיימים שלושה סוגים של גלי ארכובה והם 180° , 360° ו- 120° . כל הסוגים עשויים בדרך כלל מפלדת כרום ניקל.

א. גל ארכובה 360° הינו קונבנציונאלי לכל המנועים הרדיאליים בעלי שורה אחת. סוג זה של גל ארכובה מכיל שתי משקלות איזון, אחת על כל לחי של הגל, בכדי לנטרל רעידות כתוצאה מהפיתול. במנועים בעלי הספק גבוה, מורכב משכך דינאמי או מטוטלת נגדית על הלחי האחורית במקום משקולות האיזון. המטוטלות חופשיות לנוע בקשת מוגבלת בכיוון של משקלות האיזון. בפעולה זו למשכך הדינאמי יש יכולת להקטין את רעידות הפיתול לאפס.

ב. גל ארכובה 180° מכיל שניים או ארבעה מפרקים, כל אחד מהם, או זוג, ממוקמים על הגל במאה ושמונים מעלות זה מזה. גל ארכובה זה בשימוש במנועים רדיאליים בעלי שתי שורות, ומכיל שני מפרקי גל. שני המפרקים המרכזיים מאזנים זה את זה, לפיכך, רק שתי משקלות איזון או משככים דינאמיים נדרשים למניעת רעידות פיתול.

ג. גל ארכובה 120° שימושי למנועי V טוריים, בעלי שישה או שנים עשר צילינדרים, ומכיל שישה מפרקים. בגלי ארכובה מתקדמים יותר מדגם זה, יש משקולות איזון על כל לחי, להפחתת רעידות הפיתול.

7. מיסבים – המיסבים מחולקים לשלוש קבוצות: החלקה, גליליים וכדוריים. מטרת המיסבים הינה להקטין, ככל האפשר, חיכוך מתכתי למינימום.

מיסבי החלקה מורכבים בדרך כלל במנועים כמיסבים ראשיים של מוטות חיבור, גל זיזים וגל הנעה, עקב אמינותם ופשטותם. מיסבי החלקה מורכבים משני חלקים, חצי עליון וחצי תחתון, המחוברים באמצעות ברגים או במבנה אחד הנלחץ למקומו. מיסבים אלו בנויים בדרך כלל ממתכת אל ברזלית, כגון נחושת-עופרת, בביט, אלומיניום, ארד או כסף, או תרכובת של אל מתכתי ומתכתי. לעבודה מאומצת במהירות גבוהה, במוטות חיבור ומיסבים ראשיים, משתמשים בסגסוגות בביט או נחושת עופרת כציפוי המיסב על גבי אבץ או פלדה, לצורך השגת החוזק. לתנאי עבודה קלים במהירות נמוכה, כגון במיסבי גל זיזים או גל הינע, מספיק מיסב בביט, ארד, ברס או אלומיניום.

ניתן להשתמש במיסבים גליליים כמיסבים ראשיים במבנה של מנועים רדיאליים, אולם בסוגי מנועים אחרים משתמשים בהם רק באביזרים כגון מתנעים ומדחסי גידוש.

מיסבים גליליים מתאימים יותר לעומסים כבדים מאשר מיסבים כדוריים, עקב שטח המגע הגדול יותר שלהם, אולם במחיר של חיכוך גדול יותר. מכל מקום, מיסבים גליליים יוצרים פחות חיכוך מאשר מיסבי החלקה.

מיסבים כדוריים נמצאים בשימוש נרחב יותר במנועי מטוסים, במיוחד באביזרי מנוע כגון יחידות הצתה, גנראטורים, מתנעים ומדחסי גידוש. המיסבים הכדוריים הטבעתיים בנויים בדרך כלל מכדורי פלדה מוקשחים הפועלים בין טבעת פנימית וטבעת חיצונית, ומורכבים כך שהכדורים אינם יכולים לצאת ממקומם. למיסבים אלו פחות חיכוך מאשר למיסבים הגליליים או מיסבי החלקה. מיסבים כדוריים דורשים פחות סיכה, למרות שהמשטחים שלהם מלוטשים ונתונים לאפשרות שיתוך ואיכול, בפרט אם אינם בשימוש מתמיד. במנועי

מטוסים מיסבים אלו משמשים כמיסבי סחב. הם אינם ניתנים לוויסות, ובנוסף ליכולת עמידה במאמצי סחב, הם עמידים בצורה משמעותית בכוחות רדיאליים.

8. **אביזרי בית גל הארכובה** – בית גל הארכובה, הבנוי בדרך כלל משני חלקים, מכיל את גל הארכובה ואילו מחוברים הצילינדרים וחיבת מדחס הגידוש והחיבה הקדמית. המיסבים שלו סופגים את עומסי ייצור ההספק מהבוכנות וגל הארכובה.

הבית חייב להיות עמיד בפני נזילות שמן ובעל מערכת נשם לשחרור הלחצים המשתנים בתוכו. תא, הקרוי עוקה, מורכב לעיתים בחלקו התחתון של בית גל הארכובה, לאיסוף או שמירת השמן. בדרך כלל מורכבים על מבנה בית גל הארכובה מתלי ההרכבה של המנוע למבנה המטוס. החלק של מערכת הניקה, אשר מחלקת את תערובת אוויר ודלק לצילינדרים השונים, מחובר לאחת מחטיבות הבית.

בית גל הארכובה מהווה את הבסיס שעליו מורכב כל המנוע, כולל האביזרים השונים, כגון: מתנעים, גנראטורים, מדחסי גידוש, וכו'. עקב השוני הרחב בתכנון של מנועי מטוסים קונבנציונאליים מטיפוס רדיאלי ו – V, כל אחד מטופל בנפרד.

בית גל הארכובה של מנוע רדיאלי בנוי ממספר חלקים, או חטיבות, המחוברים ביחד בברגים ליחידה אחת. ככלל, כל חטיבה בנויה מסגסוגת אלומיניום קלה, וברוב המקרים, מחושלת. בדרך כלל, בית גל הארכובה של מנוע רדיאלי מכיל חמש חטיבות. החטיבה הקדמית, החטיבה הראשית או חטיבת הכוח, חטיבת המתלה, חטיבת מדחס הגידוש וחטיבת האביזרים. בסוגי מנועים מאוחרים יותר, החטיבה הראשית עשויה מפלדה להגדלת החוזק. חמש החטיבות מתוארות להלן:

א. החטיבה הקדמית מכילה בדרך כלל את מסוטי השסתומים והמובילים שלהם, את מיסבי הסחב של המדחף או גל הארכובה, את שסתום בקרת המדחף וקידוחי מעבר השמן לסיכת החלקים הנעים. במנוע מצויד בתמסורת, החטיבה כוללת את תמסורת ההאטה, בנוסף למנגנון הזיזים. החטיבה מספקת את הספק ההמראה לחיבורי המדחף, או רוטור ההליקופטר, ואת התושבות והתמסורות למשאבות שטיפת השמן, למגנטו המורכבים בחטיבה הקדמית, למפלגים, למקבע הסל"ד ואביזרים אחרים.

ב. החטיבה הראשית, או חטיבת הכוח, אליה מחוברים הצילינדרים, עשויה בדרך כלל מיחידה סימטרית מחושלת המחוברת בברגים בקו האמצע של הצילינדרים. בחטיבה זו ממוקמים המיסבים הראשיים של גל הארכובה, ותמסורת מנגנון הזיזים.

ג. חטיבת המתלה ממוקמת מיד לאחר החטיבה הראשית, היא מכילה את תפסי המנוע המתחברים למבנה המטוס. יחידה זו מהווה בדרך כלל את הקיר הקדמי של תא מפלג מדחס הגידוש, ונושאת את הפתחים המשיקים של צינורות הניקה המתחברים לצילינדרים.

ד. חטיבת מדחס הגידוש נושאת את צלחת המפלג של מדחס הגידוש, מאייד, משאבת דלק, מתאם תותח (במטוסי הקרב הישנים) ומשאבת יניקה. היא יכולה לשמש גם כבית התמסורות לאביזרים.

ה. חטיבת האביזרים מהווה בדרך כלל את מכסהו האחורי של בית גל הארכובה, שאליו מתחברים מרבית אביזרי המנוע, כגון: המגנטו, הגנראטור והמתנע. הספק גל הארכובה מועבר באמצעות ציר תמסורת לאביזרים, דרך בית מדחס הגידוש, לחטיבת האביזרים האחורית. סדרה של תמסורות בחטיבה זו מעבירות את ההספק להנעת משאבות לחץ שמן ושטיפה, למגנטו, אם מותקן בחטיבה זו, ואביזרים שונים אחרים, כולל משאבת דלק, משאבות יניקה והידראוליות, הגנראטור ומד סל"ד. חלקה האחורי של חטיבת האביזרים מאחסנת את משאבות לחץ שמן ושטיפה, מספקת מתלים למגנטו ולאביזרים, ומספקת חיבור למתנע, לתמסורות יחידת כוח עזר וקווי השמן.

בית גל ארכובה של מנועי V בנוי משני חלקים, עליון ותחתון. החצי העליון מהווה את הבסיס עליו מורכבים חלקי המנוע. הוא בנוי מסגסוגת אלומיניום קלה, מחושל להשגת קשיחות וחוזק. מקטע זה מכיל את המיסבים הראשיים של גל הארכובה ואת גל הארכובה, מיסבי הסחב, מוטות קישור, ובמנועים בעלי תמסורת האטה, את התמסורת. המקטע התחתון, או אגן השמן, מחובר בעזרת ברגים לחלק העליון, ומהווה תא סביב גל הארכובה ומכלול מוטות הקישור.

הגידול במספר האביזרים המחוברים למנוע הוביל לפיתוח תיבת אביזרים נפרדת. תיבת האביזרים יכולה להיות ממוקמת בצורה מתאימה קרוב למנוע, ומשמשת להנעת האביזרים הרבים שהיו מורכבים בערבוביה בחלקו האחורי של המנוע.

9. **תמסורת האטה** –

א. **הנעה ישירה** – מנועים קטנים, שפועלים בסל"ד נמוך יחסית, ואשר מצוידים במדחף בעל קוטר קטן, אינם זקוקים בדרך כלל לתמסורת האטה בין גל הארכובה והמדחף. במקרים אלו ציר המדחף הינו הארכה של גל הארכובה, והמדחף מונע ישירות במהירות המנוע.

ב. **תמסורת האטה** – מנועים גדולים דורשים מדחפים גדולים לקליטת ההספק הגדול. כאשר מהירות קצות הלהבים עוברת את מהירות הקול, מגיעים למגבלות של גודל המדחף והסל"ד. בנקודה זו נצילות הסחב של המדחף יורדת, בעוד שהאנרגיה של המנוע הופכת לרעש בלבד. על ידי התקנת תמסורת האטה בין גל הארכובה וציר המדחף, גם המנוע וגם המדחף יפעלו במהירות יעילה. טווחי תמסורת ההאטה הינם בין 4:3 ל - 3:1.

10. **מפוח פנימי או מדחס גידוש** – מפוחים פנימיים הותקנו במקור במנועים רדיאליים לפיזור תערובת דלק-אוויר בצורה אחידה לכל הצילינדרים, תהליך שעדיין מבצעים. אולם, עם הופעת הדלקים המשופרים, שיעור המהירות גדל לכזה, שהמפוחים נקראים עכשיו מדחסי גידוש.

המפוח, או מדחס הגידוש, מורכב ממאיץ העשוי סגסוגת קלה, המאוזן בצורה דינאמית וסטאטית, והמוכל בתוך בית העשוי מסגסוגת אלומיניום. הבית מכיל את מעברי מטען התערובת מהמאייד לסעפת היניקה, ומהווה חלק ממכלול בית גל הארכובה של המנוע. צלחת פיזור בעלת שבשבות, או ללא שבשבות, פועלת ביחד עם המאיץ להמרת המהירות הגבוהה של התערובת, הנגרמת עקב מהירות הסיבוב הגבוהה של המאיץ, ללחץ לקראת הכניסה לסעפת היניקה והצילינדרים. המאיץ מותקן על ציר פלדה, ומונע דרך תמסורת מתאימה על ידי גל הארכובה.

עקב המהירות הגבוהה בה פועל המאיץ, יש צורך לשלב אמצעים להקטנת המאמצים בתמסורת המאיץ כאשר המנוע מאיץ או מאיט בפתאומיות. דבר זה מושג בדרך כלל על ידי מצמד גמיש בין גל הארכובה ותמסורת המאיץ. מצמד זה משחרר את מאמצי התמסורת עקב אפקט השיכון על ידי העברת הכוח הסיבובי לתמסורת דרך קפיצים הממוקמים סביב ציר התמסורת. במספר מנועים משתמשים במצמד הפועל על לחץ שמן המנוע ליצירת השיכון. השמן מאולץ בין השבשבות המחוברות לגל הארכובה, באמצעות תמסורת מתאימה, אשר מעבירה את העומס לתמסורת של מדחס הגידוש באמצעות עיגון משקלות לתמסורת.

יחס המהירות, בו מונע המאיץ על ידי גל הארכובה, משתנה בהתאם לקוטר המאיץ ודרגת הגידוש הנדרשת. באופן כללי, מאיצים בעלי קוטר קטן מונעים ביחסים של 14:1, ומאיצים בעלי קוטר גדול בשיעורים של 10:1. המספר הראשון מציין את מהירות המאיץ והשני את מהירות המנוע.

מספר מנועים מודרניים, המשמשים לטיסה בגבהים גבוהים, מצוידים לתפעול המפוח ביחס מהירות גבוה או נמוך. הטייס יכול לשנות את יחס הסיבובים מנמוך לגבוה כאשר הוא מגיע לגובה בו נדרש גידוש נוסף לשמירת לחץ סעפת גבוה יחסי.

11 **סעפות יניקה** – סעפות וצנרת היניקה הם חלקי המנוע המפיצים את התערובת לצילינדרים השונים, ומהווים תא להתאידות הדלק ועירובו באוויר לפני היכנסם לצילינדר. התכנון ומספר הסעפות או הצנורות תלויים באופן טבעי בסוג המנוע ובמספר הצילינדרים שאליהם עליהם להתחבר.

במנועים רדיאליים, בדרך כלל צינור יניקה יחיד מחבר את חטיבת מדחס הגידוש לפתחי היניקה שבצילינדרים. הצנרת בנויה בדרך כלל מסגסוגת קלה ודקה או פח פלדה. קצה הצילינדר מעוצב בצורה מעוגלת וסימטרית, בכדי להפחית את ההתנגדות לזרימת התערובת. הקצה התחתון של צינור היניקה מוכנס לתוך פתח משיק של חטיבת המדחס, ועל ידי שימוש בטבעות גומי ואומים היא אטומה לדליפות גז. סידור זה מאפשר לצינור היניקה לזוז עם התפשטות הצילינדר או התכווצותו, וכך למנוע עיוותים.

משתמשים בסעפות להפצת התערובת במנועי V ומספר מנועים טוריים או מנוגדים. בהרבה מנועים מנוגדים קטנים יש צינור יניקה נפרד לכל צילינדר. הצנורות יוצאים מאזור החלוקה קרוב למאייד או כונס האוויר. סעפות אלו עשויות מסגסוגת אלומיניום יצוקה, ומוליכות את התערובת מהמאייד או מדחס הגידוש לצילינדרים, שם היא מתפצלת לכל פתח יניקה. בדרך כלל משתמשים בשתיים או יותר סעפות, כל אחת לקבוצה של שלושה צילינדרים. אטמים מתאימים ומחברים מוודאים אי דליפת גזים. לעיתים הסעפת עטופה, בכדי לאפשר לחומר קירור או שמן להקיף את הסעפת. בכל צורה, העברת החום מסייעת לאידוי מטען הדלק.

12 **סעפת פליטה** – תפקידה העיקרי של סעפת הפליטה הינו להוליד, עם לחץ חוזר מינימאלי, את גזי הפליטה, משקעי פחם חמים וכו', אל תוך זרם המדחף בסיכון הנמוך ביותר למטוס ולטייס. פונקציות נוספות יכולות להיות אספקת חימום למערכת היניקה ולתא הטייס במזג אוויר קר.

צנרת הפליטה הפשוטה ביותר עשויה מצינור פלדה קצר היוצא מתוך כל פתח פליטה אחורה. דבר זה מקטין את הלחץ החוזר וטמפרטורת שסתום הפליטה. החסרונות בשימוש בצינורות פליטה בודדים הם:

- יותר רעש פליטה.
- ביטול אמצעים להעברת חום למערכת היניקה ואמצעים אחרים.
- הגדלת סיכון אש.
- סכנה של קירור פתאומי של שסתומי הפליטה במהלך תמרון החלקה הצידה של המטוס.
- כשלון בהולכת גזים מסוכנים מהמטוס.

במספר מנועים רדיאליים משתמשים בסעפת פליטה מטיפוס משיקי מפלדת אל חלד. במנועי V משתמשים בשתי סעפות פליטה מפלדת אל חלד, כל אחת מחוברת לצידו האחר של המנוע. פתחים בודדים מחוברים לכל פתח פליטה בצילינדר ומוליכים את גזי הפליטה ליציאה משותפת ההולכת ומתרחבת בקוטר כלפי קצה הסעפת. במדחס גידוש המונע על ידי גזי הפליטה, שני פתחי היציאה של הסעפת מתאחדים, וגזי הפליטה מובלים דרך יציאה אחת אל נחיר מדחס הגידוש.

13 משאבות נוזל קירור – משאבות נוזל קירור למנועים מקוררי נוזל הן מטיפוס צנטריפוגאלי. משתמשים בסוג זה של משאבה, ולא במשאבת טובלנים או שבשבות, עקב הקיבולת הגדולה שלה בלחץ נמוך. המשאבה הצנטריפוגאלית עשויה מסגסוגת קלה. המאיץ מותקן עם מרווח מזערי בינו לבין הדפונה מסיבות ברורות. המשאבה מונעת על ידי גל הארכובה, דרך תמסורת מתאימה, ומאלצת את הנוזל ליציאה דרך פתח משיק בצינה.

סביב ציר המשאבה מורכב אטם למניעת נזילת הנוזל. האטם מיוצר מחומר מתאים ומכיל גרפיט להקטנת הבלאי.

קיבולת משאבת הנוזל תלויה בגודלו ובמהירות הסיבוב של המאיץ, בדרך כלל 1.25 פאונד של נוזל קירור לכו"ס לדקה הינה הקיבולת המזערית.

14 משאבות שמן ושסתומי הקלה - כל מערכות הסיכה של מנועי מטוסים דורשות משאבות שמן להפצת שמן תחת לחץ לחלקים הנעים השונים, ולשטיפת המנוע מעודפי השמן. למטרה זו משתמשים בדרך כלל במשאבה מטיפוס גלגלי שיניים. בסוג זה של משאבה, שני גלגלי שיניים מפלדה מוכלים בצינה אחת במשאבת לחץ, ובמשאבת שטיפה אחת או שתיים. כאשר משתמשים במשאבת שטיפה אחת בלבד, היא חייבת להכיל גלגלי שיניים גדולים יותר מאלה שבמשאבת הלחץ, בכדי לוודא שטיפה מלאה של השמן מבית גל הארכובה. כל משאבה, או סט של גלגלי שיניים, מורכבים בגומחה נפרדת, אולם על אותו הציר, בכדי לאפשר לציר אחד להניע את שתי המשאבות בצורה סימולטאנית. המשאבות מונעות על ידי גל הארכובה דרך תמסורת מתאימה. במנועים קטנים בעלי עוקה רטובה יש רק משאבת לחץ, כיוון שהשטיפה נוצרת על ידי זרימת השמן בכוח הכבידה אל העוקה.

לויסות לחץ השמן המופץ לחלקים הנעים השונים של המנוע, משולב שסתום הקלה בצד הפריקה של משאבת הלחץ. במקרים מסוימים, יש אפשרות להרכיב את שסתום ההקלה על יחידת משאבת הלחץ. באופן כללי, שסתום הקלה של לחץ השמן ניתן לוויסות, על ידי הגדלה או הקטנת מתח הקפיץ הפועל על השסתום. דבר זה מתבצע על ידי סיבוב בורג ויסות הקיים ביחידה, או על ידי הרכבה או הסרה של מרווחונים מתחת לקפיץ. במקרים בהם לחץ השמן נדרש להפעלת בקרת המדחף, שסתום ההקלה ממוקם בדרך כלל בקצהו של קו הלחץ. דבר זה מוודא לחץ חיובי למדחף לפני שהשסתום פועל.

במספר מנועים, יש התקנה להנעת משאבת לחץ נוספת לתפעול מערכות הידראוליות. משאבה זו דומה במבנה למשאבת לחץ השמן הקונבנציונאלית.

15 משאבות דלק – מעשית, בכל מערכות הדלק של מטוסים גדולים יש משאבת דלק מונעת ישירות או בעקיפין על ידי גל הארכובה. בהרבה מטוסים קטנים נדרשת משאבת דלק עקב כנף תחתית המונעת לחץ זרימה בכובד למאייד. בדגמים מוקדמים של מנועים הורכבו משאבות מטיפוס שני גלגלי שיניים. עקב הצפיפות הנמוכה של הדלק, ועמוד הדלק הגבוה של הקווים, אשר חייב להיות מועבר בלחץ חיובי ותכולה גבוהה למאייד, משאבת השבשבות נחשבה ליעילה יותר מאשר הסוגים האחרים באותה מהירות תפעול. משאבות הדלק מונעות בדרך כלל במהירות סיבוב גל הארכובה.

משאבת השבשבות מכילה גוף אלומיניום צילינדרי שבתוכו הוכנסה ביטנת פלדה להקטנת הבלאי. השבשבות המחליקות, השרוול ויחידת הציר, מותאמים לבטנת הפלדה בצורה אקסצנטרית, כך שבעת הסיבוב הם גורמים ליניקה בפתח היניקה שבגוף המשאבה. בקצה הציר המניע של המשאבה קיימת התקנה למניעת נזילת דלק סביב הציר על ידי בורג נעילה מתכוון ובלוטת שעם, או דסקית קפיצית שאינה דורשת חומר איטום. במקרה של נזילה, קיים חור ניקוז במשאבה, שדרכו הדלק יכול להיות מופנה החוצה.

מרבית משאבות הדלק המודרניות מכילות שסתום הקלה או שסתום עוקף. במכלול שכזה נדרשות פחות יחידות צנרת. אוגן המשאבה והתמסורת מורכבים בדרך כלל בחטיבה האחורית או בחטיבת האבזרים. במספר מנועי V, האוגן ממוקם בבית גל הארכובה. המשאבה יכולה להיות ממוקמת ישירות לאוגן או יכולה להיות ממוקמת בצורה נוחה במטוס, ולפעול על ידי ציר גמיש.

למעשה, בכל המטוסים הקטנים יש משאבת דלק פשוטה מסוג דיאפרגמה, המתוכננת בדומה לזו המורכבת במכונית. משאבות אלו מכילות דיאפרגמת אריג מצופה, הנעה תחת פעולת מנוף המופעל על ידי זיז וקפיץ, ובכך יוצרת יניקה אשר גורמת לדלק לזרום דרך המשאבה. שני שסתומים טעוני קפיץ מותקנים כשסתום כיוון אחד, על מנת ללכוד פעימות עודפות של תנועת הדלק במשאבה, ומאפשרים לו להשתחרר בלחץ הנכפה, והנוצר על ידי הקפיץ המפעיל את דיאפרגמת המשאבה. סוג זה של משאבה מוגבל ללחץ מירבי של 15 psi.

16 משאבות יניקה - עקב הגדלת השימוש במכשירי ג'ירו, אשר דורשים יניקה או תת לחץ בפעולתם, תוכננה משאבת יניקה להשגת לחצים אחידים ומתאימים.

משאבת היניקה הקובנציונאלית הינה מטיפוס שבשבות. היא מכילה גוף אלומיניום עגול שלתוכו מוכנסת ביטנת פלדה להקטנת הבלאי. השבשבות המחליקות, השרוול והציר, מותאמים לתוך הבטנה בצורה אקסצנטרית, ובצורה כזו, כאשר מסתובבים, הם יוצרים יניקה בפתח היניקה, ולחץ בצד הפליטה של גוף המשאבה. מתוך התיאור ניתן לראות שמשאבת היניקה דומה למשאבת הדלק, למעט בצורתה החיצונית. שסתום הקלה, מתכוון וטעון קפיץ, משולב בקו היניקה בין המשאבה ומכשירי הג'ירו. ניתן לווסתו בכדי לספק את תת הלחץ הנדרש ליחידות השונות. נחיר מגביל בגוף המשאבה מחובר לקו הלחץ של מערכת השמן, בכדי לקבל סיכה מתאימה.

בכדי לספק אמצעים מתאימים לפליטת השמן העודף מהמשאבה, ניתן להשתמש באחת מארבעת השיטות הבאות. במספר מקרים עודף השמן מנותב לקו יציאת הלחץ של המשאבה המופנה לאוויר החופשי. שיטה אחרת היא לנתבם למאיד. השיטה השלישית היא לנתב את קו יציאת הלחץ של המשאבה לסעפת הפליטה של המנוע, במקום שבו הלחץ נמוך מאינטש כספית אחד. בשיטה הרביעית האוויר והשמן עוברים דרך מפריד שמן שמאפשר לאוויר להיפלט החוצה לאוויר האטמוספרי, ולשמן לחזור למיכל או למנוע.

הסוגים השונים של המנועים שבשימוש, וזמינות ההנעה הנדרשת למשאבה, מחייבים תכנון של מספר אגנים וחילופי קצה. במנועים מסוג V, המשאבה מורכבת בדרך כלל על ציר ההנעה של המגנטו, שתוכן במיוחד למטרה זו. מנועים רדיאליים מאוחרים מכילים אוגן מיוחד, המותקן בבית גל הארכובה. כל סוגי משאבות השבשבות תוכננו לפעול בכל כיוון, בתנאי שקווי הכניסה והיציאה מחוברים כראוי. (עקב נדירות מערכת זו החלטתי לא לתרגם פסקה זו).

מבנה דגמי מנועים נוכחיים – למעשה, כל דגמי המנועים שפותחו על ידי יצרני מנועי המטוסים השונים, שונים במרבית הפרטים שלהם. הם נבדלים בגיאומטריה שלהם, שיטת ההתקנה, חומרים, ויסותים, תמסורות, אפיציות וכו'. כל יצרני המנועים הכינו ספרי הוראות ואחזקה המתארים את המנועים שלהם וכיצד לתחזק אותם בשדה.

סיווג ותיאור דגמי מנועים – מנועי מטוסים ניתנים לחלוקה לשני סוגים, מקוררי נזלים ומקוררי אוויר. המנועים מקוררי אוויר הינם בשימוש נרחב יותר, הם השולטים בתחום התעופה האזרחית. השימוש הנרחב בהם הושג למרות שלמנועים מקוררי נזלים יש מאפייני קווי זרימה טובים יותר והעברת חום טובה יותר. בעיות ההתקנה, והבעיות הקשורות במנועים מקוררי נזלים, הביאו לשימוש המוגבל בתעופה האזרחית. הפשטות הטבועה במנועים מקוררי אוויר, מבחינת הקירור, הינה תכונתם העיקרית, ביחד עם אפשרויות השימוש הנרחבות, במיוחד במנועים בעלי ההספק הגבוה.

כל אחד מהסוגים שלמעלה ניתן לחלוקה נוספת, בהתבסס על סידור הצילינדרים ביחס לבית גל הארכובה (ציור 10).

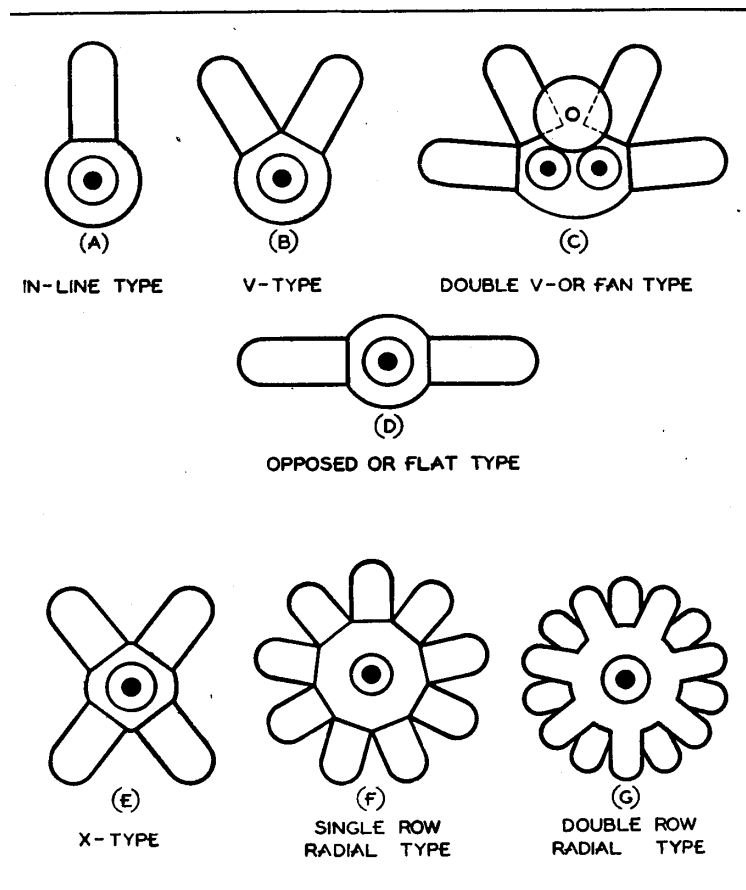


Figure 10.—Typical aircraft engine cylinder arrangement.

א. הדגמים הנרחבים ביותר של מנועים מקוררי אוויר הם רדיאליים (שורה יחידה או כפולה), מנוגדים, או טוריים.

ב. הדגמים הנרחבים ביותר של מנועים מקוררי נוזלים הם V, טוריים, מנוגדים, X ו-V כפול. מנועים אלו, שפותחו לשימוש צבאי מתוארים להלן:

מנועים טוריים - הצילינדרים של המנועים הטוריים מסודרים בשורה אחת על בית גל הארכובה, הן למעלה או במצב הפוך. למרות שסוג זה אינו מתאים לשימוש כאשר נדרש הספק גבוה, זהו תכנון משביע רצון בהחלט למטוסים בעלי ביצועים נמוכים. למעשה, כל המנועים הטוריים המודרניים (לפני 60 שנה) הם מסוג צילינדרים הפוכים. שיטה זו הינה בעלת יתרון מנקודת מבט של קווי זרימה וראות. מיקומו הגבוה של ציר המדחף במנוע ההפוך מאפשר תכנון כן נסע נמוך עקב המרווח הגבוה של מדחף מהקרקע. המספר המירבי של הצילינדרים במנועים הטוריים הינו בדרך כלל מוגבל לשישה, על מנת לאפשר קירור ומניעת יחס משקל-הספק אסור.

מנועים מטיפוס V - הצילינדרים של מנועים מטיפוס V מסודרים על בית גל הארכובה בשתי שורות משופעות היוצרות V. שתי השורות המשופעות מנוגדות זו לזו, דבר המאפשר שני מערכים של טלטלים להפעלה על אותו ציר הטלטל. סידור זה מקטין בצורה ניכרת את יחס המשקל לכוח סוס בהשוואה למנוע המנוגד עם הקרבה קטנה מאד בהתנגדות המטוס.

מנועים מסוג V כפול או דמויי מאוורר - בניסיון להגדיל את מגבלת ההספק הזמין ליחידת משקל, פותח מנוע מסוג V כפול מקורר נוזל, אשר מורכב מארבע שורות של צילינדרים המסודרים בצורת מאוורר. היתרון העיקרי במנוע שכזה הינו בזה שהוא מספק למעשה הספק דומה לשני מנועים בודדים מסוג V, מבלי להגדיל את שטח הפנים הנדרש למנוע מסוג V בודד. המנוע מצויד בשני גלי ארכובה המניעים את המדחף.

מנועים מסוג X - במנועים מסוג X, שתי שורות צילינדרים מתוך הארבע מסודרות בצורה מנוגדת ובמרווח שווה לשתיים האחרות, בצורת האות X. סידור זה מאפשר את השימוש בגל ארכובה אחד בלבד, בניגוד לשני גלי ארכובה במנוע מסוג V כפול.

מנוע מסוג מנוגד או שטוח - במנוע מסוג מנוגד, שורות הצילינדרים מסודרות בצורה אופקית, בשתי שורות, בשני צדדים מנוגדים לבית גל הארכובה. גל ארכובה בודד מתכנון קונבנציונאלי משמש את המנוע, והמנוע יכול

להיות מורכב מכל מספר שווה של צילינדרים. עקב הצורה השטוחה של המנוע, הוא מתאים במיוחד לזרימת אוויר נקייה, ומאפשר הרכבתו על הכנף. למנועים מסוג זה יש עוקות יבשות או רטובות. מנוע רדיאלי – במנוע רדיאלי בעל שורה אחת, הצילינדרים מסודרים בצורה רדיאלית סביב ציר גל הארכובה בכל מספר בלתי זוגי של צילינדרים, בדרך כלל בין שלושה לתשעה צילינדרים. הצילינדרים מסודרים בצורה שווה בתבנית מעגלית. למנוע גל ארכובה אחד של 360° שאליו מחוברים כל הטלטלים, וכתוצאה מכך קטן מספר החלקים הנעים, ויש חסכון במשקל.

המנוע הרדיאלי בעל שתי שורות דומה בהרכבו למנועים בעלי שורה בודדת וגל ארכובה יחיד. המספר הרגיל של צילינדרים הוא 14 או 18, שזה למעשה שתי שורות של 7 או 9 צילינדרים. למנוע שני גלי ארכובה של 180° בכדי לאפשר לצילינדרים של כל שורה להיות מדורגים לסירוגין על גל הארכובה המשותף. סידור זה מאפשר לצילינדרים בשתי השורות לקבל מספיק אוויר קירור. אפשרי כל סידור רב שורות של מנוע רדיאלי, ולמעשה פותחו מנועים רדיאליים בעלי ארבע שורות ועשרים ושמונה צילינדרים.

(הערת המתרגם: חיל האוויר הישראלי הפעיל עד שנות השבעים מספר מטוסי סטרוקורזר בעלי ארבעה מנועים רדיאליים, בכל מנוע 28 צילינדרים בארבע שורות).

ספרור צילינדרים – ספרור הצילינדרים אינו תהליך סטנדרטי. מספר יצרנים מספרים את המנועים שלהם מהקצה הקדמי, ואחרים מהקצה האחורי. צילינדרים של מנועים טוריים ומסוג V מסופרים בדרך כלל מהצד הנגדי למדחף. מנועים רדיאליים מסופרים בדרך כלל בניגוד לכיוון השעון במבט מציר המדחף ומספר 1 הינו העליון.

סדר הצתה – סדר ההצתה במנוע בעירה פנימית תלוי בסוג המנוע ובתכנונו. הגורמים הבאים הם החשובים ביותר לשליטה על סדר ההצתה:

1. גורמים ראשוניים:

- a. מספר הצילינדרים
 - b. סידור הצילינדרים על גל הארכובה
 - c. כיוון סיבוב גל הארכובה
 - d. סוג גל הארכובה
2. גורמים משניים:

- a. סוג וסידור של מנגנון הזיזים
- b. תכנון מערכת היניקה
- c. הרצון להקטין את המאמצים המושג דרך תהליך הצתה לוגי

סדרי ההצתה הבאים נהוגים במנועים קונבנציונאליים:

1. מנוע טורי – למנועים טוריים בעלי ששה צילינדרים יש בדרך כלל סדר ההצתה של 1-5-3-6-2-4. סדר ההצתה של מנוע טורי בעל ארבעה צילינדרים יכול להיות 1-3-4-2 או 1-2-4-3.
2. מנוע מסוג V – סדר הצתה המקובל למנוע V-12 שבו גל הארכובה מסתובב כנגד כיוון השעון, הינו 1L-6R-5L-2R-3L-4R-1R-2L-5R-4L-3R. מנוע זהה שבו גל הארכובה מסתובב עם כיוון השעון יקבל סדר הצתה 1L-2R-5L-4R-3L-1R-6L-5R-2L-3R-4L-6R.
3. מנוע מנוגד – במנוע בעל ששה צילינדרים מנוגדים סדר ההצתה יהיה 1-4-5-2-3-6. למנוע בעל ארבעה צילינדרים סדר ההצתה יהיה 1-4-2-3 או 1-3-2-4.

(הערת המתרגם: הספר מתאר לעיפה את כל סדרי ההצתה האפשריים בכל סוגי המנועים. נראה לי מיותר לתרגום.

המתעניין יוכל למצוא את רצונו בספר המקור עמוד 62)

ו. מנגנון הפעלת השסתומים ותזמון

שיטה – הבקרה והתזמון של כניסת ויציאת גזי הצילינדר במנועים תעופתיים דורשים שיקול זהיר מאד, כיוון שהם גורמים בעלי השפעה על ביצועי המנוע. הדרישה הראשונה לשסתומים והמנגנון הינה שהמנוע ינשום חופשי, כך שיושג מירב ההספק. באופן כללי, ישנן שלוש שיטות לבקרה ותזמון כניסת ויציאת גזי הצילינדר במנועים תעופתיים: (1) פתחים (בשימוש במנועים בעלי שתי פעימות), (2) מנגנון השרוול, ו – (3) ססתומים מפולשים (בשימוש במרבית מנועי המטוסים).

1. פתחים – שיטת הפתחים הינה בשימוש במנועים בעלי שתי פעימות, כגון מנועי סירות ומנועי דיזל.
2. שסתומי שרוול – שסתום השרוול, כפי שהוא מוכר בדרך כלל, ושהיה בשימוש בעבר במספר מנועי רכב, מורכב משני שרוולים גליליים הפועלים בין הבוכנה ודופן הצילינדר. תנועת השרוולים הייתה מקבילה לבוכנה והופעלה על ידי מוט קישור קצר, שנע באמצעות גל אקסצנטרי הממוקם על ציר מיוחד. ציר זה הונע בחצי מהירות גל הארכובה על ידי שרשרת, שמוקמה בקצהו האחד של הגל. תנועת הגומלין של השרוולים יצרה כוח בלתי רצוי, אשר גרם למגבלות מכאניות במהירות המנוע. קשיים בשימון, והיווצרות פחם סביב הפתחים, היו גם הם בעיה רצינית.
3. שסתומים מפולשים – כיוון שהשסתום המפולש הוא הסוג השולט בשימוש הכללי, התיאור שלהלן יתייחס אליו. במהלך התפעול, שסתומים מפולשים חייבים לעמוד בתנאים הבאים:
 - a. טווח טמפרטורות בעירה של 3000° פרנהייט ומעלה.
 - b. טמפרטורת פליטה בסדר גודל של 1500° פרנהייט.
 - c. לחץ של למעלה מ- PSI 1000 ללא דליפות.
 - d. הכאה מהירה של פני השסתום כנגד התושבת.
 - e. בלאי כתוצאה מחיכוך במובילי השסתום.
 - f. שיתוך או חמצון על ידי מרכיבי הגזים שבתערובת או תוצרי הבעירה.בכדי לעמוד בדרישות אלו, על השסתום להיות בעל:
 - a. חוזק גבוה בעבודה בטמפרטורות גבוהות בצורה חריגה.
 - b. התנגדות מירבית לעיוות או פיתול.
 - c. קושי מתאים, והתנגדות לעזזועים, למניעת בלאי מהיר.
 - d. התנגדות לשיתוך וחמצון.
 - e. ללא נטייה להתקשות בתנאי קירור מהירים.דרישות אלו קשות להשגה, וחלקן סותרות.
- לפיכך, רק מספר חומרים מספקים לחלוטין, ושסתומים, במיוחד שסתומי פליטה, היוו במשך תקופה ארוכה מגבלה להגדלת ביצועי המנוע. מכל מקום, התקדמות הדרגתית בתכנון פריטים, בחלקה ביחס לקירור יעיל יותר, והתפתחות בפלדות מיוחדות, הקטינו את המגבלות.

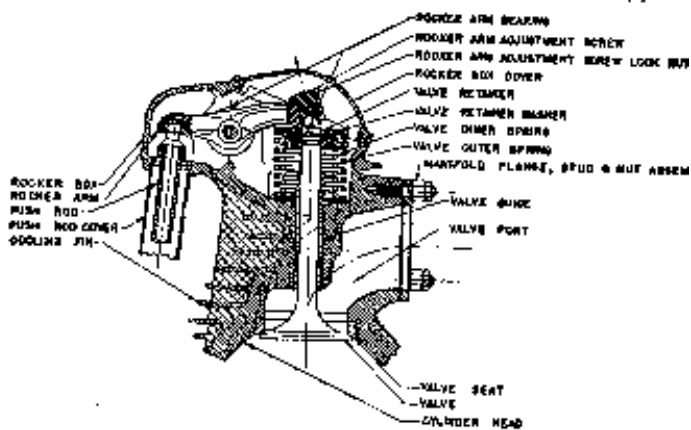


Figure 11.—Sketch of poppet-valve assembly (in-head type).

ציור 11 המופשט, מתאר את השסתום המפולש והמנגנון שלו. יש לציין שהמנגנון מאפשר את פתיחת השסתום, הקפיצים הם שסוגרים אותו. במספר מקרים הקפיצים שולטים גם בסיבוב השסתום, במגמה ליצר

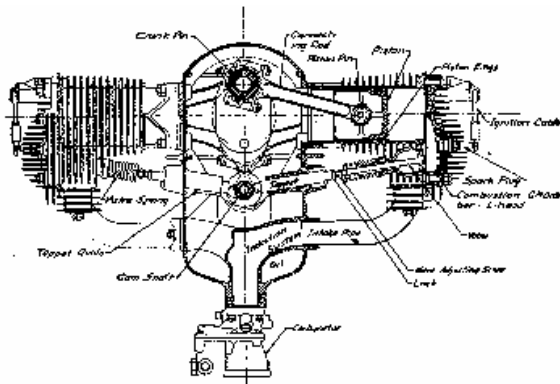


Figure 12.—Typical L-head valve mechanism arrangement, four-cylinder opposed-type aircraft engine.

בלאי אחיד של פני השסתום והתושבת. דבר זה יוצר, כמו כן, פעולת שחיקה עצמית, בכוונה להסיר את משקעי הפחם והעופרת מפני השטח.

הנחשול, או תנועת קפיצי השסתום, חייבים להיות בתוך מגבלות מסוימות, כיוון שתדירות בלתי מתאימה עלולה לגרום לשבר קפיץ השסתום או השסתום.

בהתקנות קודמות של שסתום מפולש, סיכת השסתום והמוביל לא הייתה חיובית, ובדרך כלל סיכה מספקת הייתה תלויה באדים שנוצרו על ידי חמום השמן בבית גל הארכובה או תא השסתום.

עם הופעת מנועים בעלי מהירות סיבוב גבוהה, תוכננו אמצעים שונים לאספקת שמן בלחץ לתא השסתום.

עקב כמות החום הקיצוני הגבוהה, חייבים לקבל זרימת שמן אחידה לסיוע בקירור, כמו גם בהקטנת החיכוך. נטען שזה סייע מבחינה חומרית בהארכת חיי השסתומים והמובילים.

מנגנוני פעולה (שסתום מפולש) – בהמשך לדיון בבעיות הקשורות לגורמי התפעול של השסתום המפולש, חיוני מאד לפנות לציור 12. ציור זה מתאר את מנגנון השסתום, ואת שיטת ההינע הנהוגה במנוע מנוגד. יש לבחון מקרוב את השיטה לפתיחת השסתומים באמצעות זיזים הקיימים על גל הזיזים, וההינע שלהם. חשוב לשים לב שיש שם זיז בודד לכל שסתום, ושגלגל השיניים של גל הזיזים הינו כפול מגלגל השיניים של גל הארכובה המניע אותו. גל הזיזים פועל בחצי מהירות הסיבוב מזה של גל הארכובה, כל הזמן. בדיון על עקרונות הפעולה של מנוע ארבע פעימות, הוצג שבכל צילינדר שסתום היניקה והפליטה נפתחים ונסגרים פעם בשני סיבובים של גל הארכובה.

עקב הפעימה הנדרשת להשלמת טעינה ופריקה של הגזים בצילינדר, אין זה אפשרי להפעיל את מנגנון השסתום במהירות גל הארכובה. לפיכך, חשוב לזכור שאם משתמשים בזיז אחד לכל שסתום, גל הזיזים יפעל בחצי מהירות גל הארכובה. דבר זה מתייחס למרבית המנועים הטוריים והמנוגדים.

בסידור צילינדרים רדיאלי סביב גל הארכובה, השסתומים מופעלים בדרך כלל באמצעות טבעת או תוף זיזים, אשר יש להם מספר זיזים על פני המשטח.

ניתן להרכיב את טבעת הזיזים על מדף במבנה גל הארכובה, או על שרוול בעל מיסב טבורי מתאים. נטען שיש יתרון בתמיכת טבעת הזיזים על מדף, כיוון שהיא קשיחה יותר, ונתונה פחות לעיוותים או כיפוף, שעלולים לשנות את תזמון השסתום. הזיז, שעליו נוגע מוט השסתום, נמצא על היקף הטבעת. הטבעות עשויות להכיל שורה או שתיים, מותנה בדרך כלל במיקום מוטות השסתומים. הזיזים דומים בהיקפם ובצורתם במרבית המנועים המודרניים.

בדגמים מוקדמים יותר, לזיזים המפעילים את שסתומי הפליטה יש קודקוד ארוך יותר, במטרה להחזיק את שסתום הפליטה פתוח למשך זמן ארוך יותר, שיאפשר שטיפה מוחלטת של הגזים השרופים.

מטרת השיפוע בכל צד של מוט השסתום הינה לקזז את המרווח במכלול מוט הדחף, ולהקטין את העומס, אשר אחרת עלול להיווצר. המרווח נוצר על ידי התפשטות צילינדר מקורר אוויר עקב הטמפרטורה הגבוהה במהלך תפעולו. מתוך הידוע, ברור שכאשר המנוע מתחמם, הצילינדרים אינם מתארכים דיים, תזמון השסתום ישתנה מאד מהמומלץ. זו אחת הסיבות לצורך לחמם את המנוע ביסודיות לפני ההמראה.

יש להביא מצב זה בחשבון, כיוון שהנדנד ומכלול השסתום מהווים חלק מראש הצילינדר. כאשר צילינדר של מנוע רדיאלי מתחמם, לטמפרטורה של 425° פרנהייט בערך, מכלול הצילינדר יתפשט לאורכו. דבר זה יזיז את תיבת הנדנד הרחק מבית גל הארכובה. מוט הדחף, כמובן, יגדל באורכו במעט, לפיכך מרווח (שנקרא מרווח התזמון) יישאר בין מוט הדחף ובורג הויסות של זרוע הנדנד. מרווח זה מוחלט בדרך כלל במהלך בדיקות היצרנים, ומפורט בספר האחזקה לצורך ויסות תזמון השסתומים בשדה.

במנועים רבים יש התקן למעבר שמן, המוביל מבית גל הארכובה דרך מוטות הדחף לנדנדים, ומאפשר התקוות השמן בבית הנדנד, אשר אטום לנזילות. במקרים מסוימים, השמן תחת לחץ ממערכת הסיכה של המנוע, מדוד בצורה כזו, שיחליף את הכמות שבשימוש במהלך הפעולה. במספר מנועים מנוגדים, השמן נשאב לבית הנדנד דרך מרווח במובילי מוטות הדחף. בסוג אחד של מנוע רדיאלי, השמן העודף מנוקז מבתי הנדנדים בצילינדרים העליונים דרך מובילי מוטות הדחף, בעוד שבתי הנדנדים התחתונים מחוברים על ידי צינור ניקוז, המחובר לעוקה שממוקמת בתחתית בית גל הארכובה. מתוך האמור לעיל ניתן לראות שקיימות מספר אפשרויות לשימוש בלחץ של מנגנון השסתום בראש הצילינדר. כולם פועלים בצורה משביעת רצון.

כפי שצוין למעלה, היתרונות העיקריים הינם שיפור בקירור, והפחתת הבלאי בקטע של המכלול, אשר הגדיל בצורה ניכרת את אורך החיים של השסתום והמוביל.

במספר מנועים מנוגדים, שולב פיתוח של פיצוי אוטומטי לשינויים במנגנון גל הזיזים, הנקרא מרים הידראולי "מרווח אפס" (ציור 14).

שמן בלחץ ממערכת הסיכה של

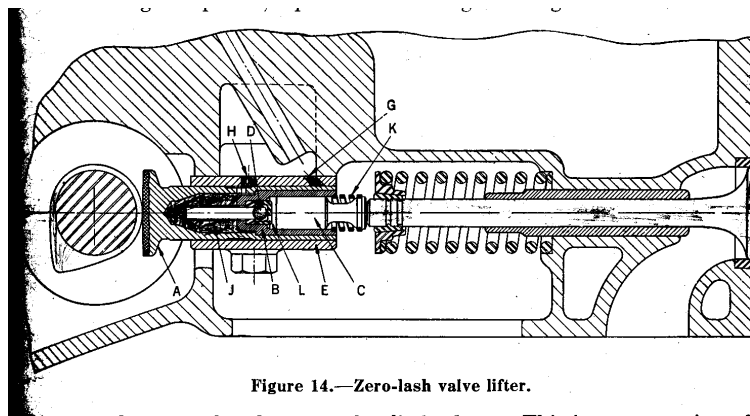


Figure 14.—Zero-lash valve lifter.

המנוע מסופק למאגר מאחורי זיז ההרמה (E). האוויר הלכוד משתחרר דרך חריר (G) לתוך חלקו העליון של בית גל הארכובה, בעוד שהשמן עצמו זורם תחת לחץ דרך חריר (H) לתא האספקה (J). פני המרים על הזיז והשסתום ממוקם כפי שמתואר בציור 14, הקפיץ הזעיר (K) מרים את הטובלן ההידראולי (C) כך שקצהו נוגע בקנה השסתום, ומבטל את המרווח, וכך נוצר "מרווח אפס". כאשר טובלן (C) זז לכיוון חיצוני, הוא מגדיל את נפח תא הלחץ (L), שסתום כיוון אחד כדורי זז ממקומו והתא (L) מתמלא בשמן מתא האספקה (J).

כאשר גל הזיזים מסתובב, הזיז דוחף את גוף המרים (A) למעלה, בניסיון להקטין את נפח התא (L), ולאליץ את השסתום כיוון אחד הכדורי לתושבתו. סיבוב נוסף של גל הזיזים מזיז את גוף המרים (A) למעלה, והשמן בתא (L) פועל כחלק ממנגנון הפעלת השסתום, השסתום מתרומם על עמוד של שמן. כל עוד השסתום אינו בתושבתו, העומס נספג על ידי עמוד שמן זה. במהלך פרק זמן זה, נזילה של כמות קטנה וידועה מראש של שמן מתא (L) מתרחשת בין הטובלן לקדח הצילינדר. דבר זה חיוני על מנת למנוע רווח, כך שכמות השמן הנדרשת למלא את התא לשמירת ויסות מרווח אפס, במהלך המחזור הבא, תורשה להיכנס לתא (L) כאשר גוף המוט עוזב את הזיז ונוגע בבסיסו העגול. היתרונות לנאמר למעלה הן:

א. הגדלת אורך החיים של מנגנון השסתום, עקב מניעת מרווח הנוצר על ידי הבלאי או שינויים בטמפרטורת הפעולה.

ב. תזמון מדויק יותר, עקב העובדה שמנגנון השסתום עוקב אחרי פני הזיז בכל הזמנים.

ג. הגדלת תפוקת המנוע לאורך תקופה ארוכה יותר של זמן, עקב ביטול אוטומטי של בלאי במנגנון.

ד. חופש מבדיקות מרווחים, או ויסות המוטות, כחלק ממהלך השירות.

דוגמת תהליכי תזמון שסתומים – לאחר שמנוע פורק למטרת שיפוץ או החלפת רכיבים, יש בדרך כלל לתזמן מחדש את השסתומים וההצתה, במהלך ההרכבה או אחריה.

במקרה של מנועים מנוגדים, היצרן מגדיר בדרך כלל מצב מסוים בו הבוכנה צריכה להיות ממוקמת, כאשר השן המסומנת על גלגלי השניים של גל הזיזים וגל הארכובה מתאימים כנדרש.

במנוע זה, הבוכנה צריכה להיות ממוקמת מעל הנקודה המתה העליונה, כאשר השן המסומנת על גלגלי השניים מותקנת במקומה הנאות.

מנועים טוריים עשויים להיות מצוידים במנגנוני נדנדים נפרדים לשסתומי היניקה והפליטה בכל אחד מהצילינדרים, בדומה לאלו שבשימוש במנוע רדיאלי. אמצעי נוסף לתפעול השסתומים על מנועים טוריים הוא גל זיזים מוארך למלוא אורך שורת הצילינדרים.

במנוע רדיאלי, המצויד במדחף בעל תמסורת מהירות, הממוקמת לפני מנגנון הזיזים, התזמון נקבע בדרך כלל על ידי סימון השן בגלגלי השניים השונים. שפת אחד מגלגלי השניים של תמסורת המהירות מסומן בדרך כלל לציון תזמון השסתום הרצוי ביחס לסיבוב גל הארכובה. במקרה של תזמון קבוע, נדרש בדרך כלל למקם את הבוכנה בנקודה מתה עליונה של אחד מהצילינדרים, בעוד השן המסומנת מותאמת.

נחיתת אונס עקב שינוי בתזמון ההצתה או השסתום, או כשלון של חלק פנימי במנוע, עלול לקרות כאשר הוויסות אינו מתבצע על ידי טכנאי מיומן.

הרבה מתהליכי התזמון במנועים מודרניים כוללים מפרטים למרווחי נדנדים במצב קר וחם. מרווח חם מפורט למטרות תזמון מנוע במהלך ההרכבה או לאחריה. זהו המרווח המשוער בין הנדנד וקנה השסתום, או מוט הדחף, כאשר המנוע פועל. לאחר סיום פעולת התזמון, זרוע הנדנד בכל הצילינדרים יווסתו למצב קר או למצב בדיקה. לפיכך, כאשר המנוע מורכב ומחומם לפני ההמראה, מרווח הנדנד ותזמון השסתום אמורים להיות כפי שהוגדר על ידי היצרן.

המרווח הקר נבדק במהלך הביקורת התקופתית של המנוע, בכדי להחליט באם נוצר בלאי בלתי נורמאלי במנגנון השסתום, ושיתוך או מכות בפני השסתום והתושבת שלו. המפרט הבא, ונתוני התזמון, הם של מנוע רדיאלי מקורר אוויר. הם מוצגים כדוגמה בלבד לתזמון שסתום, וכך יש להתייחס אליהם. כאשר נדרש תזמון אמיתי של מנוע, המפרט יכול להימצא על תווית הממוקמת על המנוע, או מספר המנוע המסופק על ידי היצרן.

מפרט תזמון

מרווח חם 0.060"
מרווח קר או מרווח בדיקה 0.010"
פתיחת שסתום יניקה 10° לפני נקודה מתה עליונה, חפית שסתום 40°
סגירת שסתום פליטה 30° אחרי נקודה מתה עליונה, חפית שסתום 40°
סגירת שסתום יניקה 60° אחרי נקודה מתה תחתונה
פתיחת שסתום פליטה 75° אחרי נקודה מתה תחתונה

הערות המתרגם: המשך הפרק עוסק בתהליך התזמון. לא מצאתי לנכון להביא בפני הקורא את התהליכים הטכניים המפורטים. המעוניין ימצא את התהליכים בספר.

מחשבות רלוונטיות למנגנוני השסתום – הפריטים הבאים רלוונטיים לתכנון, תפעול ותקלות של מערכות השסתום במנועים קונבנציונאליים נוכחיים:

1. שסתומי מנועים רדיאליים מקוררי אוויר מראים שיעור פסילה גבוה יותר משסתומים במנועים טוריים. זוהי כנראה התוצאה מגורם המרווח, למרות הסיכה. גם הגדלת תפוקת ההספק במנועים, גרמה לתנאי עבודה חמורים יותר של השסתום. מרווח השסתום הינו תוצאה של הרבה גורמים, בעיקר התפשטות ועיוותים.
2. מהירות גבוהה הינה הדרך הטובה ביותר להגדלת ההספק, אולם תמסורת מוט הדחף, במרבית המנועים הרדיאליים מקוררי אוויר, מציבות את אחת ממגבלות המהירות החמורות, עקב המסה של השסתומים, קפיצים, דסקיות, נדנדים וכו'. אלה חייבים להיות בתאוצה והאטה בזמן כה קצר, שהכוחות על התמסורת הם עצומים.
3. אין דבר יותר חשוב להצלחת תפעול מנוע מודרני בעל מהירות גבוהה, ולחיי מנוע ארוכים בין השיפוצים, כמו תכנון נכון של קפיץ השסתום. אין שום פיצוי לתכנון לקוי. כולנו חושבים על שסתומים הנעים מעלה ומטה בצורה מסודרת, כשהם עוקבים אחרי תבנית הזיז, וחוזרים לתושבתם בצורה שקטה. אולם זה נדיר מאד, כיוון שהקפיץ אינו תמיד במגע נכון, וגורם לסיבוב השסתום בעת המגע עם התושבת שלו. רעידות הקפיץ, לפיכך, יכולים לגרום לבלאי יתר של תושבת השסתום. לא חשוב עד כמה קו המתאר של הזיז תוכנן בקפידה בכדי לגרום לשסתום לשבת במקומו בעדינות, כוחות חזקים מופעלים בזמן הפתיחה והסגירה בשיעור של עשרים או יותר פעמים בשנייה. אם מרווח המוביל גדול, או קיים עיוות, כוחות אלו יפגעו בנקודה אחת של פני השסתום והתושבת, ויגרמו לפעולה לקויה לפני שהשסתום יושב במקומו. כאשר משתמשים במוטות דחיפה, אורך החיים של המנגנון יכול להתארך על ידי אימוץ המרים ההידראולי. לפיכך, במנועים שכאלה, יש לתת תשומת לב למוטת המרווח של המנגנון ההידראולי או המפצה.
4. עוצרים (retainers) חייבים להיות מחוזקים למקומם עד כמה שניתן, ויש לשים לב לגימור המשטחים שלהם. לציפוי יש ערך מסוים, אולם הוא בשום אופן אינו התרופה היחידה. יתכן ושימוש בעוצרים מחומרים שונים יהיה בעל עזר רב יותר. אולם, מיומנות אישית ואופן ביצוע עבודה גבוהים חיוניים תמיד בכדי למנוע תוצאות מפחידות. חריצי העוצרים מתחילים להתבלות כתוצאה משחיקה, ולפעמים זה רק עניין של זמן לפני שהם ישברו, כאשר מתרחשת שחיקה רצינית. נראה שחלק מהעוצרים דקים מדי, ולכן מאבדים את תכונת התפיסה, שהיא תכונה נדרשת. לתושבת המעצור חייב להיות מספיק שטח בבסיס החריץ, בכדי לעמוד בלחץ הקפיץ במהלך הסגירה, ובפני הלחץ של כוחות הפתיחה. כמו כן, היא חייבת להתנגד לעומסים הנוצרים על ידי המגרעת או הסרת נועלי העוצרים ומאמצי כפיפה, הנוצרים מזרועות הנדנד או קפיצי הדריכה. אם ניתן, יש להימנע מקצוות חדים.
5. ככל שהקפיץ יהיה מסיבי יותר, כך יושב השסתום בתושבתו טוב יותר, אולם תתכן נטייה שלו להכות בתושבת, דבר שיש להימנע ממנו. סיבוב השסתום יגרום לישיבה טובה יותר, כיוון שבכול פעם שהוא מתיישב במקומו, ההתאמה משתפרת, והנטייה לישיבה במצב אחד מופחתת. הקפיצים חייבים להיות תקינים בכדי לאפשר לקנה לעקוב אחרי הזיז בכל המצבים. תופעת אי האיזון של סוגי שסתומים בעלי

- קצוות מרובעים יכולה להיות כה גדולה, עד שלפעמים (א) נוצרת עייפות של חתך הקנה, ו - (ב) נוצרים לחצים צדיים על הקנה, הגורמים לבלאי לקנה ולתושבת.
6. היתקעות שסתומים יכולה להימנע על ידי יצירת מספיק מתח של קפיץ השסתום, שיסיר את המשקעים על קנה השסתום, במיוחד קנה של שסתום הפליטה. זרימת שמן לתוך פתחי היניקה והפליטה יכולה להימנע על ידי תכנון נכון של הקצה העליון של המובילים.
7. קנה השסתום חייב להיות בעל קוטר מספיק גדול, בכדי להוביל חום במהירות. הקנה חייב להיות בעל חוזק מספיק לתפעול בטמפרטורות הפעולה, בכדי לעמוד בעומסים חוזרים הנגרמים על ידי המהירות הגבוהה של פתיחה וסגירת השסתום. כמו כן, הוא חייב לעמוד בעומסים הנגרמים על ידי אי התאמה של קנה השסתום והתושבת, הן בייצור, או עקב תנאים שנגרמו על ידי תנועה יחסית של תושבת הצילינדר ומובילי השסתום, או על ידי לחץ צדי מהקפיצים. מאפיין חשוב בתכנון השסתום הוא קצהו, אשר חייב להיות בעל שטח מספיק, בכדי לעמוד בפעולת המנגנון מבלי להתבלות, להיחבל או לקבל ראש פטרייה.
8. נחשולים, משמעותם שהקפיצים נכנסים לתהודה, ורועדים בחופשיות במחזוריים הטבעיים שלהם, במהירויות מסוימות בטווח הפעולה שלהם. ניתן לזהות חלקים רועדים בצורה ויזואלית על ידי הסלסול שלהם, ובצורה קולית על ידי טון הפעולה שלהם. לא ניתן להעריך בצורה מעשית את המשרעת של הנחשול על ידי האמצעים המתוארים למעלה, או להחליט מה קורה כאשר הקפיץ אינו רועד. אין ספק שהחלקים התחתונים של הקפיצים מועמסים יותר, כיוון שהם פועלים בתדירות גבוהה יותר. יש לחשב את הפעלת הכוח של הקפיץ שתהיה שווה לתאוצה השלילית, בתוספת החיכוך של המנגנון במהירות המירבית. נחשול קפיץ גורם בדרך כלל לתוצאה של מאמץ יתר לקפיץ, ושבר התעייפות בעקבותיו, יתכן על ידי שבר בחלקים אחרים.
9. פעילות לקויה של מנגנון השסתום גורם ל - (א) אובדן הספק, (ב) שבר חלקים, ו - (ג) רעש.
10. קפיצות השסתום ישפיעו על ההספק במספר דרכים: (א) סגירה מאוחרת, או אפילו פתיחה מחדש לשסתום הפליטה, אשר יגרום לחפייה רצינית עם שסתום היניקה, (ב) סגירה מאוחרת או פתיחה מחדשת של שסתום היניקה, שמשמעותה שחלק מהתערובת ידחה החוצה, ו - (ג) הקפיצה עלולה לקרות כאשר השסתום אמור להיות פתוח, במקרה זה הוא מגדיל את שטח הפתיחה ואינו מזיק להספק.
11. שבירת שסתום נגרמת בדרך כלל על ידי קפיצת השסתום ונחשול הקפיץ. הקפיצה גורמת בדרך כלל למהירות סגירה מהירה של השסתום, ופגיעה גסה בתושבת, דבר הגורם לבלאי של השסתום והתושבת. אם הקפיצה מתרחשת כאשר השסתום פתוח, כל מנגנון תפעול השסתום עלול להיות מועמס.
12. כל החלקים חייבים להיות בעלי קשיחות מירבית עם משקל מזערי.

עם הגדלת מידות מנוע המטוס המודרני והמדחף, וכתוצאה מכך הגדלת ההספק המפותח על ידי המנוע והמועבר למדחף, ניתוח בעיית הרעידות לצורך בקרתם והמאמצים לערכים בטיחותיים הפך לחשוב יותר ויותר. בעיות בעלות משמעות פרקטית גדולה, כגון איזון מנועים ומדחפים, רעידות פיתול של צירים ומערכות ממסרים, רעידות מאיצים (impellers), סחרור צירים מסתובבים, רעידות בית גל ארכובה וחלקים סמוכים, ניתנים להבנה יסודית רק על בסיס תיאורית הרעידות. רק על ידי שימוש בתיאוריה זו ניתן לבנות מנוע מטוס מודרני ומדחף, שבהם תנאי העבודה של המנוע והמדחף חופשיים מתנאים קריטיים, שבהם יכולות להתפתח רעידות חריפות.

בהרבה מקרים, המנועים ו/או המדחפים הואשמו בגרימת תקלות שמקורן ברעידות. בוצעו מספר צעדים יעילים (להזכירנו, מדובר על שנות הארבעים) כך שמרבית בעיות הרעידות ניתנות למניעה על ידי תכנון נאות. ניתן להציג את העקרונות הבסיסיים של הרעידות, ומהות הכוחות הגורמים לרעידות, על מנת להבין את עקרון הרעידות. ישנם הרבה סוגים של תופעת הרעידות, שאליהם היחס המתמטי הכללי מתייחס, הספר הזה מתרכז בגופים בעלי רעידות אלסטיות, ומערכות צמדים מכאניים אלסטיים.

הגדרה – הקולן הוא דוגמה טובה לגוף רועד אשר מאפשר הגדרת המונחים השונים, שמנתחי הרעידות משתמשים בהם.

שן של גוף, שמוכנס לתנועה, נוטה לרעוד עד אשר האנרגיה שהושקעה בו מתפזרת על ידי אובדני החיכוך המלווים את תנועת הרעידה. פיזור כזה של אנרגיה מכונה "עמעום". השן נעה ממצב קיצוני אחד לשני, לכל חלק יש תנועה "הרמונית פשוטה" כמו במיתר מתוח. ה"משך הטבעי של הרעידה" של השן קבוע לכל מקרה, והוא פונקציה של חלקי המקטע, האורך והחומר ממנו עשויה השן. התדירות של הרעידה במחזוריים לשנייה משותפת למשך, כלומר הזמן בשניות הנדרש למחזור אחד. התדירות בה המזלג נוטה לרעוד מכונה ה"תדירות טבעית" שלו. משרעת התנועה, כלומר התנועה המרבית במהלך חצי מחזור, תתמעט בתחילה במהירות, ולאחר מכן באיטיות, עד אשר התנועה תגווע כליל. השן מתארת כיפוף ב"אופן ראשוני", כלומר כל החלקיקים של השן נעים באותו כיוון כללי. אם אורך השן היה גדל בהדרגה, היה מגיע מועד בו כיפוף ב"אופן השני" מופיע, כלומר חלק אחד של השן ינוע בכיוון אחד וחלק אחר ינוע בכיוון הנגדי. הדבר עשוי להמשך ללא סוף, כך שיכול להיווצר כיפוף ה"אופן השלישי" וכו'.

הקפיץ הגלילי, אשר פועם בצורה אורכית, ומשטחים שטוחים, כמו דיאפרגמות, הנעים פנימה והחוצה, מהווים דוגמה פשוטה לרעידות גופים אלסטיים. שני סוגים אלו נמצאים במנועי מטוס. הצורה החשובה ביותר של הרעידות בתוך מנוע הינה "רעידה פיתולית", שבה מסה נעה בצורה פיתולית ומפתלת ציר אלסטי.

תהודה (resonance) ניתנת להגדרה כתופעה המתרחשת כאשר התדירות של כוח מעורר רעידה שווה לתדירות הטבעית במערכת שבה מופעל הכוח. רעידות בעלות משרעת גדולה במערכת גורמים לתהודה.

הנקודות בגוף רועד, שאינן זזות, נקראות "בליטות" (nodes). בקולן, שיש בו רק מצב אחד, "הבליטה" תהיה במקום בו השן מחוברת לידיה. חלקי מנוע כגון גלי ארכובה, בתי גל ארכובה ולהבי מדחף, מתנהגים באופן דומה לשן הפשוטה והמוארכת, ויכולים לרעוד בטווח מצבים שונה, בהתאמה לתחום הרחב של התדירויות הטבעיות.

מקור הרעידות – כל גוף אלסטי או מבנה, כגון כנפי מטוס, גל ארכובה של מנוע, לוח מכשירים, מדחף או עמוד אוויר בכונסי אוויר, מסוגל להגיב לכוח המסופק בצורה חוזרת, על ידי הרעדה בצורה כזו שיכול להיגרם הרס מוחלט למערכת. במרבית בעיות הרעידות במטוסים, פילוג הכוחות הוא מחזורי. הן נובעות מהמקורות הבאים:

- א. מדחף שאינו מאוזן סטטית ודינאמית
- ב. התנגשות של הכנף בזרם המדחף
- ג. גל ארכובה בלתי מאוזן
- ד. אינרציה של החלקים הנעים, כגון בוכנות וטלטלים
- ה. הצתה

האופן בו מנוע רועד למעשה מאוד מורכב. התנועה יכולה להתחלק למספר נקודות. הרעידות האופייניות בדרך כלל לצירוף מדחף-מנוע, הינן פיתול על ציר הסחב.

המטוס והמנוע שלו מורכבים ממספר חלקים אלסטיים, כגון כנפיים, מאזנות, משטחי זנב, מתלי מנוע וכו', לכל אחד תדירויות קריטיות משלו. תנודות גדולות במערכות הרועדות יוצרות עומסים גבוהים. באופן כללי, לא כל בעיות הרעידות יכולות להיפתר ליד שולחן התכנון. במרבית המקרים יש לבצע תצפיות למעקב אחרי מקור הבעיה.

בקרת רעידות מנוע –

1. ערעור. כמצוין למעלה, רעידות מנוע נוצרות על ידי ערעור הנובע מפעולה של שני מנגנונים, המנוע והמדחף. ערעור מהמנוע נובע משני מקורות שהם דחפי המנוע, וכוחות אינרציה.
- א. פיתול גל הארכובה הינו סכום של סדרת ההצטות בצילינדר מסוים. כיוון שמספר הצילינדרים הוא בהכרח סופי, עקומת הפיתול התוצאתית הינה קו גלי עם שיא, בכל מקום שצילינדר מסוים מגיע לשיא. הקו הגלי מייצג את משתנה הפיתול של המנוע, והוא ביחס ישר לפיתול המנוע. ניתן להקטין את משרעת משתנה הפיתול על ידי הגדלת מספר הצילינדרים. מכל מקום, צורת עקומת הפיתול למנוע בעל מספר צילינדרים נתון הוא קבוע. משתנה הפיתול, או הפיתול המעורר, מופעל במנוע על ציר הסחב. כאשר מתרחשת תהודה, היא יכולה להגיע למימדים גדולים, ולגרום לכישלון המנוע. בעבר, מנועים רדיאליים בעלי שורה אחת, וסוגי מנועים טוריים מסוימים, נחשבו כלא מתאימים למנועי מטוסים בגלל הקושי למניעת כישלונות, הנגרם מהספק גבוה והשימוש במדחפי מתכת כבדים, שיוצרים כוחות שלא ניתן היה לאתרם או להסירם. אולם, זה היה לפני הופעת המשך הדינאמי. ניתן לומר שרעידות פיתוליות אינן רציניות בשלב זה, עקב השיכוך הפיתולי של גל הארכובה, מתלי מנוע גמישים לבידוד המנוע ממבנה המטוס, וכמו כן השימוש בצידוד מיוחד לחקר או בדיקת משרעת הרעידות במטרה לבדודן או להקטין לחלוטין, שעזרו להקלת המצב.
- ב. לחצי צילינדר יוצרים כיפוף גל הארכובה בתדירות ההצתה, פלוס סיבוב גל ארכובה אחד, ותדירות ההצתה פחות סיבוב גל ארכובה אחד. מקרה זה אופייני למנועים בעלי שורה אחת. למנועים בעלי שתי שורות, זה יהיה תדירות ההצתה של כל שורת צילינדרים, פלוס מינוס אחד. כיפוף זה של גל הארכובה יוצר רעידות מנוע-מדחף. רעידות מנוע-מדחף אינן מושפעות על ידי מערכת מתלי המנוע, אולם מתלה המנוע צריך להיות מסודר כך שיקטין את העברת הרעידות האלו למבנה המטוס.
- ג. פיתולים אינרטיים נוצרים על ידי הגיאומטריה של החיבורים המפרקיים של הטלטל. פיתולים אינרטיים אלו הם תוצאה של רעידות מנוע-מדחף.
- ד. אי האיזון של מדחף, כאשר מורכב על ציר המדחף במנוע קונבנציונאלי, הוא, בממוצע למטוסים גדולים, בין 20 ו- 60 אונקיות-אינטש. כאשר מוסיפים את כל המרווחים, זה יכול להגיע לאי איזון של 75 עד 100. זהו סכום כל צורות אי האיזון, כולל סחב בלתי שווה של הלהבים. שינוי בעומס הסחב מתעורר כתוצאה מזוויות התקפה שונות במקטעים שונים של דיסקת המדחף, כאשר המטוס בנסיקה, צלילה או שינוי גובה.
- כאשר למטוס, בעל מדחף של פחות משלושה להבים, יש מהירות תוצאתית, עקב מהירות קדימה ומהירות שקיעה, יש שינויים בזווית ההתקפה של המדחף ביחס למצב הזוויתי של כל להב. עקב מהירות השקיעה, יש זווית α , אשר מופחתת מזווית ההתקפה הנורמאלית של להב אחת, ומתווספת ללהב השנייה. ההפרש התוצאתי של זוויות ההתקפה של שני הלהבים, כאשר הם חולפים את המצב האופקי, הינו 2α ; כיוון שמצב זה מתרחש פעמים בכל סיבוב, זה מפתח זוג, פי שנים ממהירות סיבוב המדחף.
- ה. מעורבות קצה הלהב מהווה מעורר מובנה למנוע, על ידי וריאציות של עומס סחב בקצה כל להב, כאשר הוא חולף הפרעה. עירור זה הוא הנפוץ ביותר במנוע פנימי, במטוסים מרובי מנועים. יש אזור סביב המבנה, שבו מהירות האוויר גדולה יותר מאשר מהירות האוויר של המטוס. כאשר כל להב חולפת אזור זה, הסחב נופל עקב הקטנה בזווית ההתקפה של הלהב. מתקפים אלו מתייחסים לכל להב המייצר צמד אלטרנטיבי המסופק לציר המדחף, בתדירות השווה למהירות המדחף כפול מספר הלהבים.
- ו. עירור מדחף אחר הינו צמד, עקב שינויים במומנט הג'ירוסקופי של האינרציה, שמתרחש במהלך סיבובי קרקע וסחרורים, כאשר משתמשים במדחף שני להבים.
2. תגובה – תגובת הרעידות של מערכת מכאנית מוגדרת על ידי שני גורמים: תדירות ומשרעת. המסה והקשיחות של המערכת קובעים את טווח התדירות; הכוח הקיים קובע את המשרעת.
- ניתן למצוא את התדירויות הטבעיות של אופן רעידות מערכת ההנעה על ידי שימוש במעורר אי האיזון, המורכב בנקודה אחת או יותר על המנוע, והמונע על ידי מנוע חשמלי. קיימות שתי שיטות לתפעול המעורר. השיטה הראשונה הינה חיבור מעורר אי איזון מסתובב לקדמת המנוע, באמצעות תומך מתאים וציר גמיש, המניע את המעורר בעזרת מנוע מהירות משתנה. אם המעורר מחובר במרחק מציר הסחב, הוא יעורר פיתול, בנוסף לכל אופני הרעידות האנכיות והאופקיות. מערכת זו היא הפשוטה להתקנה. יש בה חסרון, כיוון שכל אופני הפעולה מעוררים בצורה סימולטאנית, וקשה יהיה לזהותם בנפרד. הפרדת אופני הפעולה ניתנת להשגה על ידי התקנת מכשיר מדידת רעידות חשמלי, או לקטן (pickups), על קדמת או אחורי המנוע. רעידות פיתוליות ניתנות להבדלה מסבסוב ועילרוד על ידי מיקום שני לקטנים על קצוות הקוטר האופקי, כנראה על ראשי הצילינדרים. על ידי אמצעי מיתוג מיוחדים, הלקטנים יחוברו בטור בצורה כזו שכל התפוקות החשמליות, עקב רעידות אנכיות טהורות, יבוטלו וישאירו רק חיווי של רעידות פיתוליות. הרעידות האנכיות מוגדרות על ידי שני לקטנים, אחד בקדמת המנוע ואחד על אחוריו. ניתן למצוא את המשרעת האבסולוטית של הרעידות על ידי

מדידת כל לקטן בנפרד, על האף ועל החלק האחורי. יחס הפאזות יתקבל, אם מדידות אלו נלקחות על ידי לקטנים בטור. לקבלת אופני הרעידות האופקיות משתמשים בזוג לקטנים דומה. השיטה השנייה, והרצויה יותר, הינה מעורר ליניארי, שניתן להזיזו למקומות שונים על המנוע. בשיטה זו ניתן לעורר כל אופן רעידות בנפרד. בכדי לעורר רעידות אנכיות למשל, המעורר חייב להיות מותאם כך, שהקו לאורכו כוח האי איזון פועל, עובר דרך נקודת העילרוד. למרות שאופני הרעידות המעוררות בשיטה זו ניתנות לראיה בקלות, השימוש בלקטני הרעידות בצורה המתוארת יגדירו את תכונות הרעידות של מנוע מורכב במטוס, ברמה הגבוהה ביותר של דיוק.

3. **התומך הגמיש** – במערכות מכאניות מורכבות, כמו מערכת מנוע-מדחף למטוס עם הרבה אופני תגובה וטווח נרחב של תדירויות מעוררות, לא ניתן לתפעל את המנוע והמדחף מבלי להיתקל ברעידות תהודה. הגיאומטריה של מבנה מתלה מנוע קונבנציונאלי הוא כזה, שאם המנוע היה מותקן ישירות עליו, היה נמצא טווח תדירויות, שבו התדירויות הטבעיות של אופני הרעידות השונים היו מפוזרות על פני טווח מהירויות רחב של המנוע. אופן הרעידות הראשון (תרגום הרעידה) יהיה קרוב לקצה המהירות הנמוכה, והאופן השני (סיבובי ופיתולי) ימצא בקצה טווח הפעולה העליון של תפעול נורמאלי. למזלנו ניתן, על ידי מתן גמישות נוספת למערכת, לשנות את טווח התדירות בדרך כזו, שהרבה מהתהודות יוזזו למהירות שאינה קיימת בתפעול נורמאלי. בכדי להשיג זאת, מספר יצרניות מנועים תכננו תומכים גמישים.

4. **בעיות המתעוררות בשימוש בתומך גמיש** –

א. הגמישות שנוספת בין המנוע והמבנה התומך, בהתקן המתלה, מחייבת התחשבות במספר גורמים בתכנון המנוע. יש לשים לב לווידוא תנועה חופשית של המנוע ביחס למבנה המתלה שלו. אם צינור הפליטה נתמך על ידי מבנה המתלה, יש להשתמש בחיבור גמיש בין הצינור וסעפת הפליטה של המנוע.

ב. יש לספק צנרת עם מחברים גמישים.

ג. אטם אש בין המנוע ותא האביזרים חייב להיות מורכב משני קטעים, עם מבודד ביניהם. הקטעים חייבים להיות בצורה קונית, בכדי לאפשר תנועה סדירה סביב המרכז האלסטי של ההתקנה.

ד. יש לספק מרווח מספק בין המנוע, מאייד ואביזרים אחרים בחלקו האחורי של המנוע, ולבין מבנה המתלה, בכדי לאפשר גלגול כתוצאה מפיתול. העוצרים על התומכים הגמישים נותנים מגבלה מוגדרת לסטייה כתוצאה מהפיתול.

ה. בעיה נוספת, העוסקת בשימוש בתומכים גמישים, הינה הטמפרטורה שבה ליבת הגומי נמצאת.

ו. כשמשתמשים בתומכים גמישים, המנוע מבודד חשמלית ממבנה המתלה למעט הבקורות, צינור פליטה וכו', אשר אינם מוליכים עצמאיים. לפיכך, יש לספק הארקה מתאימה בהתאם למפרטים השונים.

5. **מבנה מתלה מנוע בלתי סימטרי** – מסיבות אווירודינמיות, במיוחד במטוסים מרובי מנועים, מתלי המנוע מתוכננים לעיתים כך שמרכז הכובד של המנוע אינו בקו עם מיתר הכנף. דוגמה לכך היא מנוע תלוי. שימוש במבנה מתלה שכזה יכול להוביל לתכונות של רעידות בלתי רצויות, אלא אם כן מבנה המתלה מתוכנן כיאות לפצות על חוסר הסימטריה בציר האופקי. בכדי להשיג זאת יש לקבל את התכונות הבאות:

א. אסור שכוח אופקי ורוחבי המופעל על מרכז הכובד של המנוע יגרום לסיבוב. ניתן להשתמש במצמדים בין הציר האופקי והעילרוד, אם התדירות הטבעית הגבוהה שלהם הינה מתחת למהירות השיט המינימאלית של המנוע. מכל מקום, כיוון שלמצמד שכזה יש נטייה לפיזור התדירויות הטבעיות של שני האופנים, יוצא מכך שלצורך השגת ערך נמוך של שתי התדירויות, המערכת צריכה להיות עם צימוד חלש, אם בכלל.

ב. יש להימנע מצימוד בין אופני הפיתול והאופקי. רצוי להקטין את פיזור התדירויות המלוות את צימוד אופני הרעידות, אולם חיוני במקרה זה להקטין את הצימוד. בצורה זו, הכוחות הפיתוליים נעשים בלתי אפקטיביים לעירור רעידות בציר האופקי ועילרוד.

6. **רעידות מדפי קירור** –

א. מדף קירור מנוע ניתן להרכבה בשני אופנים: מחובר בעזרת תומכים מתאימים לבית הנדנד של הצילינדר, או נתמך על ידי קורה תומכת המחוברת למבנה המתלה, ומשוחרר לחלוטין מכל מגע עם המנוע, למעט על ידי חיכוך דרך אטם הטיית הזרימה.

ב. לא רלוונטי (הספר מביא מספר נקודות המתייחסות למנועים רדיאליים ואין להם קשר לרעידות).

7. **רעידות אביזרים** – לאביזרים הכבדים, כגון מחוללים, מתנעים ומדחסי גידוש, אשר מורכבים בדרך כלל בחלקו האחורי של המנוע, יש תדירויות טבעיות בטווח של רעידות המנוע-מדחף, ולעיתים הם מעלים את רעידות האביזרים. יצרני המנועים, שלמדו את בעיית רעידות האביזרים, ממליצים ליצרני המטוסים, כאשר

בחרים את הרכב האביזרים, להחליט, על ידי מבחנים, באם רעידות האביזרים הינם בתחום המגבלות הבטוחות.

ח. מערכת הקירור

ההספק המפותח על ידי מנוע הינו ביחס ישר לחום הבעירה. חיוני שטמפרטורות התפעול של המנוע ישמרו בתחום של מגבלות בטוחות, למניעת תוצאות חמורות, כמפורט בהמשך פרק זה. אובדן החום עקב הקירור הינו 25% בערך מהחום הכללי המופק, ולא ניתן להפחיתו במידה ניכרת ללא הקטנת אמינות התפעול של המנוע. לפיכך, לשם שימוש בחום כהספק, יש לקרר את המנוע בצורה מתאימה. דבר זה מושג הן על ידי קירור אוויר, או נוזל.

תוצאות הטמפרטורה - טמפרטורת צילינדר גבוהה יכולה להוביל לתוצאות חמורות:

- א. החלשת ראש הצילינדר – ראשי צילינדר מיוצרים בדרך כלל מסגסוגת אלומיניום. החוזק של חומר זה הינו יחסי לטמפרטורה שלו בקירוב. אם טמפרטורות ראש הצילינדר חורגות מהמגבלות הרגילות של 450° עד 500° פרנהייט (232-260 צלזיוס), החומר יחלש בצורה ניכרת.
 - ב. נזק לחלקי הצילינדר והבוכנה – טמפרטורות חריגות יכולות להוביל לעיוות השסתומים ותושבות השסתומים, כישלון קנה השסתום וסיכת הנדנדים, וקלקול שכבת השמן בין הבוכנה והצילינדר, עם אפשרות לחרוץ או היתפסות הבוכנה.
 - ג. הגדלת הנטייה לדטונציה – טמפרטורות גבוהות מגדילות את הנטייה של תערובת האוויר-דלק לדטונציה. מאידך, הדטונציה גורמת לטמפרטורות ראש צילינדר גבוהות, וכך מתחיל מחזור רע. לא חשוב מה בא קודם, ההשפעה על המנוע הינה נזק בלתי נמנע.
- יסודות קירור אוויר** – בכל מערכות הקירור במטוסים משתמשים באוויר לנשיאת החום מהצילינדרים החוצה. כאשר הקירור מתבצע ישירות, ללא תיווך של נוזל קירור, הבעיה של הקירור, בעיקרה, נפתרת מעצמה על ידי:
- א. חשיפה של שטח קירור מספק של הצילינדרים לזרימת אוויר הקירור.
 - ב. כיוון יעיל של האוויר לכל חלקי הצילינדרים.
 - ג. אספקת מספיק אוויר קירור, ביחד עם מספר אמצעים לוויסות זרימת האוויר, בהתאם לתנאים המשתנים.
- שטח הפנים של הצילינדרים, החשוף לזרימת אוויר הקירור, גדל על ידי שימוש בשבשבות קירור. יעילות השבשבות גדלה, עד לנקודה מסוימת, ככל שהן עמוקות וקרובות יותר. הגורמים הבאים חשובים גם הם:
- א. שיעור הקירור משתנה ישירות עם הפרשי הטמפרטורה בין פני המתכת החשופים ואוויר הקירור. מכאן השיעור הגבוה של הקירור מושג במזג אוויר קר מאשר במזג אוויר חם.
 - ב. כפי שהוזכר למעלה, צילינדרים מקוררי אוויר עשויים מקנה פלדה וראש צילינדר מסגסוגת אלומיניום, בעלי צלעות קירור מרובות, להשגת חוזק וקירור מתאים. השיפור בשיעור הקירור, באמצעות צלעות קירור, נמשך בצורה נמרצת בעבר. שטח החשיפה של צלעות הקירור גדל ב – 500% לכל צילינדר להשגת קירור מתאים, עם הגדלת טמפרטורות הבעירה שנוצרו עם השימוש בדלקים משופרים. תשומת לב מיוחדת ניתנה לפיזור היעיל של צלעות הקירור, להשגת קירור אחיד מעל כל תא שריפה, כולל תושבות המצתים ותושבות שסתום הפליטה.
 - ג. בנוסף לפיזור החום מצלעות הקירור של הצילינדר, כמות מסוימת מובלת לחלקים אחרים של המנוע ומוקרנת לתוך מדיום הקירור. תנועת השמן קולטת גם היא חום, אשר מפוזר דרך מקרן השמן.
- לפני שנים לא רבות (ושוב, הספר נכתב לפני כששים שנים), קירור מנוע הושג על ידי הצבת הצילינדר לתוך זרימת האוויר. לסידור זה היו מספר מגרעות. בעוד שכל האוויר במעברו דרך המנוע חלף בין הצילינדרים, רק חלק קטן ממנו התקרב בצורה מספקת לצלעות הקירור להסרת מרבית החום. הצילינדרים קוררו בצורה בלתי שווה, החלק האחורי של כל צילינדר נטה להיות חם יותר מאשר הקדמי. המערבולות שנוצרו השפיעו על כל החלקים של המטוס שמאחורי המנוע.
- לאחרונה הוכנסו לשימוש מטי זרימה כדי לאלץ את אוויר הקירור למגע קרוב יותר עם כל חלקי הצילינדרים. בצורה זו משתמשים בכל זרימת האוויר להסעת החום מצלעות הקירור החוצה. למרות שההתנגדות של לוחות ההטיה, וצלעות הקירור, למעבר האוויר דורש שישמר לחץ דיפרנציאלי לאורך המנוע, בכדי להשיג זרימת אוויר הכרחית, נפח אוויר הקירור הנדרש מופחת בהרבה על ידי השימוש במערכת דפלקטורים מתכננים כואות, והתנגדות המטוס המושגת למעשה מופחתת. זרימה של אוויר קירור, המספיקה להסעת החום מהצילינדרים, מושגת באמצעות חיפוי העוטף את המנוע. זרימת אוויר הקירור ניתנת לוויסות על ידי סידרה של מדפי קירור מתכוננים בחלקו האחורי של חיפוי המנוע.

למעשה, רק עשרה אחוזים של האוויר במעבר דרך המנוע מאולץ דרך החיפוי, שאר האוויר חולף חופשי מעל החיפוי. כתוצאה מכך, יש מעט גרר של אוויר הקירור – ההספק צורך כחמישה אחוז מה BHP – והביצועים אינם מוקרבים עקב צורת המנוע והחיפוי שלו.

יסודות קירור נוזל – הגורמים הבאים חשובים:

- א. שיעור הקירור נמצא ביחס ישר לכמות נוזל הקירור, הבאה במגע עם זרם המדחף. שטח הפנים הנרחב הנדרש, מושג על ידי שימוש במקרן מתאים, העשוי ממספר רב של צינורות, המסודרים כך שהמקרן ייצר התנגדות חזיתית מזערית. משטחים אחרים, כגון: מעטפת הצילינדר, סעפת, מקרנים וכו' מסייעים בשיעור הקירור.
- ב. שיעור הקירור מותנה במוליכות התרמית של החומר, במיוחד במבנה צנרת המקרן.
- ג. שיעור הקירור מותנה בנפח המתכת בצנרת המקרן, במוליכות שלה, שטח הפנים והמסה של זרימת האוויר סביבם. במנועים מקוררי נוזל, בעלי הספק גבוה, גורם זה הופך להיות חשוב מאד בתכנון מקרנים יעילים.
- ד. שיעור הקירור משתנה ישירות עם מסת האוויר הזורם דרך המקרן. בדרך כלל משתמשים באמצעים לשליטה על זרימת האוויר דרך המקרן על ידי שימוש בתריסים, המופעלים הן באמצעים ידניים או אוטומטיים.
- ה. שיעור הקירור משתנה עם השינוי בטמפרטורה בין נוזל הקירור והאוויר המקרר, חום גבוה יותר מועבר במזג אוויר קר.
- ו. שיעור הקירור משתנה עם שיעור זרימת נוזל הקירור דרך המערכת, עד למהירות קריטית מסוימת. מעל מהירות קריטית זו מתרחשת זרימה מערבולית או קרצוף פני השטח, ושיעור זרימת נוזל הקירור אינו מגדיל את גורם הקירור, אלא מגדיל את לחץ הפעולה של המערכת.
- כפי שנאמר למעלה, צילינדרים מקוררי נוזל בנויים בדרך כלל מקנה עשוי גילי פלדה, או מעטפת, המוכנסים ביציקת סגסוגת קלה. מים במעטפת זו מוזרמים בעזרת משאבה, קולטים חום מקני הצילינדר, ומעבירים אותם למקרן.
- שימוש באתילן גלייקול בצורתו הטהורה, או מדולל במים, עדיף משימוש במים בלבד, כיוון שטמפרטורת נקודת הרתיחה הגבוהה שלו, 350°C פרנהייט (150°C צלזיוס), תמנע התאיידות של נוזל הקירור בטמפרטורות התפעול הנורמאלי של המנוע. כשמשמשים באתילן גלייקול, טמפרטורת התפעול הנורמאלית של המנוע יכולה לעלות עד 250°C פרנהייט (121°C צלזיוס), מעל מגבלת הטמפרטורה כאשר משתמשים במים בלבד. הדבר מאפשר שימוש במקרן קטן יחסית, וכתוצאה מכך המשקל ליחידת כוח סוס וההתנגדות קטנים.
- כמו במנועים מקוררי אוויר, כמות מסוימת של חום מועברת מהצילינדרים לחלקים אחרים של המנוע ומוקרנים לתוך זרימת האוויר. כמו כן, זרימת השמן סופגת חום מהמנוע ומפזרת אותו דרך מקרן השמן.
- טמפרטורת הפעולה של מנוע מקורר נוזלים נמדדת על ידי מד חום, המותקן בקו היציאה למקרן.
- נוזלי קירור** – מספר רב של נוזלים, חלקם מתוארים בהמשך, ניתנים לשימוש כנוזלי קירור למנועי שריפה פנימית. במטרה לקבל את הדרישות הרצויות במנועי מטוסים מקוררי נוזלים, מספר זה מוגבל למים ולגלייקול אתילן.
- מים – משתמשים במים בצורה נרחבת כנוזל קירור עקב זמינותם, וערך החום הגבוה שלהם. החיסרון בשימוש במים במנועי מטוסים, בהשוואה לשימוש בגלייקול אתילן, הוא: הזיהום של המים, שיעור ההתאיידות שלהם (או נקודת רתיחה נמוכה), נקודת הקיפאון שלהם וההתפשטות כאשר קופאים, דבר שיכול לגרום לנזק למערכת הקירור.
- תכונות נוספות של המים הן:

 - א. נקודת הרתיחה, הנמוכה יחסית, מחייבת שימוש במקרן גדול במערכת הקירור, לשמירת טמפרטורת פעולה מתחת ל 88°C , וכמות רבה יחסית של נוזל. דבר זה גורם להתנגדות גבוהה, ומשקל גבוה ליחידת הספק, במנועי מטוסים.
 - ב. נקודת הקיפאון הגבוהה (0°C) מייצגת בעיה באחזקת המים מעל טמפרטורה זו כאשר המנוע פועל במזג אוויר קר.
 - ג. כיוון שמרבית המים המשמשים במערכת הקירור באים מבארות, נהרות ואגמים, אפילו שהם מסוננים, הם עדיין לא טהורים מספיק ולכן נדרשים ניקוז ושטיפה תדירים.

- גלייקול אתילן – פרסטון הוא חומר כימי העשוי מאתילן אוקסיד $(\text{CH}_2)_2\text{O}$ המשולב במים H_2O לנקודת רוויה, ויוצר תזקיק של חמר פחמני. המונח גלייקול תוכנן על ידי החימאים שייצרו במקור את המבנה של $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$. הגלייקול אתילן הוא נוזל חסר צבע וריח ואינו רעיל, בעיר, מרעיל, מאכל או אלקטרוליטי בפעולתו. היתרונות של הגלייקול אתילן ביחס למים, כנוזל קירור, הינם טמפרטורת הרתיחה הגבוהה שלו ונקודת הקיפאון הנמוכה, מלווה בעובדה שכאשר הוא קופא הוא מתכווץ ולא מתפשט. יתרון נוסף הינו הניקיון היחסי שלו. החסרונות הם

חום סגולי נמוך, הגורם לטמפרטורת מנוע גבוהה עם אובדן מסוים בהספק, והזמינות המוגבלת שלו (לפני ששים שנים). תכונות נוספות הן:

א. טמפרטורת הרתיחה הגבוהה שלו, מעל 350°F (177°C), מאפשרת שימוש במקרן קטן מאשר בשימוש במים. כמובן שמקרן קטן מקטין את ההתנגדות ומשקל ליחידת הספק.

ב. טמפרטורת הקיפאון הנמוכה של בערך 0°F (-18°C), והעובדה שאינו קופא למוצק עד לטמפרטורה של -48°F (-45°C), מגינה על מערכת הקירור במזג אוויר קיצוני. מכל מקום, אין לנסות להניע ולהפעיל מנוע מטוס כאשר הגלייקול בטמפרטורה של מתחת ל 0°F כיוון שהוא לא יזרום כראוי. כאשר ידוע מראש שהנוזל יהיה חשוף לטמפרטורות נמוכות בהרבה מאפס מעלות פרנהייט, למשך זמן ממושך, יש לנקזו ממערכת הקירור, בעודו חם, ולחממו לפני מילוי המערכת.

ג. גלייקול אתילן נחשב טהור כאשר ממולא לראשונה במערכת הקירור. הנטייה הטבעית שלו לשחרר חלודה ואבנית מחלקים מסוימים, מחייבת ניקוז ושיטיפה תדירים לפני החזרתו למערכת.

ד. הגלייקול אתילן, המשמש לקירור מנועי מטוסים, ממלא מספר מפרטים צבאיים.

ה. במנועים שמשמשים במים לקירור, מומלץ, במזג אוויר קר, להוסיף סוג מסוים של חומר מסיס למניעת הקיפאון ונזק למערכת הקירור. גלייקול אתילן, גליצרין ואלכוהול הם משביעי רצון למטרה זו. מהם, הגלייקול נחשב לטוב ביותר. הוא נמס במים בכל יחס, ותמיסות של ריכוז מספק קופאות בצורה של "ברד" במקום מוצק.

ו. הטמפרטורות הצפויות קובעות את הכמות של הגלייקול למהילה במים. הגלייקול אינו מתאדה בטמפרטורת הפעולה הרגילות. לפיכך, בתנאים רגילים, רק המים המאיידיים זקוקים להחלפה. במקרה שמעט מהתמיסה נזלה מהמערכת דרך המחברים וכו', יהיה צורך להוסיף יותר גלייקול אתילן. הכמות תוחלט על ידי הידרומטר תרמי או כלי בדיקה ייעודי אחר (בדומה לכלי הבודק ריכוז חומצה במצבר).

ז. הגלייקול מתפשט כאשר מחממים אותו, יותר מאשר המים בטמפרטורה זהה. לפיכך, כאשר משתמשים בו כתמיסה נגד קיפאון, יש לאפשר לו נפח ההתפשטות במערכת הקירור. עושים זאת בדרך כלל על ידי ניקוז כמות מסוימת של התמיסה, לאחר מילוי המערכת, לקיבולת כמות המים הנורמאלית שלה.

גליצרין – משתמשים בו במידה מסוימת כחומר נגד קיפאון במנועים מקוררי מים. השימוש בו במערכות קירור מנועים אינו רצוי עקב תכונות מסטיקיות שלו, וקשיים במניעת נזילות שלו מהמערכת.

אלכוהול – משתמשים בו בצורה נרחבת במנועי רכבים כחומר מונע קיפאון, בעיקר בשל המחיר הזול שלו. האלכוהול המסחרי המסופק למטרה זו, וידוע כאלכוהול מפוגל, עשוי בעיקרון מאתיל ומתיל. ככל שאחוז האתיל בתערובת גבוה יותר, כך הוא טוב יותר למניעת קיפאון, כיוון שלאתיל נקודת רתיחה גבוהה יותר מאשר למתיל, לפיכך, פחות אובד בהתאידות. עקב טמפרטורת הפעולה הגבוהה של מנועי מטוסים, השימוש באלכוהול מפוגל כמונע קיפאון אסור.

מערכות קירור – למרות שישודות הקירור המעורבים בתכנון ובניית מנוע מטוס הם בעלי יעילות גבוהה, הבעיה שמתמודדים איתה מתכנני מטוסים הינה בשמירת נצילות גבוהה, עם מינימום התנגדות. בעיה זו ישימה גם למנועים מקוררי אוויר ומקוררי נוזלים.

קירור אוויר – במנועים מקוררי אוויר, יעילות קירור גבוהה מושגת על ידי התקנת חיפוי טבעתי מסביב לצילינדרים. יעילות הקירור של מעטה מתוכנן כראוי משתנה קמעה עם מהירות המטוס, או מהירות זרימת האוויר. ככלל, מעטה המתוכנן ליעילות גבוהה במהירויות אוויר גבוהות, אינו יעיל במהירויות אוויר נמוכות, בפרט כאשר המנוע פועל על הקרקע. בכדי להתגבר על קושי זה, משתמשים במדפי מעטה נשלטים בשפת הזרימה של טבעת המעטה, או על ידי פיתוח מערכת לחץ נמוך מתאימה.

מעטה למזג אוויר קר – מספר מנועים מקוררי אוויר, במטוסים בעלי ביצועים נמוכים, משלבים חיפוי מעל חטיבת בית גל הארכובה, המספק אמצעי לשליטה בזרימת האוויר מסביב לבית גל הארכובה במזג אוויר חם, ומאפשר סגירה במזג אוויר קר.

טמפרטורה מגבילה – מערכות קירור אוויר נוכחיות מתוכננות לשמירת טמפרטורות מנוע נאותות בהספק וסל"ד מותר מירבי בטיסה ישרה, או במהירות טיפוס הטובה ביותר, כאשר טמפרטורת הקרקע היא 100°F (38°C) או פחות. ניתן למצוא שתי מגבלות לטמפרטורות ראש צילינדר בהוראות תפעול מנוע ספציפי, כאשר מנועים בעלי הספק גבוה מעורבים:

א. מגבלת טמפרטורה גבוהה הינה למשך זמן מוגבל – להמראה, לביצועים מרביים בטיפוס וטיסה ישרה ולחרומים. מגבלת הטמפרטורה לתפעול מוגבל חייבת, לפיכך, להיות למשך זמן מזערי אפשרי, ואין לחרוג ממנה.

ב. מגבלת טמפרטורה נמוכה הינה המירבית לתפעול מתמשך. אין לחרוג ממנה למעט תחת תנאי תפעול מוגבלים המוזכרים בגרפים השונים. נהוג לשמור את טמפרטורת ראש הצילינדר ב 50°F (10°C) מתחת למגבלה זו על מנת לשמור את חומר ראש הצילינדר בחוזק תפעול גבוה.

חיווי טמפרטורה – טמפרטורות ראש הצילינדר מוצגות באמצעות מחוון, המחובר לצמד תרמי המוצמד לצילינדר, במקום שהניסיון מצביע כנקודה החמה ביותר במנוע בכל צורת התקנה. הצמד התרמי עצמו ממוקם מתחת למצת האחורי, או על חציץ מיוחד בחלקו העליון או האחורי של ראש הצילינדר. מיקום הצמד התרמי נבחר בגלל יציבותו בהתייחסות לטמפרטורה, ובגלל היתרון המכאני בחיבור המעשי והמתמשך.

הטמפרטורות הנמדדות באחת מנקודות אלה הינן לייחוס בלבד או טמפרטורת בקרה; מבחנים רבים הוכיחו שכל עוד הן נשמרות במגבלות, הטמפרטורות של הצילינדר, שסתום הפליטה עם התושבת והמוביל שלו והבוכנה, יהיו גם הם בטווח משביע רצון.

כיוון שהצמד התרמי מחובר לצילינדר אחד בלבד, הוא אינו יכול לתת יותר מאשר חיווי למצבו הכללי של המנוע. בעוד שבדרך כלל ניתן להניח שטמפרטורת שאר הצילינדרים תהיה נמוכה, תנאים מקומיים כגון דטונציה או כשלון הצתה לא יחוו אלא אם הם מתרחשים בצילינדר המכיל את הצמד התרמי.

בקרת טמפרטורה – כמות החום המועברת לאוויר הקירור היא פרופורציונאלית בערך למסת זרימת האוויר. ניתן לשלוט בטמפרטורת המנוע על ידי ויסות כמות האוויר המאולץ לעבור דרך חיפוי המנוע בזמן נתון. מסת האוויר מצידה מווסתת על ידי שינוי נפילת הלחץ לאורך המנוע. ניתן לעשות זאת באמצעים הבאים:

א. **מדפים בחיפוי המנוע** – חיפויים בעלי יציאת אוויר קבועה הינם בדרך כלל משביעי רצון למטוסים בהם טווח המהירויות הוא קטן, כל עוד מרווח היציאה הוא בעל גודל מספק לאספקת זרם האוויר הנחוץ, עם לחץ כניסה זמין במהירות הטיפוס הנמוכה ביותר. במהירויות הגבוהות של טיסה ישרה, הגדלת הלחץ בכניסה לחיפוי מאלצת יותר אוויר מאשר נחוץ למעשה לעבור את המנוע. אולם, ככול שטווח המהירות קטן, בזבז האנרגיה הקטן אינו מצדיק משקל נוסף וסיבוכ הנעוץ בתוספת מדפי החיפוי. מצד שני, במטוסים בעלי ביצועים גבוהים יש בזבז הספק גבוה באילוף עודף האוויר לחלוף דרך המנוע במהירויות גבוהות, ותוספת המשקל והסיבוכ של מדפי חיפוי מתכווננים מוצדקים. במהירויות גבוהות היציאה מופחתת, כך שרק האוויר הנדרש חולף דרך המנוע. במהירויות נמוכות, שטח היציאה מוגדל. דבר זה מקטין את הלחץ מאחורי הצילינדרים כפיצוי ללחץ הקדמי הקטן, וכך מחוזקת נפילת הלחץ הנדרשת לאורך המנוע. מדפי החיפוי פועלים כמו מצערת לזרימת אוויר הקירור. הטווח האפקטיבי של פתיחת המדף מוגבל על ידי שיקולים אווירודינאמיים, אשר משתנים ממטוס למטוס. למשל, הגרר הפרזיטי של מטוס מוגדל כאשר המדפים פתוחים. אם הם נפתחים יותר מדי, יכולה להיווצר הפרעה מעל מהירות מסוימת, והשליטה במטוס מופרעת.

ב. **על ידי מהירות האוויר** – כל שינוי במהירות המטוס משפיע על הלחץ בפני המנוע, ומכאן על מסת האוויר העוברת את המנוע. אם מהירות האוויר יכולה הייתה לגדול ללא תוספת הספק נדרש מהמנוע, על ידי הקטנת שיעור הטיפוס למשל, התוצאה תהיה יותר יעילות בקירור המנוע.

ג. **בקרי טמפרטורה אחרים** – קיימות שתי שיטות נוספות לבקרת הטמפרטורה של המנוע; אף אחת מהם אינה מושפעת ממערכת הקירור. השיטות הן:

- a. **יחס אוויר-דלק** החום הנוצר על ידי הבעירה הוא הגבוה ביותר ביחס אוויר-דלק של בערך 0.067, מעט מתחת לתערובת הענייה ביותר. אם התערובת הינה מתחת ליחס זה, עודף האוויר בתערובת מפחית את טמפרטורת הבעירה. כאשר התערובת עשירה יותר מאשר יחס אוויר-דלק זה, המצאות עודף הדלק מפחית את טמפרטורת הבעירה. ניתן להשיג בקרה על טמפרטורת ראש הצילינדר על ידי הגדלת יחס האוויר-דלק ממצב עני לעשיר, בתנאי שהתערובת העשירה הינה עשירה מספיק בהספק המיטבי. כללית, בטווח השיט, קידום ידית התערובת ממצב עני לעשיר תעלה את עוצמת התערובת ממצב הקרוב לחסכוני למצב של תערובת ענייה מיטבית, וכתוצאה טמפרטורת ראש הצילינדר תעלה במקום לרדת.
- b. **הספק** - הפחתת ההספק תגרום גם היא לירידה בטמפרטורות ראש הצילינדר. בכדי להשיג את האפקט המירבי, יש להוריד את ההספק גם על ידי הקטנת הסל"ד וגם על ידי הקטנת לחץ הסעפת.

מחוון טמפרטורת שמן – הואיל וקירור של מנוע מקורר אוויר נעזר במערכת השמן, טמפרטורת ראש צילינדר גבוהה יכולה להיגרם על ידי עליית טמפרטורת שמן בלתי רגילה - עקב חוסר שמן, קירור לא נאות של השמן, או צמצום במעברי השמן בקווים; מכאן הצורך להפסקת פעולת המנוע, או הקטנת הסל"ד, כאשר מובחן חימום יתר של המנוע.

קירור נוזלי – בעוד שמערכת הקירור במנוע מקורר אוויר היא עצמאית פחות או יותר, זה לא המקרה במנוע מטוס מקורר נוזל. בנוסף לעקרונות הקירור המעורבים בתכנון ובניית המנוע, קיימים מספר אביזרי עזר המורכבים במטוס, ואשר יוצרים חלק אינטגרלי של מערכת הקירור השלמה. אביזרים אלו כוללים את המקרן, מיכל עזר להתפשטות וחיבוריהם למערכת. גשש חום ומד טמפרטורה משולבים במערכת בכדי לציין את טמפרטורת הפעולה של הנוזל. יחידת מקרן מבוקרת תריס ומיכלים צנטריפוגליים נכללים גם הם במערכת.

א. **מקרן** – המקרן מבצע את התפקיד של שמירת טמפרטורת נוזל הקירור בתוך מגבלות הביטחון, עם התנגדות פנים מינימאלית. החיפוי, המורכב סביב המקרן, מהווה חלק חשוב כיוון שתכנונו שולט על נפח האוויר הזורם סביב המקרן. תכנון ומבנה משביעי רצון מאפשרים יכולת מירבית של קירור, במשקל מזערי. לב המקרן בנוי בדרך כלל מנחושת והמיכלים מפליז.

יחידת הליבה של המקרן מותקנת בדרך כלל בעריסה עם משככי זעזועים בין המקרן והמבנה הראשי. יחידת התריס יכולה להיות מותקנת בצד היציאה של המקרן, וניתנת לשליטה ידנית מהתא, או אוטומטית דרך יחידת בקרה טרמית. כאשר יש שילוב של שניהם, היחידה האוטומטית מהווה התקן ביטחון בפתיחה אוטומטית של התריס, כאשר נוזל הקירור מגיע לטמפרטורה שנקבעה מראש. ב. **מיכל התפשטות** – משתמשים במיכל העזר להתפשטות בצירוף למקרן, בכדי לייצר חלל התפשטות לנוזל הקירור במערכת, כאשר הוא מתחמם. הוא מורכב בנקודה הגבוהה ביותר של המערכת, ומשמש כיחידת המילוי שדרכו ממלאים את נוזל הקירור במערכת. תחתית מיכל ההתפשטות מחוברת לחלקו העליון של המקרן דרך צנרת מתאימה. הקיבולת של מיכל ההתפשטות, והצנרת היוצאת למקרן, היא 10% מהקיבולת הכללית של המערכת, בתוספת גלון אחד. מתקן מיוחד של מיכל ההתפשטות הינו התקנה של שני שסתומים בפתח המילוי. שסתום מפולש גדול פועל ומשחרר לחצים פנימיים כאשר הנוזל מתחמם, ושסתום כדורי קטן מאפשר כניסת אוויר חיצוני לתוך המערכת, כאשר טמפרטורת נוזל הקירור יורדת. הפעולה האוטומטית של שני שסתומים אלו מאפשרת לחץ אוויר דיפרנציאלי קבוע במיכל ההתפשטות.

ג. **צנרת** – הצנרת במערכת קירור נוזל כוללת צנרת, חיבורי צנרת גמישים ופקקי ניקוז מתאימים. הצנרת עשויה בדרך כלל מפליז, או צינורות מסגסוגת אלומיניום, בעלי עובי דופן מזערי של 0.050". מתחת לתפסי הצינורות. צנרת האלומיניום מוגנת משיתוך אפשרי על ידי טיפול אנודי. באזורים של חיבורים גמישים משתמשים בצנרת גומי, צנרת זו עמידה בפני התפוררות. לצורך תפיסת הצנרת, ומניעת נזילות נוזל הקירור, משתמשים בתפסים סטנדרטיים. בחלק הנמוך ביותר של המערכת מתקינים שסתומי ניקוז גדולים.

ד. **צנטריפוגה** – במערכות קירור נוזלי, כאשר תיתכן נזילה של גזי פליטה דרך אטם הצילינדר או חיבוריו, יש להתקין תאי צנטריפוגה בקווי הפריקה למקרן. מערבולות נוזל הקירור, במעברם דרך תאים אלו, מפרידות את אדי הגזים מנוזל הקירור, ומכוונות את האדים דרך קו האוורור למיכל ההתפשטות. אם היו מאפשרים לגזים אלו להצטבר בקווים, יכול היה להיווצר כיס גזים שימנע זרימה שוטפת של הנוזל.

ה. **טמפרטורה מגבילה** – כאשר מפעילים מנועים מקוררים במים, יש לשים לב למניעת מעבר טמפרטורת המים מעבר ל- 85°C . כאשר משתמשים בגלייקול, אין לחרוג מ- 150°C . באספקת כמות מתאימה של נוזל קירור, ותפעול נכון של המערכת, נמנע טמפרטורות גבוהות על ידי פתיחת תריס הקירור, באם הוא מותקן. אם לא מותקן תריס קירור, נפחית את טמפרטורת נוזל הקירור על ידי הורדת הסל"ד או העשרת התערובת. במצערת מלאה, עובר דרך המערכת בערך פאונד אחד של נוזל קירור לכוח 100 לדקה, כאשר טמפרטורת הנוזל הינה 60°C . במזג אוויר קר, כאשר אין תריס מקרן, מומלץ לכסות חלק מליבת המקרן על ידי כיסוי מתאים כלשהו, בכדי לשמור על טמפרטורת יציאה מזערית של בערך 60°C .

מערכת איוד

כלי - ההסבר הרגיל לעקרון מחזור ארבע פעימות, בפעולת מנוע בעירה פנימית, מתחיל בדרך כלל בהסבר ש"שסתום היניקה נפתח, הבוכנה נעה למטה תוך יניקת התערובת לתוך הצילינדר". ניתן להבחין, שלמרות שתיאור פעולת המנוע יכול להתחיל בכל מחזור, התהליך ההגיוני הוא להתחיל בפעימת היניקה. סדר זה הוא נכון, כיוון שיניקת מטען הדלק משפיעה ישירות על פעולת שאר המחזורים. סל"ד המנוע, הספק ונצילות מווסתים בעיקרון על ידי הכמות ואופי המטען הנשאב דרך מערכת היניקה. למעשה, כל הפעולות שבהמשך יכולות להיחשב תוצאה של פעימת היניקה. לפיכך, יניקת הדלק והאוויר הם פעולה יסודית, אשר חייבת להיות ברורה בכדי להבין לחלוטין את מנוע השריפה הפנימית. לימוד האיוד עוסק בהרבה חוקי כימיה, הידראוליקה, חום וענפי מדע אחרים. חיוני לפיכך להצביע על חוקים ועקרונות מסוימים, המתייחסים לפעולת מערכות האיוד.

עקרונות האיוד - ניתן לסווג את המנוע הקונבנציונאלי כצורה של מנוע חום, שבו תהליך הבעירה מתרחש בתוך צילינדר סגור. למרות שמנוע אמור לעתים לפתח הספק, מנוע הוא רק מנגנון להפיכת צורה אחת של אנרגיה לצורה אחרת. לדוגמה: במנוע הבנזין, חום - צורה של אנרגיה, הופך בחלקו לעבודה מכאנית. החום הנדרש נוצר על ידי שריפת דלק מתאים, והוא משמש לגרימת התפשטות ולחץ; לפיכך, אנרגיית החום המקורית מייצרת עבודה מועילה. בהקשר זה נדון בהמשך בעקרונות הבסיסיים.

בעירה הינה תוצאה של שילוב גורמים מסוימים עם חמצן (O), המופק מהאטמוספירה. למשל מימן (H) יכול לבעור באוויר או בחמצן בצורה המתוארת בנוסחה הבאה: $H_2O \leftarrow O + H_2$. ניתן להבחין שלאחר שהריאקציה החימית פעלה, נוצר חומר חדש לחלוטין, בצורה שאינה דומה כלל לחומר המקורי. במקרה זה המוצר הינו מים. בצורה דומה, הפחמן (C) יתחבר עם החמצן, אולם בריאקציה זו ייווצרו שני מוצרים שונים, מותנה בכמות החמצן. באספקה רבה של חמצן, הפחמן יתחבר כדלהלן: $CO_2 \leftarrow O_2 + C$ (דו תחמוצת הפחמן). אולם, כאשר אספקת החמצן מוגבלת, כפי שמתרחש בצילינדר, התוצאה הינה $CO \leftarrow O + C$ (חד תחמוצת הפחמן). שני גזים אלו נמצאים לעיתים בפליטה של המנוע, היחס בניהם תלוי ביחס התערובת.

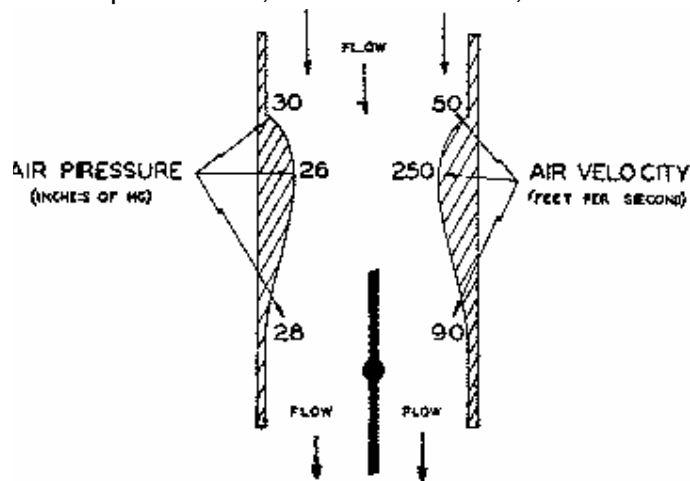
תרכובות המכילות מימן ופחמן כגון גזולין, בנזן, אצטילן וכו', מגיבים בשילוב עם חמצן בצורה דומה. לדוגמה, כאשר הידרו קרבון הידוע כהפטן (C_7H_{16}) בוער בכמות נכונה של חמצן, מופק דו תחמוצת הפחמן ומים. תחת תנאים נורמאליים, גם המים וגם דו תחמוצת הפחמן נספגים כגזים נפרדים באטמוספירה. אם מורכבים מעבים מתאימים, ניתן להפיק מים. הריאקציה המתוארת למעלה מניחה שיש כמות מתאימה של אוויר, אולם בדרך כלל תנאים אלו של תערובת אידיאלית אינם מושגים, ולעתים אינם רצויים. תערובות עניות מאפשרות היווצרות כמות גדולה של דו תחמוצת הפחמן, בעוד שתערובת עשירה מגדילה את אחוז חד תחמוצת הפחמן בגזי הפליטה. מתוך כך ניתן להראות שיש קשר מוחלט בין יחס אוויר-דלק, או חוזק התערובת, והרכב של גזי הפליטה. דבר זה יוזכר בהמשך בהקשר של מדידת יחס התערובת.

מערכת האיוד של מנוע בעירה פנימית עוסקת בתנועת נוזלים וגזים דרך מעברים ונחירים שונים, בהתאם לעקרונות מסוימים. לנוזלים יש נפח וצפיפות קבועים, אולם הגזים יתפשטו ויתכווצו תחת השפעת תנאי לחץ. למשל, נפח מסוים של אוויר בגובה פני הים כמעט כפול במשקלו מאשר בנפח זהה בגובה 20,000 רגל. יש לזכור בהקשר לגזים שיש לדעת את משקל, או מסת הנוזל, בנוסף לנפחו. כיוון שבדרך כלל אין זה מעשי לשקול את הגזים, הדרך הפשוטה היא למדוד את הלחץ הפועל, באמצעות מכשירים מתאימים. אם הלחץ ידוע, ניתן לקבוע את הכמות (מסה) של הגז בנפח ידוע.

המשקל של אטמוספירה כדור הארץ גורם לה להפעיל לחץ על כל העצמים ובכל הכיוונים. בגובה פני הים לחץ זה הינו בערך PSI 14.7. למדידת לחץ זה משתמשים במד לחץ כספית. גובה עמוד הכספית בלחץ זה הינו 29.92 אינץש כספית. הלחצים מוגדרים בדרך כלל ב PSI או אינץש כספית. למטרות מעשיות, יחס ההפיכה בין השנים הינו 1 ל 2 (14.7 ל 29.92). לפיכך, לחץ סעפת של 28 אינץש כספית שווה לבערך PSI 14. כמו כן, יש להתייחס למקרים הבאים:

1. לעיתים מתעוררת מבוכה במדידת לחצים, לאור העובדה שבמספר מקרים נדרש לדעת רק את שיעור הלחץ מעל או מתחת ללחץ האטמוספרי, במקום הערך הטוטאלי המעשי. למשל, מוצהר שמשאבת הדלק מייצרת לחץ של PSI 3 בקווי הדלק, והמחווין המחובר למערכת מצביע על 3 פאונד. למעשה, הלחץ הטוטאלי או המוחלט בקו בגובה פני הים הינו 14.7 פאונד, בתוספת 3 פאונד = PSI 17.7. יש לזכור שלחץ מוחלט כולל את הלחץ האטמוספרי, בעוד שלחץ יחסי מתבסס על ההנחה שלחץ אטמוספרי הינו אפס. במכשירי צינור בורדו, כגון מחווני לחץ דלק ומכשירים רבים אחרים, מודדים לחץ יחסי או דיפרנציאלי.

2. מבוכה נוספת נוצרת כאשר נדרש למדוד לחץ מתחת ללחץ האטמוספרי, הנקרא לעיתים בצורה שגויה לחץ שלילי. למעשה חיווי תת לחץ זה הינם חיוביים בערכם. ריק מוחלט מייצר לחץ אפס, וכל שאר הלחצים מעל מספר זה הינם בהכרח חיוביים. יש לזכור עובדות אלו להבנה ברורה של הלחצים במערכת האיוד. כיוון שהאיוד כרוך גם בתנועה של נוזלים במהירויות שונות, ההתייחסות לקשר בין המהירות ללחץ חיונית גם היא. הגורם העיקרי שיש לבחון בהקשר זה, הינו העובדה שנוזלים בתנועה יעברו שינוי לחץ ביחס הפוך למהירות. כלומר, ככל שמהירות גדלה, תתרחש הקטנה בלחץ הנוצר על ידי הנוזל. משתמשים ביישום של עיקרון זה במכשירים רבים כגון אקדחי ריסוס, מתיזי מים לדודי קיטור ובמאייד. צינור ונטורי (תמונה 15) מספק דוגמה מצוינת ליחס בין הלחץ והמהירות בתנועת האוויר. בדיקת צורת צינור הוונטורי מגלה שכיוון ששטח החתך קטן בצוואר הצינור, המהירות בנקודה זו חייבת להיות גבוהה יותר. עקב המהירות הגבוהה, הלחץ בצוואר הצינור יקטן. בפעולת המאייד, נפילת הלחץ משמשת ליניקת הזרימה לקראת נקודה זו, כך שמושגת תערובת נכונה של דלק ואוויר. שיטות שונות של שימוש בעיקרון זה מיושמות במאיידים מסוגים שונים, אולם בכל המקרים חוקי לחץ הנוזל ומהירות מיושמים בצורה זהה.



תמונה 15

נושא האיוד מקושר עם תכונות והתנהגות האטמוספירה, אשר מספקת את החמצן הדרוש לבעירה. כפי שנאמר קודם, הלחץ האטמוספרי בגובה פני הים הוא PSI 14.7, עם שינויים קטנים בהתאם לתנאי מזג האוויר. ללחץ זה משמעות גדולה ביותר, כיוון שאחד הגורמים החשובים ביותר בוויסות תפוקת ההספק הינו משקל (או מסת) האוויר, שיכול להיכנס לתוך הצילינדרים במשך זמן נתון. הקטנת ההספק בזמן תפעול המנוע בגבהים שמעל פני הים הינו ברור, למרות שנפח אוויר מתאים נינק, מסת האוויר הנצרכת תהיה נמוכה. באותו הזמן, יחס התערובת יהיה בצורה כללית עשיר כתוצאה מהקטנת צפיפות האוויר.

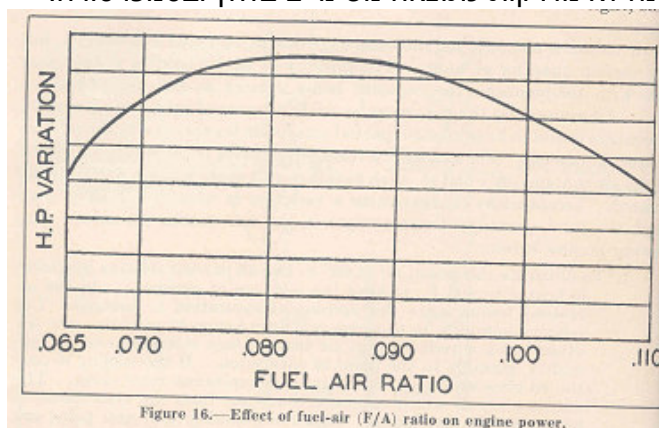
האוויר מכיל לא רק את שני המרכיבים העיקריים, חנקן וחמצן, אלא גם כמות מסוימת של מים. תכולת האוויר להכלת אדי מים משתנה עם הטמפרטורה, התכולה תגדל ככל שהטמפרטורה עולה. אוויר, המכיל את כמות הלחות המרבית האפשרית בטמפרטורה נתונה, מוגדר כרווי. רוויה חלקית מבטאת כלחות יחסית באחוזים. לדוגמה, לחות יחסית של 50% מצביעה שהאוויר מכיל רק חצי מכמות הלחות שיכול היה להכיל אם היה רווי לחלוטין. שינוי טמפרטורה גורמים לשינויים בלחות היחסית, למרות שהכמות הכללית של אדי מים באוויר נשארת זהה. יש להתייחס לדברים הבאים:

1. להדגמת נקודה זו, אוויר בטמפרטורה של 60°F ולחות יחסית של 50% מחומם ל - 80°F ללא תוספת לחות. בטמפרטורה העולה, אחוז הרוויה יורד. הלחות היחסית במקרה זה תרד אל מתחת ל - 50%. מצד שני, הקטנה בטמפרטורת האוויר תגדיל את הלחות היחסית, יתכן ולנקודה הרוויה. אם האוויר ממשיך להתקרר לאחר הגעתו לנקודת הרוויה, ייווצרו משקעי מים. הטמפרטורה שבה הלחות מתעבה ידועה כנקודת הטל. לחות יחסית ונקודת הטל קשורים זה בזה. באופן כללי, לחות גבוהה תגרום לנקודת הטל להיווצר די קרוב לטמפרטורת האטמוספירה. טמפרטורה של 70°F ונקודת טל של 65°F מצביעות על לחות גבוהה, כיוון שבמקרה זה נפילה של 5°F בלבד תאפשר היווצרות משקעי מים. לעתים קרובות ניתן לצפות בהתעבות אדי מים על צידם החיצוני של צינורות מים קרים במזג אוויר רטוב. אם התנאים הם כאלו שמשקעים נוצרים מתחת ל - 32°F, הלחות תובחן בצורה של כפור או קרח. ידוע שצורה זו מתרחשת במספר מערכות איוד תחת תנאי פעולה מסוימים.

2. במהלך תפעול המנוע, נפילת טמפרטורה מוגדרת תובחן במאייד כתוצאה מאיוד מהיר של דלק ביציאה מהנחירים. ידוע שנוזל סופח חום כאשר הוא עובר למצב צבירה של אדים, תכונה זו מבטאת כחום כמוס של איוד הנוזל. כאשר כמות גדולה של נוזל מתאיידת, התהליך מייצר לעתים נפילת טמפרטורה המספיקה להקפיא מים. למעשה, העיקרון המעורב דומה בדיוק לזה של תפעול מקרר. כל אימת שתנאי הטמפרטורה והלחות מופיעים, תתכן היווצרות קרח במעברי המאייד בכמויות מסוכנות.

תערובות דלק ואוויר - מנועי שריפה פנימית רגישים למדי ליחס מטען הדלק והאוויר. באופן כללי, מנועים הפועלים על בנזין ידרשו כ - 15 פאונד של אוויר על מנת לשרוף לחלוטין פאונד אחד של דלק. מכל מקום, יחס תערובת אידיאלית תיאורטי אינו חיוני בכל המקרים. מצבים מסוימים יכולים לדרוש שימוש בתערובות עשירות

או עניות יותר מאשר יחס ממוצע זה. תערובות דלק ואוויר ניתנות להצתה בתערובת עשירה ביחס של 7:1, ובתערובת ענייה של 20:1, אולם ערכים אלו הינם קיצוניים ביותר, ולכן חשיבותם נמוכה. באופן כללי, יחסי התערובות השימושיים הינם בין 11:1 ו- 16:1, הקביעה המדויקת נקבעת על ידי שיקולים של תפוקת ההספק, קירור הצילינדר וגורמים אחרים. יש לזכור, בהקשר של תערובות דלק ואוויר, שהיחסים מבוססים על בסיס של משקל, כיוון שמידות נפחיות של אוויר תהיינה לא מדויקות כתוצאה משינויים בלחץ ובטמפרטורה.



היחס בין ההספק ויחס התערובת נראה היטב על ידי הגרף הדומה לזה שבציור 16. יש לציין שהתערובת להספק מירבי אינה נקודתית, למטרות מעשיות כל יחס בין 0.087 ו- 0.075 מספק הספק זהה. במקרה זה, 0.087 ידוע כתערובת עשירה מיטבית ו- 0.075 כתערובת ענייה מיטבית. תערובת עשירה נורמאלית של המאייד הינה במצב עשיר, ותערובת חסכונית מיטבית (אולם לא בהספק מלא) תושג מיחס תערובת ענייה מ- 0.075. כיוון שכל יחס תערובת מאלה תושג על ידי ויסות ידני של הידית, יש להתחשב בנסיבות שבהן נדרשת קביעת התערובת. למרות שניתנות הוראות מיוחדות

הנוגעות לכל יחס תערובת, ניתן לומר באופן כללי שיש להשתמש בתערובת עשירה בהספק גבוה, ותערובת ענייה יותר רצויה בהספק נמוך לשיוט. כישלון בשמירת ההוראות הניתנות לגבי השימוש בבקרת התערובת, תגרום בקלות לחימום יתר של המנוע ולדטונציה, כל אחד מהם ישפיע על אמינות ואורך חיי המנוע. במקרה של ספק, מומלץ להשתמש בתערובת עשירה.

דרך פשוטה לוויסות ידני של בקרת התערובת הינה להתבונן בקריאת מד הסל"ד במהלך הזזת ידית התערובת. תשומת לב לסל"ד תאפשר חיווי סביר ליחס התערובת.

שיטה זו מכל מקום, אינה ישימה למנועים בעלי מדחף פסיעה משתנה, כיוון שבמקרה זה שינויים ביחס התערובת לא ישנו את קריאת הסל"ד. לכל היותר, שיטה זו הינה הערכתית בלבד, ויש לבחון אותה במהלך שינויים של תנאי התפעול. בכדי לספק חיווי מכשירי מתמשך של יחס התערובת, קיימות שתי שיטות – מדידה ישירה וניתוח גזי הפליטה.

1. מדידה ישירה מחייבת חיווי מתמשך הן של זרימת הדלק והן של זרימת האוויר. ניתן להשתמש במחשבים נפרדים לשתי קריאות אלו, והשוואה של שיעור הזרימה היחסי. יחס התערובת נקבע על ידי בחינה של צריכת הדלק והאוויר. למשל, זרימת אוויר גבוהה וזרימת דלק נמוכה מצביעים על תערובת ענייה, ולהיפך, זרימת אוויר נמוכה וזרימת דלק גבוהה הם חיווי לתערובת עשירה. ניתן לספק סקאלות נפרדות במגמה לפשט את קביעת יחס הדלק והאוויר. מכשירים אלו נותנים תוצאות משביות רצון בתנאי מעבדה, באם מתקנים את השינויים בגובה ובטמפרטורה.

2. ניתוח גזי הפליטה מבוסס על השינויים בהרכב גזי הפליטה בהתאם ליחס התערובת הנשרף בצילינדרים. כפי שהוסבר למעלה, הרכב התערובת ישנה את ההרכב החימי של גזי הפליטה, בפרט את תכולת דו תחמוצת הפחמן וחד תחמוצת הפחמן. כאשר הרכב גזי הפליטה משתנה, החום והמוליכות הטרמית של הגזים ישתנו לרמה כזו, שמכשיר רגיש יגיב לשינויים אלו. באופן כללי, מדגם מסוים של גזי הפליטה עובר דרך תא אנליזה המכיל נגדים, המהווים חלק של מעגל חשמלי. בדרך זו, שינויים בגזי הפליטה יגרמו למכשיר להצביע על השינויים. המחשבים כשלעצמם מכילים בדרך כלל ישירות ביחס אוויר דלק. גורמים מסוימים פרט להרכב התערובת, כגון דטונציה והצתה מוקדמת, יגרמו לחיוויים לא מדויקים, אולם חיוויים כאלו אינם מבלבלים בדרך כלל, אם העקרונות הבסיסיים של המכשיר מובנים.

תערובת לא נכונה תגרום לשינויים מסוימים בביצועי המנוע, ובמקרים רבים תגרום לנזק לחלקי מנוע חיוניים. תערובות עשירות מדי מלוות בהפסד הספק. עשן שחור (פחמן חופשי) יופיע בגזי הפליטה כאשר תערובת עשירה נשרפת, ויופיע חד תחמוצת הפחמן, גז חסר צבע אולם רעיל. ניתן לאפיין את יחסי התערובות השונות לפי צבע הלהבה:

- להבה צהובה ירוקה – תערובת ענייה מאד
- להבה כחולה ירוקה – תערובת ענייה (בקצה הטווח של התערובת המיטבית)
- להבה כחולה, בקרבת הצינור – תערובת טובה מתאימה לשיוט
- להבה כחולה נוצתית – תערובת טובה, אולם עשירה מהנדרש

- להבה כחולה נוצתית, אדומה בקרבת הצינור – תערובת עשירה, אולם משביעת רצון למצירת מלאה
- להבה אדומה ארוכה – תערובת עשירה מדי
- להבה אדומה ארוכה עם עשן שחור – תערובת מאד עשירה

תערובת ענייה מאד תגרום להפסד הספק, ובתנאים מסוימים תגרום לחימום יתר רציני של הצילינדרים. יש להימנע מתערובת ענייה במיוחד כאשר המנוע פועל בסמוך להספקו המירבי, ורצוי מאד לבחון את טמפרטורת ראש הצילינדר כאשר משתמשים בתערובת ענייה. אם התערובת ענייה מדי, עלול להיווצר פיצוץ מוקדם (אש חוזרת) בסעפת היניקה, או שהמנוע יעצור לחלוטין. אין לבלבל בין אש חוזרת ו-Kick-back, אשר הינו נטייה בלבד לשינוי כיוון הסיבוב של המנוע כאשר מתניעים אותו, ושנגרם על ידי קידום הצתה גדול מדי או הצתה מוקדמת. פיצוץ מוקדם נגרם על ידי ידי התפשטות איטית של הלהבה, הנגרמת על ידי תערובת ענייה, כך שהתערובת עדין בוערת כאשר המחזור הושלם (סוף פעימת הפליטה). כאשר שסתום היניקה נפתח להכנסת תערובת טרייה לצילינדר, היא ניצתת מיידית על ידי הלהבה שנשארה בפנים במחזור הקודם. הלהבה מטיילת חזרה דרך מערכת היניקה, ושורפת את כל התערובת. לעיתים עודפי דלק ליד המאייד יוצתו.

בהתנעת מנוע קר, נדרש עודף דלק על מנת שיווצרו מספיק אדי דלק לבעירה. חלק הדלק שאינו מתנדף אינו תורם להתנעה, למעשה, לעיתים חלק זה מזיק, בכך שהוא נוטה להסיר את הסיכה מדפנות הצילינדר, ועל ידי זה מפחית את הדחיסה בצילינדר. כיוון שמרבית דלקי המטוסים מכילים רק לחץ אידי מותן, יש קשיים בהתנעת המנועים בטמפרטורות שמתחת לאפס. השימוש בדלק בעל נדיפות גבוהה להתנעה בטמפרטורות נמוכות יפחית את הקושי, בתנאי שהמפעיל מכיר את תכונות הדלק הזה. בכל המקרים יש לזכור היטב שדלק ונוזלים דומים אינם בוערים במצבם הנוזלי. יש להופכם לאדים או גז ולערבבם עם כמות מתאימה של חמצן, לפני שהבעירה תתחולל.

אידי דלק – למרות שמנועי בעירה פנימית יכולים לפעול על דלק גזי או נוזלי, בדרך כלל נוח יותר להשתמש באחרון. דלקים נוזליים זמינים בכמויות גדולות, והם מכילים מקור חום מרכזי יחסית כיוון שנפח אחד של נוזל ייצור כמה מאות נפחים של אדים. המעבר המהיר של נוזל למצב צבירה של אדים ידוע כאידי.

האידי במערכות האידי מושג כאשר הדלק, היוצא מנחירי המאייד, נע דרך מערכת היניקה. עקב המהירות הגבוהה של האוויר דרך הוונטורי של המאייד, וטבעו הנדיף של דלק מטוסים, תהליך האידי מושג במהירות. כפי שהוזכר קודם, נחוצה ספיגת החום כל אימת ששינוי זה מתרחש, וחום זה נחלץ מהאוויר הזורם דרך המאייד. במקרים רבים, אין זה יוצא דופן שהטמפרטורה בתא התערובת תיפול ב 40 עד 60 מעלות פרנהייט (22 עד 30 מעלות צלסיוס) מתחת לטמפרטורה של האוויר הנכנס, כאשר יש שיעור זרימה גבוה של הדלק. אם האוויר מכיל כמות גדולה של לחות, תהליך הקירור עלול לגרום למשקעים בצורת קרח. משקעים אלו מתחילים בדרך כלל בסביבת המשנק (במאיידים בעלי פרפר משנק) וייבנו לעתים לרמה כזו, שתפעול המנוע יושפע בצורה ניכרת. הקרח יחסום את מעברי המאייד, דבר שיסתיים בהקטנת זרימת התערובת, ובהמשך נפילה בתפוקת ההספק. באם לא יתגלה, מצב זה ימשיך במספר מקרים למצב שהקטנת ההספק תגרום לכישלון המנוע.

למרות שמאיידים ומזרקים מתכננים שונים חופשיים מקשיי התקרחות, הדרך הפשוטה לטפל בזה הינה חימום מוקדם של אספקת האוויר הנכנס למאייד. בדרך זו, חימום מספק מתווסף להחלפת אובדן החום עקב אידי הדלק, וטמפרטורות תא האידי אינן יכולות ליפול לנקודת הקיפאון של המים. הסידור הכללי של חלקים שונים במערכת האידי מופיע בציור 17. מחמם האוויר הינו בעקרון צינור או מעטפת, שדרכה עוברים גזי הפליטה של צילינדר אחד או יותר, וזרימת האוויר על משטחים מחוממים עולה לטמפרטורה הנדרשת לפני כניסתה למאייד. ידית בקרה לוויסות שסתום החימום המוקדם מותקנת בתא, כך שהחימום יכול להיות מיושם רק כאשר נדרש למעשה למניעת התקרחות.

יש להימנע מחימום מתמשך של האוויר בגלל הסיכון הגדל של דטונציה, בפרט כאשר פועלים בתפוקת הספק גבוהה. מד חום תערובת, הממוקם בנקודה של הטמפרטורה המזערית (ציור 17), מסייע רבות בשמירת ויסות חימום מוקדם נכון. כל עוד טמפרטורת התערובת הינה מעט מעל נקודת הקיפאון, אין סכנת קיפאון. שינויים בלחץ הסעפת או גובה דורשים לעתים ויסות מחודש של בקרת החימום המוקדם, במגמה לשמור על טמפרטורה המאייד המתאימה.

בנוסף לחימום המוקדם המתואר למעלה, מנועים רבים משלבים יחידה דומה במעט הממוקמת ביציאה של המאייד והידועה כנקודה חמה (ראה ציור 17). מכשיר זה יכול גם הוא להתחמם על

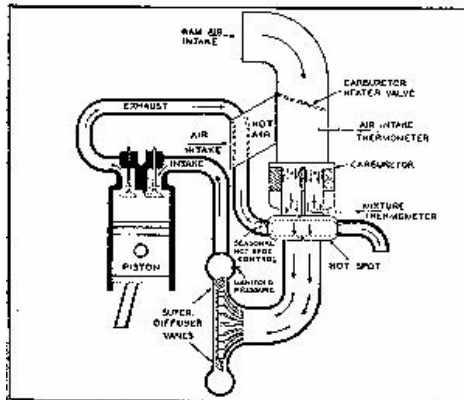


Figure 17- Aircraft engine induction system.

ידי גזי הפליטה, אולם באופן כללי אינו נשלט מהתא. מטרת הנקודה החמה הינה לקדם את האידוי וחלוקת התערובת, ולא בכדי למנוע את הקרחת המאייד.

בנוגע לכל מחממי התערובת, חשוב להבין שטמפרטורות תערובת גבוהות אינן רצויות. חימום יתר יגרום להתפשטות התערובת, ולתוצאה של אובן צפיפות. כיוון שתפוקת ההספק תלויה בראש וראשונה במסת התערובת הניקת לצילינדרים, ברור מאילו שחימום התערובת יוצר אובדן הספק, ובמקרה של מחמם אוויר, יגרם שינוי בתערובת. יתר על כן, טמפרטורת תערובת גבוהה תורמת לדטונציה והצתה מוקדמת, משתיהן יש להימנע בתפעול מנוע מטוס. בנוסף לפעולת מחממי התערובת, יש גורמים אחרים כגון מצבי חום ופעולת הדיחוס של המגדשים, היוצרים גם הם הגדלה ניכרת בטמפרטורת התערובת.

פילוג התערובת – לאחר שהתקבל יחס תערובת ואידוי נאות, יש לחלק את מטען הדלק בצורה שווה לצילינדרים השונים, בכדי להשלים את תהליך האידוי. צעד אחרון זה חשוב לא רק מנקודת מבט של הספק ונצילות, אלא גם בגלל שהוא משפיע על תפעול חלק. הבעיה בהשגת פילוג טוב קשה, בראיה של תכנוני מנוע שונים וסידורי הצילינדרים, שכל אחד מהם מחייב לימוד מיוחד.

במנועים ללא מדחסי גידוש פנימיים, שיקולים של גורמים, כגון מספר הצילינדרים, סידור הצילינדרים וסדר ההצתה, הינם בעלי חשיבות עליונה, המטרה הינה להבטיח אספקת כמות נאותה של מטען לכל צילינדר. במנועים אלו, התקנה של צנרת מאייד נפרדת לכל שלושה צילינדרים נותנת תוצאות טובות. מאיידים בעלי זרימת מטה, שבהם האוויר נכנס בראש המאייד ונע לכיוון מטה, הינם בשימוש כללי כמעט בכל מנועי הבנזין הגדולים.

פיתוח מנועים רדיאליים למטוסים מציג בעיות בפילוג, שהיה קשה להתגבר עליהן עם מערכות המאיידים השגרתיים. כתוצאה מכך הותקנו במערכת היניקה מאיצים, שמפלגים בצורה מכאנית את המטען דרך מעברים מתאימים לצילינדרים. בנוסף לפילוג הנאות, מערכות יניקה מסתובבות אלו יכולות לשרת גם כאמצעי להגברת זרימת המטען, מעבר לכמות שהייתה ניקת על ידי יניקת הצילינדר בלבד. במלים אחרות, המאיצים הופכים למגדש פנימי יעיל, כאשר מופעל במהירויות גבוהות. כאשר מותקן מדחס גידוש למהירות גבוהה, נדרש לספק מכשיר לחייוי לחץ הסעפת, כיוון שלחץ זה במקרים רבים יחרוג בצורה ניכרת מהערך של גובה פני הים (29.92 אינטש כספית).

מחוון לחץ סעפת, המותקן במנועים בעלי מדחס גידוש, רושם את הלחץ המוחלט, וכך מספק אמצעי נוח לחישוב תפוקת ההספק בכל סל"ד נתון. בהקשר זה, יש להבחין שמנוע ללא מדחס גידוש אינו מסוגל לפעול בלחץ סעפת גבוה מבערך 29 אינטש כספית, וכך הוא מוגבל בהספק על ידי לחץ מירבי זה. מנועים רבים בעלי מדחס גידוש, מצד שני, מופעלים לעתים בלחץ סעפת של 40 עד 50 אינטש כספית עם גידול יחסי בתפוקת ההספק. לחצי הסעפת יכולים לגדול עוד, בתנאי שיפוחתו דלקים עמידים בפני דטונציה (מספר אוקטן). שום גורם אחר אינו יעיל כל כך בייצור מנועים בעלי הספק גבוה כמו שלמות של מדחסי הגידוש, להגברת הצפיפות של המטען הניק.

כאשר מנצלים לחצי סעפת גבוהים, רצוי לעתים להאריך את פעימת היניקה על ידי פתיחת שסתום היניקה מוקדם מאד במחזור; למעשה, שסתום היניקה נפתח לעתים הרבה לפני נקודה מתה עליונה, כאשר שסתום הפליטה עדיין פתוח מהמחזור הקודם. נוהג זה מותר, כיוון שעם לחץ סעפת גבוה, המטען יכול לזרום לצילינדר לפני שהבוכנה מתחילה דרכה למטה. עיתוי זה, הידוע כחפיית שסתומים, יגרום להגדלה ניכרת בהספק במהירויות גבוהות. החיסרון העיקרי של חפיית השסתומים, הינו העובדה שבמהירויות נמוכות תתרחש זרימה חוזרת של גזי הפליטה, שיגרמו לפעולת סרק גסה יחסית.

הגדלת הספק קטנה מושגת לעיתים על ידי שימוש בפתח כניסה למאייד הפונה לכיוון הטיסה, דבר הידוע כאוויר מגח. במטוסים בעלי מהירות גבוהה, הגדלת הלחץ יכולה להסתכם ב – 30 עד 40 אינטש מים (2 עד 3 אינטש כספית), דבר המייצר הגדלת הספק של כ – 6%. רווח זה, אף שהוא זעיר, שווה כיוון שההתקנה פשוטה ביותר.

מבנה המאייד ותפעולו – הסיבה למורכבות ועדינותו של המאייד נעוצה בדרישות הבלתי רגילות, הנכפות על ידי מנועי המטסים תחת תנאי התפעול השונים. המאייד חייב לספק זרימת דלק מדודה ומדויקת לכל מצבי המהירות והעומס של המנוע, ולספק תיקוני תערובת אוטומטיים וידניים לגובה ולטמפרטורה. כמו כן, המאייד חייב להיות תלוי בשירות ויציבות בכיול, בכדי לקדם את מירב הנצילות והבטיחות. התכנון חייב להיות כזה שהאצה, תמרונים ומצבי התקרחות לא ישפיעו בצורה חמורה על תפעול נורמאלי. היחידה, בהכרח, בנויה ממספר שסתומים, מזרקים, נחירים, מחטים, מחברים וחלקים דומים.

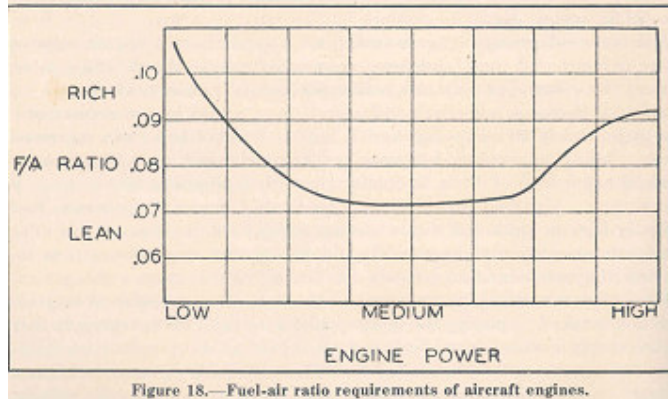


Figure 18.—Fuel-air ratio requirements of aircraft engines.

תמונה 18 מראה עקומת יחסי תערובת נדרשים בכל מהירויות המנוע, מסרק עד הספק מלא. בדיקת העקומה מגלה שתערובת עשירה נדרשת במהירויות נמוכות, וככל שההספק גדל, התערובת ענייה יותר, לחסכון טוב יותר. מכל מקום, בנקודה מסוימת בטווח השיט המהיר, העקומה עולה בפתאומיות, דבר המצביע על תערובת עשירה. העשרה זו נדרשת בכדי למנוע

חימום יתר ודטונציה. סמוך להספק המלא, התערובת חייבת להיות עשירה ככל האפשר, בהתאם לבעירה הנאותה ותפעול חלק. כיוון שמשתמשים בהספק מלא למשכי זמן קצרים יחסית, תצרוכת הדלק הגבוהה אינה דבר רציני. באופן כללי, יש להפעיל תערובת ענייה בזהירות, כאשר מתפעלים מנועי מטוסים בתפוקת הספק גבוה.

בכדי לעמוד בדרישות התערובת של המנוע בכל המצבים, נדרשים חלקים מורכבים רבים ביחידת המאיד. במרבית המאיידים, הדלק מסופק תחת לחץ במעברי הכניסה לתא אספקה או בקרה. תא זה יכול להכיל מנגנון מצוף או דיאפרגמה כמתואר בציור 19.

כל סידור יהיה משיע רצון במהלך תפעול נורמאלי של המנוע, אולם מאייד מטיפוס דיאפרגמה יעיל יותר במצבים שונים, ובמהלך תמרון המטוס. מאייד בעל מצוף מאפשר זרימת דלק עודפת, והצפה אפשרית, כאשר המאייד הפוך. יש לציין שאין חלל אוויר בתא הדלק עם מנגנון הדיאפרגמה, ולפיכך לא יתרחשו פעימות לחץ. כיוון שנדרשים שסתומי משנק במערכת הניקה, נהוג לשלבם ביחידת המאיד. המצערת מספקת אמצעי לוויסות צריכת האוויר במנוע, ולפיכך מבקרת את תפוקת ההספק. במספר מאיידים, פעולת המצערת מבקרת את זרימת הדלק מנחירי הסרק בטווח מהירות נמוכה. תמונה 19 מתארת את מנגנון פרפר המצערת המשתנה בונטורי. לפי תכנון הוונטורי המשתנה, נפילת לחץ משמעותית נשמרת בכל מהירויות המנוע, כך שנמנע הצורך במערכות מידוד תלויות סרק. בנוסף, סוג זה של יחידת מידוד דלק מראה נטייה קטנה בלבד להתקרחות המאייד, אם תוכננה כראוי.

הדלק, שנמדד דרך פומיות המאיד, משוחרר לזרם האוויר בהרבה דרכים, כפי שנראה בציור המלווה. באופן כללי, יש התקנות להשגת ערבוב נאות של הדלק והאוויר, במטרה להבטיח מטען אחיד בעל אידוי טוב. נחירי מידוד מסובכים במיוחד לא נמצאו בעלי ערך מיוחד בשיפור פילוג הדלק, והם מדאיגים לעתים במהלך השירות שלהם.

העשרת תערובת האוויר-דלק בהספק גבוה, מושגת בתכנון המאיד על ידי שילוב של אמצעי עזר למידוד דלק. אמצעים אלו ידועים באופן שונה כהתקני חיסכון, פומיות מהירות גבוהה, פומיות העשרה, מפצי הספק וכו'. ללא קשר לשם, כל היחידות הללו משרתות את אותה המטרה. הפעולה שתפעיל את פומיות העשרה יכולה להיות חיבורי המצערת, לחץ סעפת, זרימת דלק, זרימת אוויר, או אמצעים משניים מסוימים אחרים. בכל מקרה, זרימת הדלק ממערכת המהירות הגבוהה מתווספת לזרימה הבסיסית ממערכת המדידה הראשית, במטרה ליצר את יחס הדלק-אוויר הנכון לתפעול בהספק מירבי.

לצפיפות האוויר הנמוכה בגבהים יש השפעה מוחלטת על תפעול המאיד. בנוסף להפסד הספק המנוע, התערובת הופכת לעשירה, כיוון שהמאיד מכיל בצורה נורמאלית לפעולה בגובה פני הים. כיוון שתערובות עשירות במיוחד גורמות הפסד נוסף להספק, ומעלות את צריכת הדלק, נדרשת שיטה לבקרת התערובת.

בקורות תערובת ידניות ואוטומטיות הם בשימוש נפוץ, שתיהן פועלות על העיקרון של יניקה חוזרת. בקרה ידנית ליניקה חוזרת של התערובת פועלת על ידי הקטנת הלחץ ההפרשי בין תא האספקה והנחיר. כאשר הבקרה במצב עשיר מלא, לחץ אטמוספרי נורמאלי מופיע בתא האספקה, וכוח מידוד מלא מסופק לפומיות. על ידי ויסות שסתום הבקרה לתערובת ענייה, לחץ מופחת מועבר מהוונטורי לתא האספקה, שבעקבותיו הפחתה בזרימת הדלק. חיבורים מתאימים מחברים את בקרת התערובת על המאיד לידית הפעולה בתא הטייס. כמו כן, בקרת יניקה חוזרת משלבת סידור הידוע ככיבוי (idle cut-off). כאשר הידית ממוקמת במצב כיבוי, לחץ נמוך מאד מועבר לתאי האספקה, והתוצאה היא הפסקה מוחלטת של זרימת הדלק. המנוע יעצור מידית, ללא נטייה להצתה מוקדמת או מאוחרת.

בקרת תערובת אוטומטית פועלת על אותו העיקרון כמו הבקרה הידנית, אולם אינה דורשת תשומת לב מיוחדת מהטייס. מנגנון ההפעלה מורכב ממפוחים אטומים שמגיבים לשינויים בלחץ ובטמפרטורה של האוויר הנכנס למאיד. בגובה נמוך, שסתום מחודד נמצא מחוץ לתושבתו, כך שמאפשר כמות מתאימה של זרימת דלק. עם העלייה בגובה, הלחץ המופחת גורם למפוחים להתפשט, והשסתום מתקרב לתושבתו בכדי לאפשר פיצוי לתערובת הנכונה. האמצעי לתיקון הטמפרטורה מושג על ידי איטום כמות מסוימת של גז בתוך המפוחים.

במספר מאיידים מסופק מצב בקרה אוטומטי יחיד; בעוד שעל שני האחרים משתמשים בשני מצבים, הידועים כ"אוטומטי עשיר" ו"אוטומטי עני". קביעת המצב האוטומטי עני היא היחס הנמוך ביותר בקירוב של אוויר-דלק שניתן להשתמש בו במרבית המצבים הרצויים של תפעול המנוע, כלומר הספק שיט נורמאלי. צריכת דלק נמוכה אפשרית במצב זה, ובאם גורמים אחרים נכונים, המנוע יפעל חופשי לחלוטין מדטונציה וחימום יתר. עשיר אוטומטי מסופק לתפעול מנוע בתפוקות הספק גדולות יותר, ובהמראה בגובה רב יותר. הבקרה לשילוב בקרת תערובת ידנית ואוטומטית תכיל התקן למצבי עשיר מלא, עשיר אוטומטי, עני אוטומטי וכיבוי. סדר המצבים המדויקים ישתנה במאיידים השונים, אולם העיקרון הכללי הוא דומה.

בכדי לאפשר תגובת מנוע נאותה לפתיחה פתאומית של המצערת, נכללות משאבות החשה כמעט בכל המאיידים. קיימות שתי שיטות הפעלה, שיטה אחת מופעלת מהחיבורים המכאניים, בעוד שהשנייה מגיבה לשינויי לחץ במעברי המאייד. בתכנון נכון, כל שיטה תספק כמות מתאימה של מטען במהלך ההחשה, בכדי לאפשר תפעול חלק וחיובי של המנוע. במצב קבוע של המצערת, משאבת ההחשה אינה מספקת דלק. הבחנה חשובה בין שתי השיטות היא שבשיטת החשה על ידי המצערת ניתן לשאוב דלק גם כשהמנוע אינו פועל, בעוד שהשיטה השנייה לא תגיב אלא אם המנוע פועל.

יחס דלק-אוויר המועבר על ידי המאייד במצב שיט, או בטווח ההספק, נתון לשינוי על ידי בקרת התערובת של הטייס בלבד. לא נכללים שום ויסותים נוספים בגלל הסכנה לכישלון מנוע עקב תערובת לא מתאימה. כל מצב מאייד נבדק בדיוקנות, ובדרך כלל לא יידרש כיוול נוסף במהלך השירות. מכל מקום, עקב השונות במנועים, אין זה נהוג לכלול מצב קבוע לתפעול במהירות סרק. במצב זה נדרשים בדרך כלל שני ויסותים, אחד למהירות סבוב בסרק והשני לתערובת בסרק. בקרת המהירות היא בצורה של ויסות מעצור מצערת, אשר יכול להיקבע למתן סל"ד נמוך יחסית שישמור על תפעול אמין וחלק של המנוע. ויסות התערובת המתאימה נקבע על ידי ניסוי בפעולת המנוע. על ידי השילוב בין שני הוויסותים, מושג תפעול סרק משביע רצון. מאייד מטוסים זמינים במספר רב של סוגים, דגמים וקיבולות, אולם ארבעה עקרונות כלליים מנוצלים. על מנת לפתחם, סוגים אלו מסווגים כטיפוס מצוף, טיפוס דיאפרגמה-ונטורי משתנה, טיפוס מידוד-לחץ וטיפוס צפיפות-מהירות.

המאייד מטיפוס מצוף (ציור 19) נמצא בשימוש נרחב על הרבה סוגי מנועים. דיוק המידוד של תכנון זה הינו משביע רצון למדי בתנאים נורמאליים, אולם הוא אינו אמין במהלך תמרונים, ורגיש להיווצרות התקרחות.

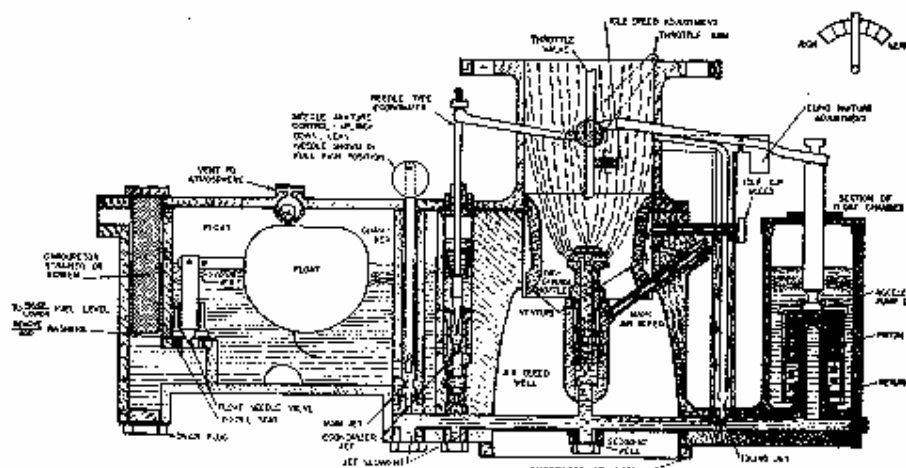


Figure 19.—Schematic view of single-barrel, NAR series, carburetor (full-throttle position)

מאיידים מטיפוס מצוף מיוצרים בהרבה דגמים ייחודיים ומשולבים בהם בדרך כלל מערכות מידוד לסרק ורגיל. **תפקוד המאייד** - באופן כללי, תפקוד המאייד מחולק לארבע פעולות והן: (א) סרק, (ב) החשה, (ג) שיט, ו - (ד) מצערת מלאה.

א. **סרק** - להתנעת מנוע, הפעולות הראשוניות המורכבות מפתיחת ברז הדלק, תיחול הסעפות, סיבוב המפתח והתנעה, יש מעט מאד השפעה על המאייד, למעט משיכת דלק ממערכת הסרק. זאת בגלל העובדה שפרפר המצערת סגור למעשה, ומרבית הלחץ השלילי, הנוצר על ידי פעולת השאיבה של הבוכנות בתוך הצילינדרים במהירות סיבוב נמוכה, פועל על צינור הסרק.

הדלק זורם מהמיכל דרך מסנן המאייד, דרך המחט ותושבתה, ודרך מערכת המידוד הראשית לפומית הסרק. במהלך פעולת ההתנעה, הדלק נמשך מתא צינור הסרק לפומית הסרק. הלחץ השלילי בקצה צינור הסרק

מושך אוויר מאחורי הוונטורי, שם הוא הכי פחות מופרע, דרך צמצמי המידוד של אוויר הסרק, אל החלל שמעל פומית הסרק. שם הוא הופך את הדלק לתחליב ומכינו לאידוי.

מהירות הסרק של המנוע מבוקרת על ידי זרימת האוויר החולפת את שסתום הפרפר, נפחה נשלט על ידי קביעת בורג הוויסות למהירות הסרק. התערובת מווסתת ליצירת פעולת מנוע חלקה על ידי הזזת המנוף לצד התערובת העשירה או הענייה. הצד העשיר יאפשר פתיחה גדולה יותר החשופה ללחץ השלילי, והצד העני פתיחה מוקטנת. סיבובי הסרק של המנוע צריכים להיות מהירים מספיק בכדי למנוע עצירתו במהלך גלישה, אולם לא מהר מדי בכדי שמהירות הגלישה של המטוס לא תגדל יותר מדי. התערובת חייבת להיות עשירה מספיק בכדי לפצות על קירור עודף של המנוע, או נזילות אוויר קלות, עקב בלאי מובילי השסתומים או חופש בבורגי החיבור של מערכת היניקה.

במקרה של נזילת אוויר משמעותית, סיבובי הסרק של המנוע יהיו קרוב לוודאי מהירים, או שהמנוע לא יסתובב כלל. במצרת פתוחה, הנפח הקטן של האוויר הניק, בהשוואה לנפח הכולל הנצרך, משפיע כמו נזילת אוויר קטנה שכמעט ולא שמים לב אליה. נזילות קטנות בצינורות יניקה מסוימים יכולות לגרום לדטונציה של הצילינדר המסוים, ובעקבותיה שריפת השסתום.

ב. *החשה* – אוויר, אשר נמצא בלחץ אטמוספרי מחוץ לכונס האוויר, נכנס למאייד כאשר המצרת נפתחת ועובר דרך הוונטורי למלא את היניקה הנוצרת על ידי תנועת הבוכנות בצילינדרים. לחץ שלילי, המקיף את הנחירים, נוצר על ידי זרימת האוויר דרך הצוואר או החלק הצר של הוונטורי. דבר זה מושך אספקה מיידית של דלק מתא ההחשה המיועד למטרה זו. מערכת הסרק פועלת עד לבערך 1000 סל"ד. מייד לאחר מכן הדלק מתחיל לזרום דרך הפומית הראשית. כאן הוא מתערבב באוויר, אשר זורם מאחורי הוונטורי, דרך זרימת האוויר הראשית.

ג. *שיט* – התפעול בשיט דומה למצב הקיים בסוף ההחשה. תא ההחשה חצי ריק. אוויר זורם דרך מעבר האוויר למיסוס הדלק. דבר זה מסייע לאידוי כאשר חלקיקי הדלק נמצאים בקצה הנחיר. מערכת הסרק אינה פועלת כבר, כיוון שהמשנק נמצא כעת במצב פתוח מספיק על מנת להקטין את הלחץ השלילי מעל צינור הסרק.

ד. *מצרת מלאה* – כאשר נדרש הספק מלא, פותחים את המצרת במלואה (או ללחץ סעפת שנקבע מראש במנועים מגודשים), וזרימת האוויר המוגדלת דרך צינור הוונטורי יוצרת הפרש גדול יותר בלחץ האוויר בין קצה הנחיר ותא המצוף. שארית הדלק מתא ההחשה נמשכת גם היא, ואוויר מורשה להיכנס דרך מערכת הסרק. נפילת הלחץ הגדולה בסמוך לקצה הנחיר יוצרת זרימה גדולה מדי של דלק דרך הפומית הראשית, מסיבה זו האוויר ממערכת הסרק מתווסף לזה של הכניסה הראשית, למניעת תערובת עשירה מדי. אם התערובת הייתה עשירה מדי, הספק המנוע עלול היה לקטון בצורה ניכרת. תערובת עשירה קמעה נחוצה לסייע בקירור המנוע, על ידי הדלק בתפוקת ההספק המירבי.

התיאור הנ"ל של פעולת המאייד מתייחס לגבהים מתחת ל – 6,000 רגל, שבהם ויסות ידני של התערובת אינו נדרש (*הערת המתרגם: בארץ נהוג לדלל תערובת מעל 3000 רגל*). לפיכך, שסתום בקרת התערובת פתוח לרווחה ומאפשר לחץ אטמוספרי חופשי על הדלק בתא המצוף. מעל הגובה הקריטי, כאשר נדרש שימוש בבקרת התערובת, פתח שסתום הבקרה יקטן, אם נדרש, בכדי לייצר תערובת ענייה. דבר זה מבטיח ביצועי מנוע מרביים, ללא חימום יתר לא רצוי של הצילינדרים. במלים אחרות, התערובת חייבת להיות עשירה מעט. כאשר הבקרה במצב עני חלקית, והמטוס נוסק בצורה חריפה, יש פיצוי על שינויים קטנים על ידי מעברי הלחץ החוזר שהוזכרו קודם. אם מעבר זה יהיה חסום על ידי משקעי פחם עקב פיצוצים מוקדמים (אש חוזרת) תכופים, ויסות התערובת לא יהיה קבוע ופעולת המנוע תהיה מעט לא יציבה.

מערכת הזרקה

כללי - במספר נושאים, פיתוח מנועי מטוסים הושפע על ידי תכנון מנועי שריפה פנימית שהיו מיועדים למטרות אחרות. דבר זה מתייחס בעיקר לצידוד האידוי שבשימוש מנועי רכבים. העקרונות הבסיסיים המעורבים בתפעול מאידי מטוסים דומים מאד לאלו של מאידי רכבים, עם מעט מאד יוצאים מהכלל. עם התקדמות התעשייה, יושמו שינויים ושיפורים רבים, אולם הפריטים הסטנדרטיים (כגון מצופים, פומיות, שסתומי מחט, ונטורי וכו') הם חלקים חיוניים בכל המאיידים. לפיכך, אחרי הרבה שנות פיתוח, מאייד המטוס נשאר בבסיסו ללא שינוי, ועקב כך עדיין פתוח לביקורת כאשר מורכב במנועי מטוסים מודרניים. הכישלונות העיקריים של מאייד מטוס הינם הרגישות לתמרונים שונים הנדרשים ממטוס, והנטייה לאפשר היווצרות קרח במאייד בתנאים מסוימים. כיוון שפגמים אלו הינם אינהרנטיים למרבית המאיידים, ולפיכך קשה להתגבר עליהם, הוחל בתכנון ופתוח של מזרקי דלק מכאניים. צעד זה מסמן את אחד השיפורים המהותיים במנועי מטוסים בשנים האחרונות (*לפני ששים שנה, כזכור*).

לאור העובדה שמזרק הדלק שונה לחלוטין בעיקרון פעולתו מהמאייד, שאותו הוא מחליף, נדרשה הרבה עבודת ניסוי להתאמת המזרק למנוע המטוס. לאחר ניסוי מעבדה ותפעול על מנועי צילינדר אחד, נבנו מזרקים להתקנה על מנועי מטוסים מנוגדים ליישום אזרחי, ולמנועים רדיאליים בעלי תשעה צילינדרים לשימוש צבאי. הצבא צייד מטוסים במזרקים, שהורכבו עם מעט מאד שינויים במנוע, ומבחינים משביעי רצון בוצעו במטוסים אלו. התקבל מידע מספק מהמבחינים, שאפשרו תכנון מחדש לחטיבות האביזרים של המנוע, לדגמים מסוימים, לשימוש ייחודי של ציוד הזרקת. התקנה שכזו מאד קומפקטית ומסודרת בצורה כזו שחיבורי הבקרה הם פשוטים וישירים.

עקרונות הפעולה – המונח "הזרקת דלק" נותן לעיתים את התחושה שהציוד הזה הופך את המנוע לעקרון פעולה של מנוע דיזל. זה לא בהכרח המקרה, כיוון שבמנוע דיזל הדלק מוזרק ישירות לתוך הצילינדר קרוב לסוף פעימת הדחיסה, בעוד שהמזרק הנדון מחליף את המאייד בלבד על ידי אספקת דלק לתוך מערכת היניקה בזמן המתאים. כאשר הדלק המסופק נכנס לצילינדרים, דחיסה, הזרקת ובעירה מתבצעים באותה הצורה כמו בשימוש במאייד.

המטרה של מערכת הזרקת דלק היא לספק כמות מדודה של דלק לתוך כל צינור יניקה (אחד לכל צילינדר) במהלך חלק מפעימת היניקה של הצילינדר המסוים, ולהמשיך לספק מטען דלק דומה לכל הצילינדרים בסדר המתאים לסדר ההצתה של המנוע. להשגת תהליך זה, למזרק מסופק לחץ יציאה לכל צילינדר. נחיר ממקום בכל צינור יניקה, כך שהדלק יכול להיות מותז לתוך מערכת האוויר במקום המתאים, או בתוך כל צילינדר. לימוד מושלם של מערכת הזרקת דלק דורשת תחילה הבנה של זרימת האוויר במערכת היניקה של מנוע בתנאי פעולה שונים.

למרות שפעימת היניקה נחשבת לעיתים כמעסיקה 180° של מהלך של גל הארכובה במנוע ארבע פעימות, רצויות מספר סטיות. במספר תכנונים, פעימת היניקה הוארכה במתכוון על ידי פתיחת שסתום היניקה מוקדם וסגירתו המאוחרת; דבר זה משותף במנועים מודרניים בעלי הספק גבוה. במהלך החלק המוקדם של הפעימה, יש האצה הדרגתית בזרימת האוויר לתוך הצילינדר, המגיעה למהירות המירבית בערך ב 70° או 80° אחרי נקודה מתה עליונה. ולהיפך, במהלך החלק האחרון של הפעימה, זרם האוויר מאט עד אשר המהירות קרובה לאפס, כאשר שסתום היניקה סגור. היחס הרצוי בין זרימת הדלק והאוויר במערכת הזרקת דלק הינו כזה שזרימת האוויר מתחילה לפני שהדלק מוזרק, וממשיכה לפרק זמן אחרי שההזרקת הסתיימה. יחס זה בין זרימת הדלק והאוויר נמצא משביעי רצון מאד בהבטחת אידי מושלם ופיזור מטען הדלק. ברור שמצב זה מצריך תיאום עיתוי ההזרקת למנוע באופן דומה כמו שפעולת השסתום וההצתה מתואמים לגל הארכובה. מכיוון שמנועי מטוסים פועלים בטווח מהירויות של 400 עד 3,000 סל"ד, נדרש לייצור שיטה לבקרת תצורות דלק-אוויר בכדי לעמוד בדרישות המנוע בטווח זה. במערכת הזרקת דלק, תצורות אוויר נשלטת בדרך השגרתית על ידי תפעול ידני של משנק המצערות בכניסת האוויר, ותצורות הדלק נשלטת על ידי העברת כמות הדלק הנדרשת בכל פעימה על ידי המשאבות במערכת ההזרקת. על ידי קישור מתאים של מצערת האוויר ומנופי פעימת המזרק, מושג ויסות המהירות, ויחסי אוויר דלק נאותים נשמרים. מדחס הגידוש הצנטריפוגלי, הנדרש בכל מנועי מטוסים מודרניים גדולים, נשאר ללא שינוי במערכות ההזרקת, למעט הטיפול באוויר במקום תערובת אוויר ודלק במערכת האיזוד.

מזרק דלק טיפוסי מורכב מחלקים שונים כגון מסננים, משאבות וזיזים, המסודרים בצורה כזו שתפוקת המשאבה יכולה להישלט על ידי מנוף חיצוני. הדלק מועבר ראשית למתקן בקרה אשר יכול להיות חלק מהמזרק, ומשם לטובלן המזרק, על ידי משאבת דלק סטנדרטית בלחץ משוער של PSI 0-20. משם הדלק מובל לתוך משאבות המזרק, ומשוחרר על ידי פעולת הזיז לפתח המתאים המוביל לנחיר. סידרה מתמשכת של פעימות דלק מתבצעת על ידי המזרק בסדר מתאים, כך שכל נחיר מקבל את הכמות הנאותה של דלק בנקודה המתאימה במחזור שלו. לחץ הדלק בקווים המובילים לנחירי ההזרקת גבוה במהלך הפעימות (50 עד PSI 800), מותנה בהתנגדות של הנחיר ומערכת ההזרקת הספציפית שבשימוש. בין פעימות ההזרקת, קווי הלחץ הגבוה ממולאים לחלוטין בדלק, אולם הנחירים נשארים סגורים עד שהפעמה הבאה נדרשת. המזרק מותקן בחטיבת האביזרים של המנוע ומקבל את הסיכה שלו ממערכת השמן של המנוע. לעיתים מסופקים מצמדי הנעה מיוחדים, כך שיש וידוא לעיתוי נכון, באם מזרק חייב להיות מוסר או מוחלף.

יחידות נחירי ההזרקת ממוקמות בדרך כלל בפתחים נמוכים בצנרת היניקה, כאשר ההזרקת מתבצעת בצנרת היניקה; מכל מקום, במקרה של מנוע מנוגד קטן, ההזרקת מבוצעת בסמוך לפתחי השסתום. דסקית נחיר שכבתית מורכבת, בכדי למנוע מהדלק לזרום שלא בעיתוי הנדרש, עם זרימת האוויר דרך צנרת היניקה. לחץ הנחירים הוא כזה שנדרש לחץ לפתוח אותם, וכאשר מועד הפעולה חלף, הם נסגרים מיידית. דלק עוזב את נחירי ההזרקת בריסוס עדין, פוגע בטבעת ההטיה, אשר מטה את הדלק מטה לכיוון האוויר הנכנס. אז הוא מכונן אל פתחי היניקה של הצילינדר בכיוון זרימת האוויר. מהירות האוויר הגבוהה תורמת לאידי מהיר ומושלם של מטען הדלק. שוב, חשיבות עיתוי ההזרקת מודגשת, כיוון שאידי שכזה יתרחש רק כאשר הדלק מוזרק

בעת שמהירויות האוויר מספיק גבוהות לקבלת מטען הדלק. כאשר ההזרקה מתבצעת ישירות לצילינדרים, התהליכים דומים באופן כללי לאלו המתוארים בשיטה האלטרנטיבית של הזרקה לצנרת היניקה.

מערכת הבקרה – הגורמים הבאים קובעים את מערכת הבקרה:

א. כפי שהוזכר קודם, מערכת ההזרקה מחייבת שתי בקורות, אחת לשליטה בתצרוכת האוויר, והשנייה לוויסות הזרקת הדלק. תנועות קדימה ואחורה של כפתור הבקרה מפעילות את שתי הידיות באותה מידה, וכך שולטות על תפוקת ההספק של המנוע. במהירות סרק, מצערת האוויר כמעט סגורה, והמזרק מזריק כמות קטנה של דלק. אולם, ככל שהמצערת נפתחת, הן זרימת האוויר והן זרימת הדלק גוברות באותו היחס בקירוב. נדרשת פיקה במנופי מצערת האוויר בכדי להבטיח יחסי אוויר-דלק מתאימים בכל מהירויות המנוע.

ב. ניתן להשיג בקרה נפרדת לזרימת האוויר או הדלק בכדי לקבל את הדרישות להתנעה, כיבוי ותפעול בגובה. דבר זה דורש שידית בקרת הדלק תזוז, מבלי להפריע לקביעת מצערת האוויר, כך שהתערובת תהיה עשירה או ענייה. הבקרה בתא מתוכננת למלא תנאים אלו. הכפתור על ציר הבקרה יכול להסתובב להגדלת או הקטנת זרימת הדלק, ובכך לשלוט ביחס התערובת. סידור זה מחליף את בקרת התערובת הנפרדת שבשימוש במאיידים.

ג. כפתור בקרת ההזרקה מצויד באמצעי נוח להתנעה או כיבוי מנוע, בנוסף לפונקציה שלו כבקרת גובה או בקרת תערובת. בהתנעה, מצערת האוויר נשארת כמעט סגורה, אולם יציאת המזרק גדלה לאספקת התיחול על ידי מיקום כפתור הבקרה במצב עשיר. לכיבוי מנוע, הכפתור מסובב למצב תערובת ענייה. דבר זה גורם למנוע לעצור מייד לחלוטין, ללא הצתה מאוחרת, ולפנות ביעילות את הצילינדרים משאריות תוצרי הבעירה.

ד. למרות שמערכת בקרה ידנית נותנת תוצאות משביעות רצון כשמתופעלת כיאות, מערכת בקרה אוטומטית רצויה מאד. בקרה כזו תווסת את המזרקים בהתאם לצריכת האוויר של המנוע בכל גובה או מהירות, ובכך תשחרר את הטייס מתפקיד קשה. יתר על כן, בקרה אוטומטית תגן על המנוע מפני תוצאות חמורות, הנובעות מוויסות לא נכון של כפתור הבקרה הידנית.

יתרונות הזרקת דלק – עם התקדמות הניסויים בהזרקת דלק, הוכח, שבנוסף להסרת בעיות מסוימות המשותפות למאיידים, יש יתרונות אפשריים נוספים. הנקודות העיקריות לטובת הזרקת דלק הן כדלקמן:

א. פעולת ההזרקה אינה מושפעת ממצבים קריטיים או תמרוני מטוס חריפים. דבר זה ברור כיוון שהמזרק אינו מכיל שסתומי מחט או מצופים רגישים.

ב. מושגת הגדלת הספק ותפעול חסכוני. דבר זה הודות לעובדה שאין מגבלות כגון חימום, צינורות ונטורי, וכו' שנדרשים במעברי היניקה. מפעילים יניקת אוויר מגח מלאה. טמפרטורות תערובת נמוכות במצבים מסוימים תורמות להגדלת ההספק, ומפחיתות את הסכנה של דטונציה.

י. מערכת הצתה

כללי

תפקיד מערכת ההצתה לספק ניצוץ להצתת התערובת בצילינדרים, בזמן הנכון ביחס למהלך הבוכנה, במטרה לאפשר התנעה ואת מאפייני תפוקת ההספק מהמנוע. מערכות הצתה מחולקות לשני סוגים: (א) מערכת הצתה הפועלת על ידי מצבר, ו- (ב) מערכת הצתה על בסיס מגנטו. שתי המערכות מכילות את מקור האנרגיה החשמלית, סליל השראה, יחידת נתק, קבל חשמלי, אמצעי לפילוג הזרם למצתים, מפסקי בקרה וחיוט נדרש. לשתיהן יש מיסוך להקטנת הפרעות לרדיו. מערכות ההצתה מסווגות גם כ- (א) מערכות הצתה בודדת ו- (ב) מערכות הצתה כפולה. מערכת ההצתה הבודדת הכילה, בדרך כלל, מגנטו אחד וחיוט נדרש, והייתה בשימוש על מרבית הדגמים הראשונים של מנועי מטוסים. מנועים אלו היו בעלי נפח קטן ומהירות נמוכה. ככל שמהירויות גל הארכובה ונפח המנוע עלו, נדרש היה לצייד את תא הבעירה במצתים כפולים, על מנת לשלוט במהלך תהליך הבעירה בתוך הצילינדר. המערכת הכפולה הפכה באופן טבעי לצורך. שתי המערכות, מערכת כפולה על בסיס מצבר ומערכת המגנטו, בשימוש על מנועי מטוסים (הערת המתרגם: מערכת על בסיס מצבר כבר לא בשימוש בימים אלו). יש להן מערכת חיבורים נפרדת על מתג ההצתה הממוקם בתא. החיבורים מאפשרים לטייס לבדוק את התפקוד של כל מערכת בנפרד, בכדי לוודא פעולה נאותה לפני ההמראה. היתרונות העיקריים של מערכת הצתה כפולה הן:

- א. הגדלת הבטיחות; במקרה שמערכת אחת נכשלת, המנוע יכול להיות מתופעל על ידי המערכת השנייה, עד לנחיתה בטוחה.
- ב. בעירה משופרת של התערובת במנועים בעלי נפח ומהירות גבוהים, ובהתאם שיפור הביצועים.

יחידות המגנטו הינן יחידות עצמאיות, המספקות זרם הצתה ללא שימוש באספקת זרם חיצוני.

מגנטו מתח גבוה – המגנטו שבשימוש

במנועים מודרניים, הינו יחידה עצמאית, שהאנרגיה החשמלית שלה מיוצרת על ידי סיבוב מגנט קבוע בין קצוות של קטבים, המגושרים בקצוות על ידי ליבה, שסביבה מלופפים סלילים ראשוני ומשני. הוא מונע על ידי ציר אביזרים מתאים מגל הארכובה של המנוע. האלמנט המסתובב, או המגנט, עשויים מחומר אשר יכול להיטען חשמלית, ושישמור את המגנטיות לתקופת זמן ארוכה. הקטבים עשויים משכבות, או פרוסות, להקטנת הנטייה למערבולות של קווי השטף, דבר שיגרום לחימום יתר ואובדן יעילות. משתמשים בברזל רך באיכות גבוהה בכדי לאפשר היפוך מושלם ופתאומי של השטף המגנטי, בכדי ליצר מתח מירבי במצתים.

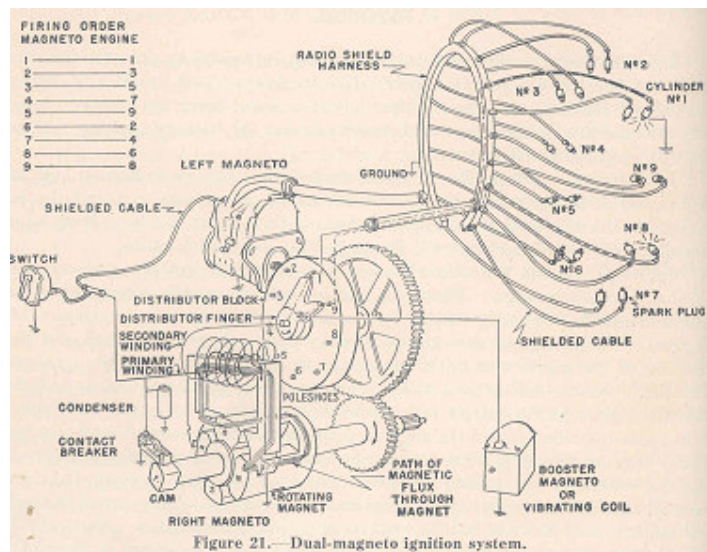
ציור 21 מתאר סידור כללי של מערכת הצתה

כפולה. באופן כללי, סליל השראה מורכב מליפוף ראשוני של תיל מצופה, וליפוף משני של תיל בעל ציפוי עדין. בדרך כלל הליפוף הראשוני מלופף קרוב לליבה, והמשני בצד החיצוני. שכבות הסלילים מבודדות על ידי חומר מיוחד, וטבולות בתרכובת של לכה. הסלילים המודרניים יותר עטופים בבקליט למניעת זליגת זרם בגבהים.

יחס הליפוף של הסליל המשני לראשוני משתנה בהתאם לדרישות, בכדי להעלות את המתח המיוצר על ידי הליפוף המשני (בסביבות 22,000 וולט). הליפוף המשני עשוי מ- 13,000 ליפופים בערך של התיל העדין, עקב העובדה שהוא מיצר מתח גבוה וזרם נמוך. הסליל הראשוני חייב להיות מתיל עבה, כיוון שבמספר מקרים הוא נושא זרם גבוה מאד.

השראה אלקטרומגנטית – השיטה הפשוטה ביותר ליצירת חשמל היא על ידי השראה אלקטרומגנטית. המתח נוצר על ידי תנועה יחסית בין שדה מגנטי ומוליך, התנועה הינה לכיוון כזה, שהמוליך חותך את הקווים המגנטיים של הכוח. המתח הנוצר בדרך זו נקרא מתח מושרה, והעיקרון ידוע כהשראה אלקטרומגנטית. ישנן שלוש שיטות שבהן מושרה כוח אלקטרו מניע במוליך על ידי השראה אלקטרומגנטית. השיטות הן:

1. על ידי שטף מגנטי נייח, ומוליך נע.
2. על ידי מוליך נייח, ושטף נע.



3. על ידי מוליך ניח, ושטף משתנה.

ביצירת כוח אלקטרו מניע עם שטף ניח, המוליך נע על פני השטף. השטף נוצר על ידי מגנטים קבועים, או על ידי אלקטרומגנטים. עד כה, בכל הנוגע לכוח אלקטרו מניע, אין זה משנה באם זה השטף או המוליך אשר נעים, כל עוד קיימת תנועה יחסית ביניהם. המתח המושרה במוליך הוא יחסי לשיעור שבו הקווים המגנטיים של הכוח נחתכים. משתמשים בשיטה של השטף הניח והמוליך הנע במחוללים מסוג עוגנים מסתובבים. בשיטת המוליך הניח והשטף הנע משתמשים במגנטו השראה.

כאשר כוח אלקטרו מניע מושרה על גבי מוליך קבוע על ידי שטף משתנה, המתח המושרה הוא יחסי לשיעור השינוי של השטף או השדה המגנטי. ניתן להניח שני מעגלים נפרדים, אחד קרוב לשני. כאשר זרם חולף דרך אחד מהמעגלים הללו, ייווצר שדה מגנטי סביב המוליכים שלו, כפי שתואר קודם. הקווים המגנטיים של הכוח של שדה זה יחתכו את המוליכים של המעגל הסמוך כל אימת שכמות הזרם הזורם במעגל משתנה, ומתח יושרה במעגל הסמוך. עקרון זה של השראה אלקטרומגנטית נקרא השראה הדדית, והוא עיקרון הפעולה של שנאים, סלילי השראה וסלילי הצתה. אם סליל אחד ממוקם בתוך סליל אחר, ללא חיבורים חשמליים ביניהם, והזרם עובר בסליל אחד, זרם רגעי יושרה בסליל השני. זרם מושרה זה אורך רק כל עוד הזרם בסליל הראשון נבנה מאפס למקסימום, כיוון שהשטף גדל עם הגדלת הזרם.

כאשר הזרם בסליל הראשון מופרע, זרם אחר מושרה בסליל השני על ידי הפסקת השטף המגנטי, אולם בכיוון השני. כל זרם מושרה בסליל השני נוטה להתנגד לכל שינוי הזרם בסליל הראשון. לזרמים אלקטרומגנטיים מושרים יש כיוון כזה, שהפעולה של שדות מגנטיים יוצרים נטייה להתנגד לתנועה שמייצרת אותם.

בכל המקרים, כאשר מנוע פועל במטוס, המצויד בצידוד רדיו, יש לעטוף את היחידות החשמליות והחיוט בחיפוי מתכתי להקטנת ההפרעה. המיסוך על כבלי המתח הגבוה, ממיסוך מפלג המגנטו עד למיסוך המצת, מורכב מעטיפת אסבסט המוקף במוליך אלומיניום, מעליו ממוקמת שכבת שזורה של נחושת מצופה בדיל. כל זה מכוסה במיגון של סרט אבץ זרחני. מחקרים מוקדשים למניעת היווצרות לחות בין המיסוך והכבל, מקור לבעיות בעבר.

הואיל ומגנטו הוא צורה של מחולל תדר גבוה, קרינה הנובעת ממנו במהלך הפעולה תגרום הפרעה בקליטת רדיו, אם מערכת ההצתה אינה ממוסכת. במציאות, מגנטו מייצר גלים הדומים לתחנת שידור, אשר שולחת גלים בעלי אורך מבוקר מהאנטנה. במגנטו, כבלי המתח הגבוה מהווים למעשה אנטנה, שממנה נוצרת קרינה בצורה של גלים בעלי אורך בלתי מבוקר.

לאור העובדה שהאנטנות לקליטה על המטוס קרובים למגנטו, הם יקלטו את הקרינה הבלתי רצויה, או הגלים בעלי האורך הבלתי מבוקר, ביחד עם הגלים בעלי האורך המבוקר הנשלחים על ידי תחנת הרדיו, ויגרמו להפרעה בקליטת הרדיו. בכדי למנוע הפרעה זו, כל מערכת ההצתה סגורה במיכל מתכתי או מיסוך רדיו. מיסוך זה מוארק למנוע ואוסף את הקרינה הבלתי רצויה, או הגלים בעלי אורך בלתי מבוקר של המגנטו, ומובלת ישירות לאדמה, ובכך נמנע מהם להגיע לאנטנות ולגרום להפרעות קליטה.

סלילי השראה – סליל השראה (או שנאי) הינו מכשיר, בשימוש מערכות הצתה של מנועי בעירה פנימית, לחילוף זרם במתח נמוך במעגל אחד, לזרם במתח גבוה בסליל אחר, על ידי השראה. הוא מורכב מסליל ראשוני וסליל משני, הממוקמים סביב ליבת ברזל רך, עם מעגל ראשוני המכיל ליצירה והפסקה של המעגל הראשוני. כאשר המעגל הראשוני נסגר, הזרם זורם דרך הסליל הראשוני, ויוצר קווים מגנטיים של כוח, אשר חותכים לרוחב הליפוף המשני, ומושרה כוח אלקטרו מניע. אם המעגל השני נסגר, זרם יזרום כל עוד המעגל הראשוני נבנה מאפס לעוצמתו המרבית. כאשר המעגל הראשוני נפתח, השדה המגנטי סביב הליפוף הראשוני נופל, וגורם לליפוף המשני להיחתך בשנית על ידי קו הכוח. כוח אלקטרו מניע, וזרם, יושרו בסליל המשני, אולם בכיוון המנוגד שהיה כאשר המפסק נסגר.

ההשראה מתרחשת בליפוף המשני, כל אימת שיש שינוי כל שהוא בערך הזרימה של זרם בסליל הראשוני. כל שאר התנאים נשארים קבועים, עוצמתו של הכוח האלקטרו מניע בליפוף המשני תלוי במספר ליפופי התיל. משתמשים בכוח האלקטרו מניע, הגבוה דיו לקפוץ דרך מרווח האוויר, להצתה במנועי בעירה פנימית.

תפקודי יחידות ההצתה – שתי השיטות המצויות ביותר ליצור אנרגיה חשמלית, במערכות ההצתה של מנועי מטוסים, הם מגנט קבוע ומצבר. ההשוואות הבאות מתארות את הדרך בה הן פועלות.

ציור 22 מתאר כיצד זרם מושרה בסליל ראשוני של מגנטו מטיפוס מגנט מסתובב. מגנט פרסה, עשוי מפלדה קשה לשמירת המגנטיות, תלוי על מיתר הקשור למסמר. יש לציין שקצוות המגנט מסומנות ב – "N" ו – "S" לציון קטבים צפון ודרום בהתאמה. החצים על פני המגנט מייצגים קווי שטף מגנטיים. הקווים היוצאים מהקטבים הצפוני והדרומי מייצגים שדה מגנטי (ניתן להראות את השדה המגנטי על ידי החזקת הקטבים של המגנט ישירות מתחת לפיסת נייר שעליו מפוזרים שבבי ברזל).

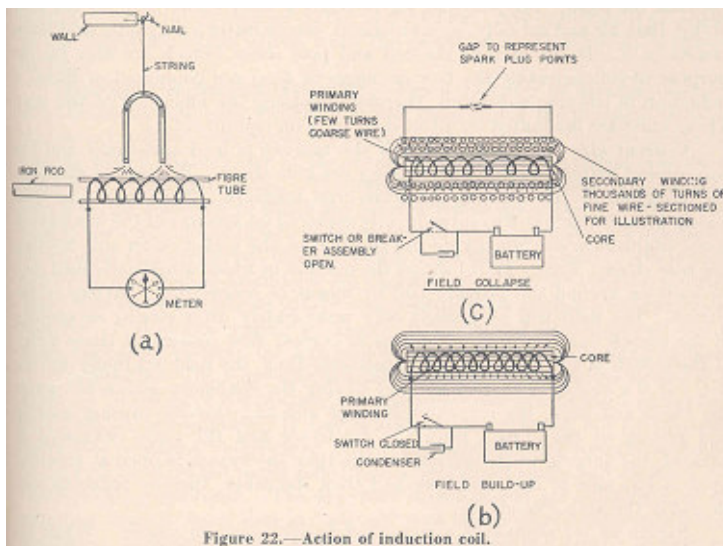


Figure 22.—Action of induction coil.

לייצוג הליפוף הראשוני, אשר בדרך כלל עטוף סביב ליבת הסליל, מלופפים מספר ליפופים של תיל עבה מצופה סביב צינור פיבר. גליונומטר מחובר לקצוות הליפוף הראשוני. כל עוד המגנט ניח, מחט המחוון תהיה על אפס, אפילו שקיים שדה מגנטי. אם המגנט מסתובב באיטיות, השדה יחתוך את הסליל הראשוני, ומחט המחוון תזוז מכיוון אחד למשנהו, כאשר מצב הקטבים משתנה. אם ניתן היה למחט המחוון לציין את היחס האמיתי בין המהירות של המגנט והזרם המושרה בסליל הראשוני, התנועה היחסית של המחט הייתה גדולה יותר עם הגדלת

מהירות המגנט, ופחותה במהירויות נמוכות. דבר זה מסביר אחת מהסיבות מדוע מגנטו מייצר ניצוץ חלש במהירויות נמוכות.

משתמשים במוט ברזל רך לייצוג ליבת הסליל. אם המגנט מסתובב באיטיות, והמוט מוכנס לתוך צינור הפיבר, תגרם הגדלה משמעותית בתנועת המחט. מרווח האוויר בין הקטבים הינו בעל התנגדות גבוהה לריכוז קווי שטף בלתי נראים, אשר קיימים למעשה במספרים גדולים בפרסה, או בכל מגנט קבוע. לפיכך, הם יהיו פרוסים מעל קטע משמעותי של חלל האוויר בין הקטבים. מוט הברזל הרך מספק מעבר קל בהרבה לקווי השטף מאשר האוויר, ולמעשה מרכז את השדה המגנטי, כאשר ממוקם בתוכו. אם ליבת הסליל והפרסה (אשר נועדו גם הם למטרת ריכוז זרימת השטף המגנטי) נפרסות, תגרם הפחתה במערבולת, ובהמשך הגדלת יעילות היחידה. יחידות אלו פרוסות בכל ציוד ההצתה המודרני.

ניתן לחולל זרם גם כאשר המגנט ניח, והסליל מסתובב, בתוך שדה המקיף את קטבי הפרסה. דבר זה מתאר את העיקרון של מגנטו מטיפוס עוגן מסתובב. דגם זה היה בשימוש נרחב בעבר, אולם הוחלף עקב מגבלות מהירות מכאניות, שליוו את סיבוב סליל המתח הגבוה בין קטבי הפרסה. ציור 22 (b) מראה את האופן שבו שדה מגנטי יכול להבנות סביב הסליל הראשוני, באמצעות חיבור מצבר למעגל. השדה יתקיים רק מייד לאחר סגירה או פתיחת המפסק, עקב השינוי המהיר בזרם, הקיים בזמן זה. אם המפסק נשאר פתוח, ללא קבל מחובר בין קצותיו, ייווצרו קפיצת מתח וקשת חשמלית, שייגרמו לשריפת והיתוך מגעי המפסק. עם הקבל והיחידות המחוברות במקביל, נחשול הזרם, בזמן שהמפסק פתוח, משוכך תחילה על ידי צד אחד של הקבל, ולאחר מכן צידו השני, ובכך מקטין בצורה ניכרת את תנאי הקשת.

ציור 22 (c) מייצג מעגל הצתה מופשט על בסיס מצבר. כאשר המפסק נסגר תחילה, נוצר שדה מגנטי כפי שהוסבר קודם. השדה המגנטי חותך את אלפי הליפופים של התיל העדין בליפוף המשני, ומשרה בו זרם. כאשר המפסק פתוח, הזרם במעגל הראשוני מופרע, והשדה המגנטי נבנה. דבר זה גורם לחיתוך מהיר או מידי של בערך 12,000 ליפופים של התיל העדין, במרווח המדמה מצת נוצר ניצוץ של בערך 20,000 עד 25,000 וולט. הקבל מסייע ביצירת מתח גבוה, על ידי ספיגה מיידית של הזרם במעגל הראשוני, ואז לחילופין טוען ומשחרר אותו עד שנמוג. כאשר המפסק פתוח, הזרם המושרה בליפוף המשני יהיה הפוך לכיוונו שהיה מייד לאחר שנסגר. כל אימת שיש שינוי בשיעור הזרימה של הסליל הראשוני, נוצרת השראה בליפוף המשני. עקב פעולה מיידית של הקבל בספיגת הזרם בסליל הראשוני, המתח הנוצר במשני יהיה גבוה דיו להצית את המטען בצילינדר רק בזמן זה.

יש לציין שהמגנטו מחולל זרם חילופין על ידי סיבוב הקטבים במגנט, בעוד שמערכת המצבר מייצרת זרם ישר בגלל שקוטביות המצבר קבועה.

השראה עצמית היא תופעה שבאמצעותה שינוי בזרם במוליך משרה כוח אלקטרו מניע במוליך עצמו, אשר נוטה להתנגד לכל שינוי בזרם. הוא מתרחש רק כאשר יש שינוי בעוצמת הזרם. דבר זה מונע מהזרם להיבנות במהירות, כפי שיכול היה אם השראה עצמית לא הייתה קיימת. הוא גם מונע נפילה פתאומית של הזרם בגלל התנגדותו לכל שינוי בזרם. ניתן להיווכח בהשראה עצמית על ידי הקשת הבהירה שמתרחשת כאשר המפסק של מעגל סגור נפתח בפתאומיות.

מכלול מפסק ניתוק – מכלול הניתוק הינו למעשה מפסק אוטומטי, המאפשר ניתוק של המעגל הראשוני, ברגע שדרושה להבה בנקודות המצת, והצתת התערובת בתוך הצילינדר בזמן המתאים ביחס למצב הבוכנה, או זווית מהלך גל הארכובה. מכלול הניתוק מכיל זרוע נעה, או מכלול קפיץ, שאליו מחוברים מגעי המפסק. המגעים עשויים בדרך כלל מפלטינה ברמה גבוהה ויקרה מאד. אסור שהמגעים ישויפו יתר על המידה, אלא

באבן, כאשר נדרש. במגנטו מודרני, מכלולי הניתוק מסווגים כבעלי ציר או ללא ציר. האחרון הינו בשימוש נרחב, כיוון שבעבר התגלו כמה בעיות בזרוע בעלת הציר, שנתפסה לעתים. נטען שזה קרה עקב מטענים סטטיים בין הציר והזרוע, דרך פני המיסב.

קבל – הקבל הינו מכשיר לצבירת חשמל שנוצר על ידי תופעת ההשראה האלקטרו-סטטית בין גופים מוליכים, אשר מופרדים על ידי בידוד. הוא יכול להיות מיוצר בכמה צורות, אולם זה שבשימוש נפוץ נקרא "מגולגל". הקבל מורכב משכבות חילופיות של ריידים ופסי נייר שעווה, המגולגלים בצורת גליל, וסגורים במיכל חסין לחות. השכבות החילופיות של הרדיד מחוברות למיכל, ואזורי המוליך הראשי או "הצמה" מבודדים אחד מהשני. לפיכך, תפקידו לקלוט מטענים; הוא אינו מספק מעבר לזרם חשמלי. ניתן להרכיבו בין הליפופים הראשונים והמשניים של הסליל, קרוב לסליל או בבית מכלול הניתוק.

הקבל מחובר במקביל למגעי המפסק של מערכת ההצתה ומטרותיו הן:

- א. להפחית את הקשת ושריפת מגעי המפסק, עקב ההשראה העצמית של המעגל הראשוני.
- ב. לסייע בנפילה פתאומית של המעגל הראשוני, ובכך להגדיל את המתח המיוצר על ידי הליפוף המשני.

אם הקבל פגום, או אינו מכיל את הקבליות המתאימה למערכת, תיווצר קשת חשמלית בין המגעים והם יצלקו, עם אפשרות להדבקתם אחד לשני. ניתן לזהות קבל פגום חלקית על ידי פעולה לא חלקה של המנוע במהירויות ביניים, אשר עלולה לגדול למצב חמור במהירות מרבית. הקבל חייב לפעול בשלמות במהירויות גבוהות, בגלל מגבלות הזמן של תפקוד המעגל הראשוני.

אם נתקלים בהצתה לא סדירה של המנוע, באחת ממערכות ההצתה, רצוי לבדוק את מצב מגעי הניתוק. אם פני השטח חלקים ובעלי משטח מגע אחיד, הקבל תקין.

אם משטחי המגע מצולקים, שרופים ומכילים שכבה של פיח סביב הקצוות, יש לבדוק את הקבל. השיטה הקודמת של בדיקה זו מורכבת מטעינת הקבל ממצבר, ואז בדיקת קשת הפריקה עם תיל על פני החיבורים, או בדיקתו לקצר או זליגה על ידי חיבור למנורת בדיקה. השיטה המודרנית לבדיקה הינה לספק זרם של 400 וולט, בטמפרטורה גבוהה, על ידי מכשיר מְגֵר זרם ישר. אם הקריאה ב - 200 מעלות פרנהייט הינה 50,000 אוהם, הקבל תקין להמשך שירות.

יחידת המפלג – מכלול המפלג עשוי מחומר בעל תכונות בידוד גבוהות מאד. כבלי המתח הגבוה מוכנסים ומחוברים לתוך מגעי המפלג. אצבע הפילוג מחוברת לציר, או תמסורת, ומסתובבת בתוך המפלג במהירות של פעם וחצי מגל הארכובה. האלקטרודה חולפת דרכו, ומעבירה את המתח הגבוה מהליפוף המשני לכבלי המתח הגבוה. המפלג מסתובב במהירות של פעם וחצי ממהירות גל הארכובה, כיוון שמנוע בעל מחזור של ארבע פעימות מתוכנן להצית את כל הצילינדרים כל שני סיבובים של הציר. מספר כבלי המתח הגבוה לכל מערכת יהיה שווה תמיד למספר הצילינדרים במנוע. כבלי המתח הגבוה, המגיעים מהמצתים, מחוברים למפלג בסדר ההצתה או ברצף של סגירת שסתום היניקה של המנוע. אם סדר ההצתה של המנוע אינו ידוע, ניתן לקבלו על ידי סגירת שסתום היניקה בצילינדר מספר אחד, על ידי סיבוב המדחף, ואז להמשיך סיבוב, תוך תשומת לב לסדר שבו שאר שסתומי היניקה נסגרים ביחס למספרם של הצילינדרים.

מרבית אצבעות המפלג מצוידים במוליך מתח גבוה, המחובר בצורה כל שהיא למגבר, ועוקבים אחרי האלקטרודה הראשית, תוך כדי אספקת הזרם לצילינדרים. אלקטרודת הגברה זו מציתה בדרך כלל צילינדר אחד בפיגור לאלקטרודה הראשית, בסדר ההצתה של המנוע. כיוון שהמגנטו הראשי מתוזמן למנוע, וניצוץ המגבר חם מאד, נוצרת בעירה מהירה, דבר המספק אמצעי להצתת הצילינדר קרוב לנקודה מתה העליונה שלו, למניעת סיבוב המנוע אחורנית בעת ההתנעה.

במספר מגנטו מאוחרים יותר, כגון מטיפוס מגנט בעל שמונה קטבים, אשר מעביר מספר גבוה של ניצוצות דרך אצבע המפלג, בזמן נתון ובמהירויות גבוהות, ימצא קבל קטן בקטע מסוים של אצבע המפלג. מטרת קבל זה הינה למנוע משוב חוזר שלילי לתוך הליפוף הראשוני במהירויות גבוהות, שיינטה להחליש את הניצוץ הבא. הקבל יוצר משוב חוזר חיובי בכיוון המתאים לסייע בבניית המתח הראשוני. דבר זה יוצר ניצוץ גבוה בעוצמתו, מאשר יכול היה להיווצר על ידי זרם ראשוני רגיל, במהירויות גבוהות.

מפסק הצתה – מפסק ההצתה מאפשר לטייס לבדוק את פעולת המערכת הכפולה, ומאפשר אמצעי להתנעה וכיבוי מנוע, כאשר המאייד אינו מצויד באמצעי כיבוי. לפני המראה, הטייס חייב לבדוק את המנוע במהירות נתונה, למשל 1,400 סל"ד, ואז לסובב את מפסק ההצתה ממערכת אחת לשנייה. הבדל הנפילה בסל"ד, בין שתי המערכות הפועלות, יהיה קרוב לערך שנקבע.

במספר מקרים, המפסקים במטוס רב מנועי מרוכזים ביחידה אחת, והכפתור הראשי משולב בכדי שכל מערכות ההצתה יופסקו באותו הזמן במקרה חרום. דבר זה מקטין את סכנת האש עקב צינורות פליטה חמים, באם אחד מהמפסקים נשאר במצב פעל.

חיבורי ההארקה של המפסק, ועל המגנט, חייבים להיבדק בתדירות להקטנת האפשרות של התנעת מנוע לא צפויה, כאשר המפסק במצב חדל, וגרימת נזק לאנשים ליד המדחף.

סדר הצתה – סדר ההצתה נשלט על ידי רצף של סגירות שסתומי היניקה (פעימת הדחיסה). כיוון שרצף זה מתוכנן למנוע, סדר ההצתה לא ניתן לשינוי בקלות. סדר ההצתה מתחיל עם צילינדר מסוים, בדרך כלל מוגדר כמספר 1, וממשיך דרך שאר הצילינדרים בכיוון סיבוב גל הארכובה.

התקנת כבלי המתח הגבוה, המחברים את המפלגים למצתים, נחשב כחלק מתזמון יחידות ההצתה למנוע.

שיטות עזר להתנעה – כאשר המתנע מוצמד, סיבובי גל הארכובה נמוכים, והמגנט אינם מסתובבים במהירות מספקת בכדי ליצור ניצוץ חם. הצתה מחייבת ניצוץ חם במיוחד, ולמטרה זו נחוצה דרך ליצירת הניצוץ במהירות נמוכה. האמצעים הנפוצים ביותר ליצירת ניצוץ חם להתנעה הם: מגבר מגנט, מצמד תקיפה וסליל רעד.

מגבר מגנט – הרבה מדגמי המטוסים המוקדמים היו מצוידים במגבר מגנט שמוקם בתא הטייס או חובר ישירות למתנע ידני. המגבר היה דומה למגנט המחובר ומתזמן למנוע, בעל עוגן מסתובב, מגנט מסתובב או השראתי. ההבדל העיקרי היה, שהם לא היו מצוידים במפלג קונבנציונאלי לפילוג הזרם המוגבר לצילינדרים, בסדר ההצתה של המנוע, עקב שימוש במפלג המגנט הראשי, שתוזמן להעברת זרם ההצתה הרגילה. ההתקנה שבה המגבר מוקם בתא הטייס, באם פעלה שלא כשורה, גרמה להרבה פגיעות חמורות לאלה שסובבו את המדחף (הערת המתרגם: בעבר בוצעה התנעת המנוע על ידי הנפת [סיבוב] המדחף, כיוון שמתנעים טרם היו בשימוש - "סווינג" בלשון המכונאים). אם ארכובת המגבר סובבה, לפני שהמכונאי המניף את המדחף פניה את המקום, ניצוץ המגבר יכול היה לקפוץ לאלקטרודה הלא נכונה. דבר זה יכול לגרום למדחף להסתובב אחורנית ולהוציא את המכונאי משיווי משקל תוך אפשרות נפילה לתוך המדחף המסתובב.

מצמד תקיפה – מנועים בעלי מספר צילינדרים קטן, מצוידים לעתים עם מה שידוע כמצמד תקיפה. זוהי יחידה, אשר בזמן ייצור הניצוץ, נותנת לאחד מהמגנטים המחברים למנוע האצה קצרה, ומייצרת ניצוץ חם להצתה. צורה אחת של מכשיר זה מכילה גלגל תנופה קטן, ומכלולי קפיץ, הממוקמים בתוך בית המורכב בסמוך למצמד, אשר מחבר את המגנט לציר האביזרים.

המגנט מחובר באופן גמיש באמצעות הקפיץ, בצורה כזו שבמהירות נמוכה המגנט מוחזק בצורה ארעית, בעוד שציר האביזרים מסתובב, עד אשר הבוכנות מגיעות לנקודה מתה עליונה בקירוב. בנקודה זו המגנט משתחרר והקפיץ נבעט חזרה למקומו המקורי, וגורם לפיתול מהיר של המגנט המסתובב. פעולה זו, שוות ערך לסיבוב מהיר של המגנט, יוצרת ניצוץ חם. לאחר התנעת המנוע, כשהמגנט מגיע למהירות שנקבעה מראש, שבה הוא מספק את הזרם הנדרש, משקולות התנופה במצמד נסוגים לכיוון חיצוני (עקב הכוח הצנטריפוגלי) ונועלות את המצמד. הדבר הופך אותם ליחידה מוצקה, ולפיכך מחזירים את המגנט למצב תזמון נורמאלי ביחס למנוע. ניתן לזהות את מצמד התקיפה על ידי רעש נקישה חדה בעת שגל הארכובה עובר את הנקודה המתה העליונה של כל צילינדר.

תזמון הצתה – במנוע מחזור אוטו, ההצתה צריכה להתרחש בפעימת הדחיסה, בנקודה אשר תוודא בעירה מושלמת של הדלק בתחילת פעימת העבודה. כאשר הניצוץ חולף בין האלקטרודות של המצת, והחום הנוצר מצית את הסביבה המידית של חלקיקי הדלק, אשר בתורם מציתים חלקיקי דלק נוספים עד אשר כל המטען בוער, מתרחשת עליה בטמפרטורה. העלייה בטמפרטורה מלווה בעליה יחסית בלחץ, אשר זה מה שנדרש בתא השריפה. נוצרת התפשטות להבה, או תנועת חזית להבה, המתחילה באלקטרודות המצת, ומתפשטת בתא השריפה. מהתרחשות הניצוץ עד להגעה לטמפרטורה ולחץ מרביים בתא השריפה, נדרש זמן. חפיפת זמן זו מושפעת מהגורמים הבאים: מהירות המנוע, מערבולות התערובת בתא השריפה, יחס דחיסה, צורת תא השריפה, מיקום המצת, איכות הדלק ויחס תערובת.

בדרך כלל, משך של בערך 0.0025 שניות נדרש לשריפת הדלק. במנוע הפועל ב - 2,000 סל"ד, עם קידום הצתה של 30° , ההצתה מתרחשת 30° לפני נקודה מתה עליונה בפעימת הדחיסה. אם מהירות המנוע מוגדלת, ההצתה חייבת להתרחש מוקדם יותר בפעימת הדחיסה בכדי לוודא שריפה מושלמת עד אשר פעימת העבודה מתחילה. ככל שיחס הדחיסה במנוע גדול יותר, הדלק נשרף מהר יותר. לדלקים שונים יש שיעורי שריפה שונים, אותו הדלק יישרף באופן שונה בתערובות שונות. תערובת ענייה נשרפת בצורה איטית יותר מאשר תערובות אחרות. צורת וגודל תא השריפה, ומספר ומיקום המצתים במנוע, הם גורמים מזעריים הקובעים את תזמון ההצתה.

תזמון מדורג ומסונכרן – הייחודיות של צורת תא השריפה ומערבולת התערובת במנוע נתון, יקבעו באם תזמון ההצתה יהיה מדורג או מסונכרן. אם תזמון ההצתה מדורג, המצת לצד פתח הפליטה יצית מ - 4° עד 8° מהלך גל הארכובה לפני המצת הממוקם ליד שסתום היניקה. התערובת בסמוך למיקום זה מזדהמת על ידי גזי הפליטה. לפיכך היא נשרפת לאט יותר, ועליה להיות מוצתת מוקדם יותר מאשר ליד שסתום היניקה. אם

המצתים ממוקמים קרוב יותר, בזווית נכונה לשסתומים, המגעים יסונכרו או יקבעו להיפתח בדיוק באותו הזמן, ולפיכך יסונכרו את התזמון. יתכנו שינויים קלים.

ניצוץ מאוחר – מנועים מדגמים מוקדמים היו מצוידים במגנטו בעלי מכלולי מפסק נע, המחוברים לידיית בקרת הניצוץ בתא הטייס. כאשר הידיית הוזהז למצב RETARD, מכלול המפסק הסתובב בכיוון הזיז במספר מעלות נתון, דבר שגרם למגעי המפסק להיפתח מאוחר, או כאשר הבוכנה הייתה בנקודה מתה עליונה בקירוב. כאשר הידיית הוזהז למצב ADVANCED, מכלול המפסק סובב לכיוון הפוך ביחס לזיז, לפיכך גרם לניצוץ להתרחש מ 20° עד 35° לפני נקודה מתה עליונה. התזמון המדויק השתנה במנוע המסוים. הבקרה נקבעה במצב מקודם לכל התפעולים הנורמאליים.

השתמשו במצב המאוחר במגנטו הקודמים לאחר את תזמון ההצתה במשך התנעת המנוע, כך שהייתה אפשרות קטנה יותר לסיבוב המנוע אחורנית. לדבר זה לא הייתה כל השפעה על העברת זרם המגבר, כיוון שהוא תוזמן על ידי אלקטרודה מיוחדת, ממוקמת בקביעות במצב מאוחר יחסית לאלקטרודה הראשית, שנשארה את המתח הגבוה מהמגנטו.

קידום הצתה שני מצבים – על מספר מנועים מעדנים את התזמון באמצעות שני מצבים. מגנטון קידום הצתה אוטומטי תוכנן להיות קשור לתזמון הניצוץ, קרוב יותר לדרישות המשתנות הכלולות בטווח הפעולה של המנוע. באופן מעשי, המגנטון מתוכנן להשפיע על חסכון בדלק במהלך תפעול בהספק נמוך בטווח השיט. דבר זה מושג באמצעות שני ויסותים:

1. הניצוץ מקודם בצורה אוטומטית מעבר למצבו הנורמאלי ב 10 או 15 מעלות (מותנה בסוג ההתקנה הספציפי).
2. באותו הזמן, המאייד נקבע בצורה אוטומטית לספק יחס אוויר-דלק עני יותר מאשר האוטומטי עני. החיסכון המושג בצורה זו עומד על 4 עד 5 אחוזים בקירוב.

מערכות הצתה בעלות מגנטו כפול

המגנטו המורכבים על מנועים בעלי $2, 3, 4, 5$ צילינדרים מצוידים בדרך כלל במגנטים סיבוביים בעלי שני קטבים, וזיזי מפסק בעלי שתי פיקות. כיוון שיש היפוך שטף כאשר כל זוג קטבים חולף את קוטב הפרסה במהלך הסיבוב של המגנט, תסופק פיקת זיז להפסקת המעגל הראשוני, ובכך תגרום למתח מושרה גבוה בליפוף המשני. לפיכך, מספר הקטבים על המגנט יקבע על ידי ספירת מספר הפיקות על הזיז. מגנטים סיבוביים בעלי ארבע קטבים, וזיזי מפסק בעלי ארבע פיקות נמצאים בשימוש נרחב על מנועים בעלי $7, 8, 9$ צילינדרים. מכל מקום, הסידור האחרון מורכב ממגנט בעל שמונה קטבים וזיז שמונה פיקות על מנועים אלו.

הגורם החשוב בקביעת מספר הקטבים במגנטו, הינו בחירת סידור אשר יגרום להתנעה טובה וביצועים במהירות נמוכה, ועדיין יכיל מספיק קטבים להקטנת נטייה למגבלות מכאניות המלוות מהירות סיבוב גבוהה של המגנט. גורם חשוב נוסף הוא איכות פלדת המגנט. ככל שאיכות הפלדה במבנה המגנט טובה יותר, כך גדולה עוצמת המגנטיות.

במגנטו הישנים השתמשו בצורה נרחבת בפלדת מגנט מכרום, אולם חקירות מאוחרות יותר הראו שפלדת קובלט מחזיקה יותר שטף מגנטי. בכל הדגמים המאוחרים, המגנט מכיל כ 35% פלדת קובלט, אשר עקב שטף גדול יותר, מגדיל את עוצמת הניצוץ ב 5 עד 8 אחוז.

לפני התקנת המגנט הסיבובי במגנטו, ממגנטים אותו במתקן הטענה, המורכב מסדרה של מגנטים מבוססים על סלילים. מספרם מותנה במספר הקטבים המיועדים להטען על המגנט. הקוטביות של האלקטרומגנטים נשלטת על ידי סידור מתאים של כיוון הליפופים סביב הליבה. הוא נטען על ידי זרם ישר, אשר מסייע גם הוא בשמירת הקוטביות הרצויה.

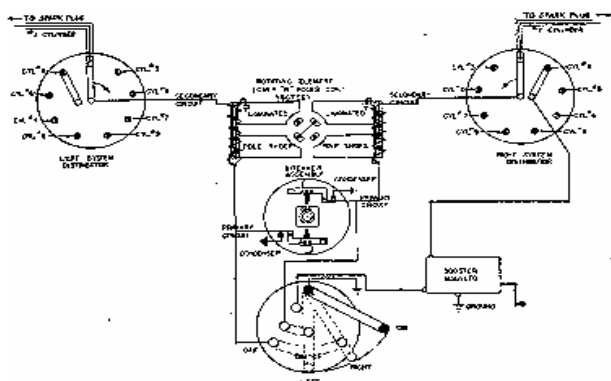


Figure 25- Circuit diagram of single-coil dual-magneto ignition system.

פעולת המגנטו – כאשר מגעי המפסק סגורים, והמגנט הסיבובי במצב בניית שדה מגנטי, הזרם יזרום במעגל ובליפוף הראשוני, כולל במגעי המפסק. הזרם בסליל הראשוני ייצור שדה מגנטי, אשר ישרה זרם בערך נמוך בליפוף המשני. כאשר כל קוטב מגיע לאפס מגנטיות (מצב רווח E), הזיז יפתח את המגעים, ויעצור את הזרם במעגל המשני. פעימות הזרם יספוגו על ידי הקבל, שיצור בכך נפילה מיידית של השדה המגנטי, וחותר את הליפופים המשניים במהירות גבוהה ביותר, ובכך גורם להשראת הזרם בסליל המשני ב $20,000$ עד $25,000$ וולט בקירוב. זרם זה מפולג למצת של

הצילינדר במצב הצתה, שם הוא קופץ מעל מרווח האלקטרודות ומצית את התערובת. החזרת המתח נעשית דרך מבנה המנוע לצד ההארקה של הסליל.

האוסילציה של הזרם המשוככת בקבל עוזרת בהגברת הזרם הנוצר בליפוף המשני. בנוסף, הקבל יקטין את הקשת ושריפת מגעי המפסק. הקבל חייב להיות בעל קיבוליות מתאימה ובמצב טוב להשגת התוצאות הרצויות. כאשר הקטבים במגנט הסיבובי מתהפכים, הזרם הנוצר יתהפך גם הוא והמגנט יצור זרם חילופין. **מערכת הצתה בעלת מגנט כפול** – מרבית המנועים המצויים כעת בשימוש כללי, כאשר מצויים במערכת הצתה בעלת מגנט, מכילים שתי יחידות נפרדות, המונעות על ידי תמסורת אביזרים מתאימה, וממוקמות בחלקו האחורי של המנוע. משתמשים במצמדים נבחרים, או אגנים, בעלי חריצים להעברת תנועה למגנט, בכדי לאפשר שינוי קל בתזמון מגעי המפסק, לפיצוי מיקום גלגלי שיניים לא שגרתי או שינויים באפיציות היצור.

מערכת ההצתה הכפולה מורכבת מיחידת מגנט בעלת אוגן המכילה מגנט סיבובי, שני סלילים ומכלול מגעים כפולים המונע על ידי ציר הנעה מתאים. יש שני מכלולי פילוג נפרדים, שניהם בעלי אלקטרודות מגבר עוקבות, למרות שמשתמשים רק באחד למטרת התנעה. המפלגים מותקנים בנפרד, וניתן להניע אותם מכל קצה של ציר ההנעה המיוחד.

המערכת מתוארת בציור 25. זהו ציוד סטנדרטי על מנוע רדיאלי בעל תשעה צילינדרים. בציור מתואר מכלול מפסק בעל זרוע מדגם מוקדם. התקנות מאוחרות יותר מצוידות במכלול מפסק בעל קפיץ. הקבלים בציור ממוקמים בבית המפסק. בדגמים המוקדמים הם היו ממוקמים בין הליפופים הראשוני והמשני, מתוך כוונה להגן עליהם מפני לחות. באופן טבעי, עלות ההחלפה הייתה די גבוהה כאשר נדרש להחליף את כל הסליל עקב קבל לקוי. הסלילים המאוחרים יותר היו עטופים בשכבה עבה של חומר בידוד להקטנת קשת חשמלית מהסליל המשני לגוף המגנט, במיוחד בגובה רב כאשר הלחץ האטמוספרי נמוך. גם מרווח הבטיחות בוטל מסיבה זו.

יש לציין שעקב העובדה שמשתמשים במגנט בודד בעל ארבעה קטבים, רק הקטבים הצפוניים מגושרים, בכדי להשיג תפעול שטף נפרד בשני הסטים של הפרסות ומכלולי הסליל. במלים אחרות, אם הקטבים הדרומיים היו מגושרים, קווי המגנטיות של השטף לא היו חולפים דרך אחד הסלילים. אין להרכיב מגנט זה ללא טעינת המגנטים, כיוון שקשה לגשר את המגנטים לשמירתם במצב טעון מלא.

בהתייחס למפסק ההצתה, יש לשים לב שמערכת ימין אינה פועלת, או מוארכת, כאשר מפסק ההצתה במצב המסומן LEFT, כך שניתן להשתמש בפעולת המנוע לבדיקת תפקוד המערכת השמאלית. כאשר המפסק על ON, שתי המערכות פועלות וכאשר על OFF, הקצוות החיים של שני המעגלים הראשוניים מוארקים. הסליל הראשוני של מגבר המגנט מוארק גם הוא, דבר שגורם לכל המערכת לא לפעול.

מצתים – אחד מהחלקים החיוניים ביותר של מערכת ההצתה הינו המצת, המכיל מרווח אוויר קטן שדרכו הזרם המשני של מערכת ההצתה מאולץ לקפוץ, והניצוץ שנוצר מצית את המטען הדחוס בצילינדר. המצת חייב לפעול בטמפרטורה ולחץ גבוהים. טמפרטורת הפעולה הממוצעת של מבודד, ועוצמת הלהבה בין הקצוות, חייבת להיות מספקת בכדי למנוע לכלוך, כאשר המנוע פועל בהספק נמוך, במצבי אקלים קר או בגלישה ממושכת. אם המצת מתלכלך, משקעי השמן, הפיח או העופרת יקצרו את המתח המשני הגבוה ויגרמו לפעולה בלתי סדירה של המצת. אם טמפרטורת הפעולה של המצת גבוהה מדי, קצה המבודד ונקודות בתוך תא השריפה יכולים ללהוט, ולגרום להצתה מוקדמת של התערובת, לפני שהזרם המשני קופץ.

מבנה – קיימים שלושה סוגי מצתים בשימוש – אלה עם מבודדי חרסיה, אלה עם מבודדי ניצץ ואלה עם

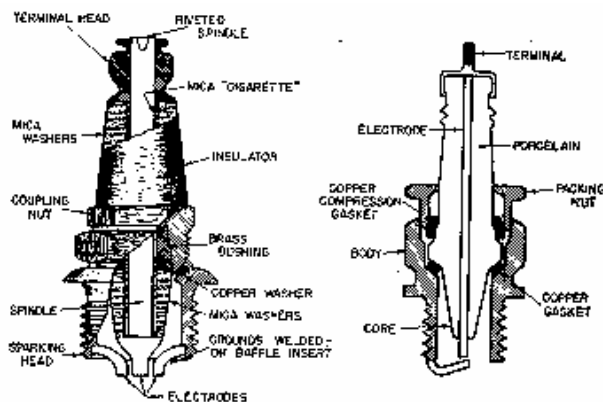


Figure 27.—Construction details of two types of aviation spark plugs.

מבודדי חרסיה משופרים (תמונה 27). מצת החרסיה נמצאים בשימוש כללי ברכבים ובמנועי מטוסים קלים, בעוד שמצת הניצץ, למרות שנמצא בשימוש במנועים תעופתיים גדולים, הוחלפו על ידי מצת החרסיה. מבודד החרסיה עשוי מחומר שרוף, המורכב ממשקעי מינרלים שונים. חומר הגלם נטחן לאבקה, מעורבב עם דבקים נדרשים, מוכנס לתבנית ונאפה בטמפרטורה גבוהה בכדי לעשותו זגוגי. במרכז המבודד ממוקם ציר, תיל עשוי סגסוגת עם מחבר בקצהו האחד, ואלקטרודה מרכזית בציודו האחר. מכלול זה, הידוע כגוף, מהודק לתוך מעטה באמצעות אום הידוק. חשוב מאד שתמנע מהגז אפשרות לדלוף דרך המעטה ולחלוף את הגוף, לצורך כך משתמשים באטם נחושת בנקודה שבה הגוף מחובר למעטה.

המעטה מחורץ ומוברג לתוך הצילינדר. האלקטרודה הצדדית מסומרת או מרותכת לתוך המעטה. החלק התחתון של המבודד, החשוף ללהבה בצילינדר, ידוע כליבה ומשמש כבקר הטמפרטורה. ככל שהליבה ארוכה יותר, כך טמפרטורת הפעולה גבוהה יותר. הדגמים המוקדמים של מצתי החרסינה למנועים תעופתיים לא נחשבו כיעילים באופן כללי כמו מצתי הנציץ, בגלל ששינויי טמפרטורה מהירים יצרו עומסים פנימיים, שלעיתים סדקו את המבודדים. כמו כן, הם נסדקו בקלות רבה יותר ממכות מכאניות, גרמו לקצרים ולכישלון המצת. מצת הנציץ חזק יותר מבחינה מכאנית, עמיד בפני שינויי טמפרטורה וחימום יתר לתקופות קצרות, ללא תקלות. הציר, ראש הציר והאלקטרודה המרכזית הם חלקים ממצת הנציץ ומהווים יחידה אחת. הם עשויים מסגסוגת מיוחדת, שהרכבה נחשב לסוד מסחרי של היצרן. הציר נושא את הניצוץ לאלקטרודה המרכזית ומוליך את החום החוצה. שיעור מוליכות החום של הציר משתנה בסוגי המצתים השונים והוא חשוב ביותר לשמירת טמפרטורת פעולה נאותה של המצת. האלקטרודה המרכזית חייבת להיות מתרכבת מתכתית אשר עומדת בפני בעירה והתחמצנות, וכמו כן מעבירה את הניצוץ בקלות. כיוון שסגסוגת אחת אינה יכולה להכיל את כל הדרישות, הציר בנוי משלוש סגסוגות שונות, כל אחת משרתת מטרה ייחודית.

יריעת נציץ בעובי של בערך 0.00125 אינטש עוטפת את הציר, עד אשר נבנית שכבת בידוד בעובי של 0.030 אינטש. דבר זה ידוע כ"סיגריה" ומהווה למעשה את הבידוד בין הציר והמעטה.

מעל חלקה התחתון והעליון של ה"סיגריה" ממוקמות דסקיות נציץ אשר יוצרות את הליבה. דבר זה נעשה בכדי להגן על הבידוד מפני נזקים מכאניים, ומגע ישיר עם החום בצילינדר. בכדי למנוע דליפת גז כל שהיא דרך ה"סיגריה" ודסקיות הנציץ, תותב פליז מחודד מותאם סביב ה"סיגריה" בתוך המצת. כאשר הוא מתחמם, התותב מתפשט ויוצר התאמה המונעת מעבר גז. החיבור ממוקם על הציר, והמכלול מהודק ביחד כאשר קצה הציר מסומר עליהם.

דסקיות הנציץ, היוצרות את הגוף, מעובדות לצורה המתאימה. אטם נחושת מותאם על הגוף בנקודה בה הוא יושב כנגד המעטה, ומונע מנזילות גז לחלוף את האטם כאשר הגוף מוברג לתוך המעטה. הפחית, היוצרת את ארבעת צדי האלקטרודות, עשויה מסגסוגת אלקטרודה מיוחדת, ולחוצה לתוך המעטה.

מנועי מטוסים מוקדמים היו מצוידים במצתים עם מבודדי חסינה. ככל שהספק המנועים גדל, נוצר יותר חום ולחץ והנציץ הפך לחומר מועדף. עם הופעת הספקים עוד יותר גדולים, חומרת המצב גדלה גם היא. לנציץ יש תכונות קבועות בלתי משתנות. מחקרים, מצד שני, שיפרו את החרסינה, ומצתי החרסינה הנוכחיים, טובים יותר מהנציץ ועומדים בדרישות.

בקרת טמפרטורת פעולה – ניתן לשלוט בטמפרטורת הפעולה של המצת על ידי:

א. שטח המצת החשוף ללהבה בצילינדר.

ב. שטח המצת החשוף לזרימת אוויר הקירור מחוץ לצילינדר.

ג. שיעור מוליכות החום של המצת.

מרבית המצתים בשימוש תעופתי בנויים על השיטה הראשונה.

למנועים מדגמים וגדלים שונים יש טמפרטורות שונות, תלוי במערכת הקירור או מאפייני פעולה. כפי שהוזכר קודם, מנוע בעל לחץ גבוה, סביר שיהיה בעל יחס דחיסה גבוה, ומנועים בעלי לחץ בינוני או נמוך פועלים בטווחי לחצים מוגדרים נמוכים.

מצת "חם" הינו בעל בידוד ארוך יותר החשוף בתוך תא השריפה. משתמשים בו בדרך כלל במנועים בעלי לחץ נמוך, אשר בהם טמפרטורות הפעולה נמוכות יחסית. נדרש זמן ארוך יותר לחום לעבור דרך הבידוד הארוך יותר למעטה, ולפיכך הקצה יפעל בטמפרטורות גבוהות יותר. מנועים בעלי לחץ "בינוני" קרוב לודאי ישתמשו בסידור מתאים של מצת "בינוני". מנועים בעלי לחץ או טמפרטורות גבוהות יהיו מצוידים בדרך כלל במצת "קר". דגם זה, בעל בידוד קצר, יהיה קר יותר עקב העובדה שזמן מעבר החום למעטה קצר יותר.

בשלב המוקדמים של פיתוח מצתים, טמפרטורות הפעולה של המצת השתנו לפעמים על ידי התקנת אטם נחושת ממולא באסבסט (בדומה לזה שבשימוש בין המצת לצילינדר), או אטם נחושת בעל מוליכות חום מצוינת. הראשון פעל כבולם חום וכך עיכב את זרימת החום מהקצה של המבודד לצילינדר. לעומת זאת, אטם הנחושת נוטה לסייע למעבר החום. האטם ממולא האסבסט אינו בשימוש נרחב, כיוון שנטען שהוא גורם למצת להשתחרר בטיסה.

אטם הנחושת ופני השטח על המצת והצילינדר חייבים להישמר נקיים מצבע, לכלוך או גופים זרים. אם דבר זה לא יתבצע, זרימת חום או מעבר זרם גבוה בין מגעי המצת יפגעו. המעגל המשני אינו יכול לספק מספיק זרם לצורך פעולת המצת, אם מגע הארקה בין המעטה והצילינדר אינו טוב. במקרים מסוימים, זו הסיבה להצתה בלתי תקינה, שקשה לאתר אותה. לעתים לכלוך ושמן נוטים להצטבר על קצה החיצוני של המבודד, וגורמים להתנעה מנוע קשה.

ליקויים במצת – הליקויים במצת במהלך השימוש הם כדלקמן: לכלוך/סתימה, הצתה מוקדמת, כשלון הבידוד ושריפת האלקטרודות.

הלכלוך או הסתימה נגרמים עקב שבירת הבידוד, דבר המאפשר לניצוץ לעבור לאדמה, ללא קפיצה על מרווח האלקטרודות. מצב זה יכול להיות מלא או חלקי. במקרה של ליקוי חלקי של הבידוד, הניצוץ יהיה חלש או לסירוגין, דבר שיגרום לפעולה עלובה. המצב יכול להיגרם על ידי פיה הנוצר על הבידוד. הפיח פועל כמוליך. כאשר משתמשים בגזולין אתילן, והמצת פועל בטמפרטורה גבוהה מדי, יכולים להיווצר משקעי עופרת על הבידוד, ולגרום לקצר במעגל. צורה אחרת של לכלוך נוצרת כאשר הפיח בין האלקטרודות מגשר על הרווח, אם המצת פועל בטמפרטורות נמוכות מדי.

הצתה מוקדמת תתרחש אם המצת פועל בטמפרטורות גבוהות מספיק בכדי להצית את התערובת לפני שהניצוץ נוצר. דבר זה יכול לקרות אם משתמשים במצת "חם" במנוע בעל דחיסה גבוהה, או במנוע שפועל בטמפרטורה גבוהה. חימום יתר של המצת נגרם גם עקב דליפת גזים חמים דרך המצת.

כשולן המצת נגרם על ידי שריפה והתפוררות הניצוץ על הליבה, קרוב לראש הציר. דבר זה נגרם עקב החום מהמתכת הנוגעת בבידוד. לאחר שהבידוד נחלש לרמה מסוימת, הוא ישבר ויגרום לקצר חשמלי. חימום יתר של הבידוד יכול להיגרם גם מהחום העודף המתפתח על ידי הדטונציה.

שריפת האלקטרודות מתרחשת בכל מצת. השריפה גורמת להרחבת המרווח, אשר חייב להיות מותאם מפעם לפעם. היצרן עושה כל מאמץ לבחירת הסגסוגת המתאימה שתתנגד לשריפה, ככל שניתן, על מנת להאריך את חיי המצת. המרווח הרצוי במצתים הינו 0.015 עד 0.018 אינטש, תלוי במגנטו. המרווח המירבי המותר לפני תיקונו הוא 0.025 עד 0.035 אינטש. ככל שהמרווח גדל, עקב שריפת האלקטרודות, ההתנגדות שהניצוץ חייב להתגבר עליה גדלה גם היא, והניצוץ יכול להיכשל חלק מהזמן בקפיצה בין האלקטרודות. דבר זה גורם לפעולת מנוע בלתי סדירה, בחלקה כאשר מאיצים או פועלים בתפוקת הספק גבוהה. מרווח גדול גורם גם להתנעה קשה, כיוון שהניצוץ המיוצר על ידי המגנטו חלש, במהירות סיבובי מנוע נמוכים.

חידוש – אחת לתקופה מסוימת, המצתים מוסרים מהמנוע ונשלחים לבית המלאכה לבדיקה וחידוש. התדירות משתנה מ- 25 עד 100 שעות פעולה של המנוע. המצתים מפורקים ומנוקים, מחליפים אטמים והאלקטרודות השרופות או המצולקות מעובדות מחדש. המצתים שנראים במצב טוב מורכבים מחדש, עם המרווח המתאים שנקבע באמצעות מדי מרווח. לאחר מכן הניצוץ נבדק בין האלקטרודות בלחץ הגבוה ביותר (בסביבות 150 פאונד) שהינו לחץ הפעולה המעשי במנועים. דבר זה מתבצע על ידי הברגת המצתים במיכל קטן בעל חלונות מול המצת, שדרכו ניתן לראות את מרווח המצת בעת הבדיקה. אוויר דחוס יבש, שעבר דרך לוכד לחות, או רצוי גז דו תחמוצת הפחמן בלחץ, מוכנס למיכל עד שנבנה הלחץ הנדרש. מזרימים זרם גבוה למצת, ובוחנים את הפעולה דרך החלונות.

למעשה, כל מצת יפעל בלחץ אטמוספרי. אם הבידוד חלש, המצת לא יפעל תחת לחץ. אם המצת פועל כשורה, הוא נבדק לדליפות גז, אם אין דליפות, המצת מוכן לשימוש.

כאשר מרכיבים את המצתים במנועים בעלי טמפרטורת פעולה גבוהה, יש לצפות את תברגי המצת במשחת סיכה לתברגים (תרכובת של גרפיט), להקטנת הנטייה להיתפסות המצת, דבר שגורם לקילוף התברגי. יש להימנע ממגע של המשחה עם האלקטרודות, אחרת המצת יתקצר. מפעילים למיניהם דורשים הידוק המצתים בעזרת מד פיתול, דבר זה מונע שינויי מרווח עקב הידוק לא מתאים.

אסור שתברגי המצת יהיה ארוך או קצר מדי, אחרת התברגי החשוף בתא השריפה יכול לגרום להצתה מוקדמת בתנאים מסוימים.

כיוון שהמצתים האחוריים פועלים בטמפרטורות הגבוהות יותר, חיבורי הצמד התרמי, המובילים למד טמפרטורת ראש צילינדר, ניתנים לחיבור תחת המצתים האחוריים של הצילינדרים החמים ביותר, במקום אטמי המצתים הרגילים. במקרה זה נדרשת זהירות למניעת קצר של המוליכים, או החיבורים, והרכבת אטם מתאים.

אוויר ודיחוס – אוויר המגנטו נדרש למניעת משקעים של חומרי בידוד. ניצוץ מתח גבוה גורם להיווצרות אוזון ותחמוצת חנקתית (nitrous oxide). האחרון, ביחד עם מים, ייצור חומצה חנקתית (nitric acid). חומצה זו, כאשר נמרכת על פני חומרי בידוד, גורמת להם למוליכות גבוהה. הדבר יוצר קצרים פנימיים, ועקבות פיח, הגורמים לנזק קבוע לחלקים המבודדים. לפיכך, אוויר קבוע נחוץ מאד. יש שלושה עקרונות של מערכות אוויר והם: (1) החלפה מוחלטת של האוויר במגנטו כל 5 דקות בקירוב, במהלך תנאי טיסה נורמאליים, (2) האוויר הנכנס למגנטו חייב להיות קר ויבש ככל האפשר, למרות שלחות מקרית באוויר לא תפגום בביצועי המגנטו, (3) מערכת האוויר חייבת להיות מתוכננת כך, שניתן לנקז באופן חופשי את המגנטו בכל מצב, למניעת הצטברות מים. דבר זה נכון גם לגבי צנרת האוויר, אשר חייבת להיות כזו שמים לא יקוו בנקודות נמוכות, יקפאו ויסתמו את הצינור.

במספר דגמי מגנטו ומפלגים, לפעולה בגובה רב, יש משאבות אוויר אינטגרליות, שמספקות לחץ וזרימת אוויר קבועים ליחידה.

כללי

מנוע המטוס הוא מנוע חום, המקבל את הספקו משריפת תערובת של דלק ואוויר. האנרגיה המשתחררת על ידי השריפה עומדת ביחס ישר למשקל, או המסה, של המטען הנכנס לצילינדרים. בהתאם, אם יחס דלק-אוויר נשמר קבוע בקביעת התערובת של ההספק המיטבי, ההספק המפותח בצילינדרים ישתנה ישירות עם מסת האוויר הנצרך. קשר בסיסי ישיר זה חופשי מהסל"ד, למעט כאשר האחרון משפיע על יכולת קיבולת המנוע לטפל באוויר.

ההספק המפותח בצילינדרים של המנוע ידוע כהספק מכשירי (IHP). לא כולו מועבר לציר המדחף. חלקו אובד בהתגברות על חיכוך פנימי, ובהנעת האביזרים. חלקו נספג בהנעת מנגנון הגידוש. מה שנשאר כהספק שימושי זמין בציר המדחף ידוע כהספק בלימה (BHP). במילים אחרות: $BHP = IHP + \text{אובדן הספק}$. הועיל ואבדן ההספק הוא פונקציה של הסל"ד וההספק, BHP אינו נושא קשר קבוע לסל"ד או למסת זרימת האוויר. למרות ש $BHP - \text{אינו עומד ביחס נוקשה לזרימת האוויר}$, הקשר בין השניים קרוב, ובניתוח סופי תפוקת ההספק של מנוע מבוקרת על ידי המסה, או משקל זרימת האוויר דרך המאייד, בזמן נתון. נובע מכך, שהמתכנן חייב לספק כמה אמצעים לאספקת מסת אוויר למנוע, בכדי להשיג תפוקת הספק גבוהה, שתספיק לכל המצבים בהם נדרשים ביצועים גבוהים. בכדי לקבל זאת בצורה משביעת רצון, בכל טווח הגבהים, וללא עליה גדולה מדי של טמפרטורת התערובת, או הגדלה משולבת של משקל וגרר, נוצרות הבעיות הקשות ביותר בתכנון מנוע מטוס.

המנוע כמשאבת אוויר – האוויר, או בצורה ממוקדת יותר החמצן באוויר, הינו החלק החשוב ביותר בנפח ובמשקל של התערובת הנשרפת. כ – 13 פאונד של אוויר, או 2.6 פאונד של חמצן, נצרכים בשריפה של פאונד אחד של דלק, בתערובת של הספק מיטבי. שלא כמו במנוע רקטי, שחייב לשאת את שני המרכיבים, המטוס הקונבנציונאלי נושא רק מרכיב אחד במיכלים שלו וטס דרך השני.

מנוע בעירה פנימית יכול להיחשב כמשאבת אוויר, אשר ביצועיה תלויים במידה רבה בקיבולת שלו. מחצית ממחזור ההספק שלו מוקדש לשאיבת אוויר. כאשר הבוכנה יורדת במהלך פעימת היניקה, אוויר נמשך לתוך הצילינדר. במהלך פעימת הפליטה הוא מוחזר לאטמוספירה, כחלק מגזי הפליטה, על ידי לחץ הבוכנה. בתהליך פעימות הדחיסה והעבודה, המנוע לוקח פסק זמן משאיבה, ליצירת מספיק הספק לשמירת פעילותו, ומעביר הספק לציר המדחף.

לחץ סעפת – משקל האוויר הנצרך על ידי מנוע תלוי בראש ובראשונה במהלך הכולל של הבוכנות, הסל"ד, טמפרטורת התערובת והלחץ השורר בפתחי היניקה. אם האחרון בגורמים אלו גדל, כמות אוויר רבה יותר מאולצת לתוך הצילינדרים, וכל עוד יחס הדלק-אוויר וגורמים אחרים נשארים קבועים, התוצאה הינה הגדלת משקל התערובת. כיוון שהאנרגיה המשתחררת על ידי השריפה נמצאת ביחס ישר למשקל התערובת, נובע שלחץ פתח היניקה הינו מדד חשוב של הספק, כאשר הגורמים האחרים ידועים. למעשה, לחץ זה אינו נמדד בפתח היניקה, אלא במסגרת של מדחס הגידוש. דבר זה ידוע כלחץ סעפת והוא מבוסס באינטש כספית. זהו לחץ אבסולוטי הנמדד מאפס PSI, ולא לחץ דיפרנציאלי או מכשירי, הנמדדים ממספר נקודות התייחסות כגון לחץ אטמוספרי.

כל שינוי או צמצום בזרימת האוויר, משפיעים על הלחץ במסגרת. לחץ סעפת, לפיכך, מבוקר בעיקר על ידי שסתום המשנק של המאייד. דבר שני, הוא מבוקר על ידי הלחץ הקיים בכניסת המאייד כתוצאה מהגובה, סל"ד, פעולת מדחס אוויר עזר או מדחס גידוש.

יש לציין שלחץ סעפת אינו הספק, אלא מדד נוח בלבד למדידת אחד מהגורמים המשפיעים על ההספק. הוא רק משולב עם סל"ד, ולאחר ביצוע מספר שינויים מסוימים לטמפרטורת אוויר המאייד, ניתן להשתמש בלחץ סעפת זה בהחלטה משוערת של BHP בהתייחסות לעקומות התפעול המתאימות.

טמפרטורת אוויר המאייד וזרימת אוויר – כל גורם, אשר משנה את מסת מטען התערובת, ישפיע על תפוקת הספק המנוע. גורם חשוב נוסף הוא טמפרטורת התערובת. כיוון שמשקל נפח נתון של התערובת, בלחץ נתון, הינו ביחס הפוך לטמפרטורה האבסולוטית ($abs. temp. = 0^\circ F + 459 // = 0^\circ C + 273$) נובע מכך שכל הגדלה בטמפרטורת התערובת, בלחץ סעפת נתון, תגרום להקטנת הצפיפות ומשקל התערובת, ומכאן בכמות האנרגיה הזמינה לשריפה שלה.

למעשה, טמפרטורת התערובת עצמה אינה נמדדת. במקום זה, טמפרטורת האוויר נלקחת כפי שהיא בכניסתה למאייד לפני הזרקת הדלק; ובקביעת מגבלות טמפרטורת אוויר מאייד בטוחות, ניתנת אפשרות להשפעת הקירור של התאיידות הדלק, לעליית החום עקב הדחיסה במגדש, ולשינויי טמפרטורה אחרים המתרחשים בין המאייד לצינור היניקה.

טמפרטורות אוויר מאייד גבוהות אינן רצויות, לא רק משום שהן גורמות להפסד הספק, אלא גם משום שהן יכולות להוביל לדטונציה, ובהמשך לכישלון מנוע. לפיכך, הצורך להעביר תערובת אוויר-דלק, בטמפרטורות הנכונות, לצילינדרים, הופך להיות אחת מהפונקציות החשובות של מערכת היניקה.

מנוע ללא גידוש – אם התערובת מאולצת לתוך הצילינדרים פשוט על ידי הלחץ הנובע מהאטמוספירה, המנוע מכונה "מנוע יניקה טבעית", או מנוע ללא גידוש. מערכת יניקה כזו משביעת רצון בדרישות של ביצועים ממוצעים בגובה נמוך. מטוסי אימון ראשוניים מצוידים במנועים כאלו.

כאשר דגם מנוע זה ניתן מהקרקע, נחשפות המגבלות. אם הסל"ד נשמר קבוע והמצערת במצבה המלא, לחץ הסעפת יקטן עם העלייה לגובה, ותחושת אובדן הספק תאושר על ידי מד פיתול. הסיבה לכך נעוצה ביכולת – או יותר נכון, חוסר היכולת של המנוע לשאוב מספיק אוויר.

נניח למשל, שמנוע מספק BHP 500 בגובה פני הים, ולייצור הספק זה, צורך במשך שעה 43,000 רגל מעוקב של אוויר השוקל 3,300 פאונד בגובה פני הים. בגובה 10,000 רגל, 43,000 רגל מעוקבים של אוויר שוקלים 2,460 פאונד ובגובה 19,000 רגל רק 1,810 פאונד. היות ותפוקת ההספק של המנוע תלויה ביכולתו לצרוך אוויר בפאונד ולא ברגל מעוקב, נובע מכך שההספק יקטן עם העלייה לגובה, כך שיתקבל BHP 250 בגובה 15,000 רגל.

הגדלת קיבולת השאיבה – הבעיה בתכנון מנוע, שישמור את תפוקת ההספק בגובה, נפתרת על ידי הגדלת קיבולת שאיבת האוויר על ידי המנוע. ניתן להשתמש בשלוש שיטות להשיג זאת:

1. הגדלת מהלך הבוכנה על ידי הוספת צילינדרים או הגדלתם – זוהי שיטה מגושמת, כיוון שנדרשת הגדלת המנוע ללא הגדלת יחס ההספק למשקל של המנוע.
2. הגדלת הסל"ד – דבר זה מגדיל את שיעור השאיבה של המנוע, אולם מציע רק פתרון חלקי לבעיה, כיוון שהכוחות הצנטריפוגליים מטילים מגבלות מהירות.
3. גידוש – שילוב של משאבת אוויר מיוחדת במנוע, כמתואר בציור 30, שתפקידה העיקרי הוא לדחוס יותר משקל אוויר לתוך נפח קבוע, המטופל על ידי הבוכנות. זוהי השיטה הנפוצה ביותר להגדלת קיבולת שאיבת האוויר של המנוע, כיוון שאינה מגדילה את הסל"ד או מידת חטיבת הכוח, ומוסיפה, מעט יחסית, למשקל למנוע הכולל.

מדחס הגידוש – מדחס הגידוש הקונבנציונאלי, מונע תמסורת, הוא מדחס אוויר צנטריפוגלי, הממוקם בין המאייד וצינורות היניקה. בדרך כלל הוא מותקן בין חטיבות הכוח והאביזרים האחוריות. המרכיבים העיקריים שלו מורכבים משלוש יחידות עיקריות:

1. מאיץ – לאחר עזיבת המאייד, האוויר חולף דרך צוואר המגדש למאיץ. המאיץ מונע במהירות של פי 6 עד 14 פעמים בקירוב ממהירות גל הארכובה. עקב מהירותו הסיבובית הגבוהה, הוא מקנה אנרגיה מהירות גדולה לאוויר.
2. מפזר – כשהתערובת עוזבת את המאיץ, היא עוברת למפזר. שבשבות המפזר מוודאות זרימה חלקה, ומאפשרת לתערובת להאט, בעוד היא נעה החוצה, וכתוצאה, לחץ המהירות מהמאיץ הופך ללחץ סטטי.
3. מאסף – לאחר עזיבת המפזר, התערובת מאוחסנת רגעית ומושווה במאסף, ומשם מועברת לצילינדרים דרך צנרת היניקה. לחץ הסעפת נמדד בטבעת המאסף.

השפעה משנית של הגידוש – בעוד

שתפקידו העיקרי של הגידוש הוא להגדיל את מסת זרימת האוויר על ידי הגדלת הלחץ, ומכאן את הצפיפות ומשקל התערובת, ישנן השפעות חשובות נוספות והן:

1. חלוקה שווה יותר של התערובת לצילינדרים עקב המבנה הרדיאלי של מדחס הגידוש ומיקומו.
2. אידיוי מושלם יותר של הדלק. הדלק מוזרק לתוך זרימת האוויר במאייד, או בכניסה למדחס הגידוש, דרך נחיר מסתובב המחובר לציר המאיץ. האידיוי מסתייע על ידי פעולת הערבול של המאיץ, והחום של הדחיסה.

3. עליית טמפרטורת התערובת כתוצאה מהדחיסה. בעוד שהיא עוזרת לאידיוי, באותו הזמן היא נוטה להוריד את הצפיפות של התערובת ובכך להקטין

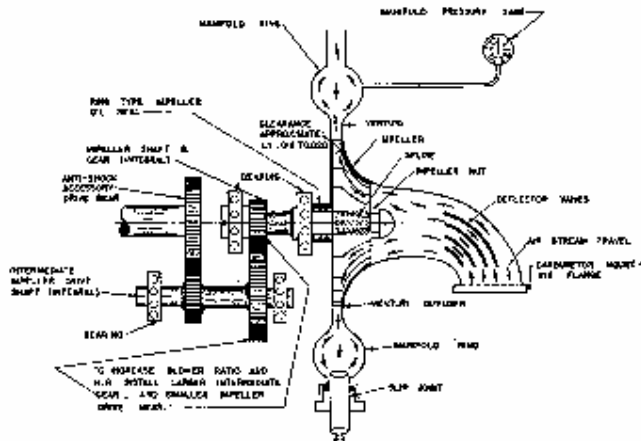


Figure 30.—Schematic lay-out of internal gear-driven supercharger (single ratio and stage).

את ההספק בכל לחץ סעפת נתון. במקרים קיצוניים, טמפרטורות גבוהות אלו יכולות להוביל לדטונציה. עליית הטמפרטורה גדלה במהירות עם סיבובי המאיץ. כתוצאה מכך, המנוע יכול להעביר יותר הספק בסל"ד נמוך מאשר בסל"ד גבוה, כיוון שטמפרטורות התערובת הנמוכות מאפשרות תפעול בלחץ סעפת גבוה, ללא סכנת דטונציה.

4. ספיגת הספק על ידי מנגנון הגידוש. הספק שאיבה נוסף נדרש בהכרח לכל עליה בזרימת האוויר. כיוון שההספק הנדרש להעברת משקל נתון של אוויר משתנה בריבוע מהירות קצה המאיץ בקירוב, נובע מכך, שלכל סל"ד ולחץ סעפת נתונים, ההספק הנספג על ידי מדחס הגידוש ישמר למינימום, על ידי פעולה ביחס תמסורת הנמוך ביותר האפשרי של גלגלי השיניים, שיאפשרו ביצועי מנוע נדרשים.

"האצה קרקעית" ("Ground Boosting") – נניח שמדחס הגידוש מורכב במערכת היניקה של מנוע נורמאלי בדוגמה הקודמת. הצילינדרים ימשיכו לשאוב 43,000 רגל מעוקב אוויר לשעה, אולם מדחס הגידוש ידחס כמות גדולה יותר של אוויר לתוך נפח זה. נניח ששווה ערך ל – 60,000 רגל מעוקב של אוויר חיצוני נדחסים לתוך קיבולת צילינדרים של 43,000 רגל מעוקב לשעה. בגובה פני הים, 60,000 רגל מעוקב אוויר שוקלים 4,600 פאונד בעוד ש – 43,000 רגל מעוקב, כפי שהוזכר למעלה, שוקלים רק 3,300 פאונד. כיוון שההספק המכשירי (IHP) יחסי לזרימת מסת האוויר, המנוע צריך להגיב להגדלת זרימת האוויר על ידי ייצור 700 כוחות סוס בצילינדרים, בעוד שבזרימת האוויר המקורית הוא מייצר רק 500. אם נזנח את אובדני החיכוך ואחרים, 50 כוחות סוס נדרשים עתה להנעת המאיץ, כך שהרווח הנקי הזמין הינו 150 כוח סוס לבלימה (BHP).

אם המנוע קשיח מספיק לספוג את תוספת העומס הנכפת על ידי לחצי הצילינדר הגבוהים, אשר נגרמים מהגידוש, ואם הדלק לא יוצר דטונציה עקב הגדלת הלחצים והטמפרטורות, המנוע יכול לפעול בגובה פני הים עם מצערת פתוחה במלואה, והספקו המלא שיכול להיות מופק בכל גובה. מנוע מגודש שכזה ידוע כ"מנוע מואץ קרקעית", והוא טיפוסי למנועי מטוסים של הרבה מטוסי אימון (כזכור, לפני כששים שנים).

גידוש בגובה – קיבולת שאיבת האוויר של המנוע ניתנת להגדלה על ידי הגדלת מידת המאיץ, או על ידי הנעתו במהירות גדולה יחסית לזו של גל הארכובה. רמת הגידוש המושגת על ידי אחת משיטות אלו נתונה לשתי מגבלות:

1. **עליית הטמפרטורה במדחס הגידוש** – דחיסת התערובת מלווה בעליה של טמפרטורה, שניתן ליחסה בחלקה לדחיסה, ובחלקה לחיכוך ולמעברולות. רצוי שעליה זו תהיה מזערית, על מנת להשיג את מירב צפיפות התערובת. חשוב יותר, עליה זו קובעת את מגבלות ההספק אשר חייבות להיכפות למניעת דטונציה, עקב טמפרטורות תערובת חריגות. שיקול אחרון זה הינו המגבלה החשובה ביותר לגבי מהירות קצה המאיץ.

2. **ההספק הנספג על ידי מדחס הגידוש** – כפי שנאמר למעלה, ההספק הנדרש להעברת משקל נתון של אוויר משתנה בריבוע המהירות, בקירוב, של קצה המאיץ. ניתן להגיע למהירות מאיץ, שמעליה לא יהיה יעיל יותר להניע את המאיץ, עקב ההספק המנוע החריג הנספג על ידי מדחס הגידוש. המגבלות הנכפות על ידי עליית הטמפרטורה יגיעו הרבה לפני מהירות זו. להשגת ביצועים טובים יותר מהמנוע שניתן כדוגמה למעלה, מתקנים מדחס גידוש בעל קיבולת גדולה יותר במקום זה שמפיק "האצה קרקעית". למאיץ של מדחס הגידוש החדש יש מהירות קצה גבוהה יותר, והוא אמור לפעול במגבלות הדטונציה הנכפות על ידי עליית הטמפרטורה. הוא מספק לצילינדר קיבולת שאיבה של 43,000 רגל מעוקב לשעה בשווה ערך של 85,000 רגל מעוקב לשעה. בגובה פני הים, 85,000 רגל מעוקב לשעה של אוויר ישקלו 6,500 פאונד, וההספק הפוטנציאלי הזמין בגל הארכובה (בהזנחת הפסדי חיכוך) יעלו מ – 700 כוחות סוס ל – 1,000. המאיץ בעל הקיבולת הגדולה יותר סופג 100 כוחות סוס, במקום 50, ומשאיר 900 זמינים בציר המדחף.

מגבלות גידוש – הספק של רק 900 BHP זמין בציר המדחף. אפשר להחליט בכמה מהספק פוטנציאלי זה ניתן למעשה להשתמש, אם המנוע נלקח לגובה, ומתחילים הנמכה הדרגתית מ – 25,000 רגל במצערת מלאה וסל"ד מירבי מותר. ההנמכה מתחילה כשמשתמשים בדלק של 87 אוקטן, כלומר דלק נגד דטונציה בערך נמוך. כשהגובה יורד, הלחץ והטמפרטורה של מטען האוויר עולים עד גובה של 13,000 רגל, הם מגיעים לערך הקריטי לסוג זה של דלק, ומתחילה דטונציה. בנקודה זו המנוע מפתח הספק של 570 BHP.

יש עדיין מעט הספק פוטנציאלי נוסף זמין בגובה נמוך, אולם בסל"ד המותר המירבי הנתון, הספק נוסף זה לא יושג ללא דטונציה. מתחת ל – 13,000 רגל, המנוע חייב להיות מתופעל במצערת חלקית, וההספק המירבי שניתן למעשה להשתמש יהיה 570. הספק זה זמין במצערת חלקית מ – 13,000 רגל. מעל 13,000 רגל לא ניתן להשיג 570 BHP.

עכשיו מעבירים את בוחר הדלק למיכל בעל דלק של 100 אוקטן, בעל ערך גבוה יותר נגד דטונציה. ממשיכים הנמכה מ – 13,000 רגל בסל"ד מירבי מותר, ומצערת מלאה. ב – 10,000 רגל, המתאים ל – 635 BHP, הלחץ והטמפרטורה של התערובת הופכים קריטיים לדלק 100 אוקטן, ושוב מתחילה דטונציה. בדלק זה

תפוקת ההספק מוגבלת ל - BHP 635. הספק זה זמין במצערת חלקית מגובה פני הים עד 10,000 רגל, הגובה הקריטי.

בוחר הדלק מועבר עכשיו למיכל שלישי, המכיל דלק פלאים עמיד בפני דטונציה, וההנמכה ממשיכה כמקודם. עם דלק זה, הדטונציה אינה מהווה יותר גורם מגביל. בגובה 4,000 רגל יש רעש מכוער והמנוע נכשל, ביוצרו BHP 790, דבר המצביע שהמנוע הגיע למגבלת חוזק המבנה שלו. זהו, אם כן, ההספק לבלימה המירבי הזמין ללא תלות באיכות הדלק, ו - 4,000 רגל הינם הגובה הקריטי המתאים במצערת מלאה. כאשר המנוע נכשל ב - BHP 790, מדחס הגידוש צרך 90 כוחות סוס נוספים (הוזנחו כוחות חיכוך ואחרים). סך כל ההספק של 880 כוחות סוס הינו הקיבולת של המנוע IHP, כפי שהוכתב על ידי חוזק המבנה שלו, ללא תלות ברמת הגידוש. המנוע, שזה עתה תואר, אינו יכול ליצר IHP 1,000 או BHP 900 זמינים בגובה פני הים, וכל התפעול מגובה פני הים לגובה הקריטי, כפי שנקבע על ידי הדלק, או מגבלות מבנה המנוע, חייב להיות במצערת חלקית. מנוע כזה, שלגביו פעולה במצערת מלאה בגובה פני הים מוגבלת, או אסורה, ידוע בשם מנוע "גובה" (altitude engine).

השוואה בין מנועי יניקה טבעית, האצה קרקעית ומנוע גובה – ההבדל בין מנוע האצה קרקעית ומנוע גובה הוא בעיקרו בהגדרה. לשני המנועים, יניקה טבעית והאצה קרקעית, ההספק המירבי וההספק הפוטנציאלי התיאורטי הנוצר הם זהים. במקרה של מנוע גובה ההספק המירבי לשימוש הוא פחות מאשר הקיבולת התיאורטית. מתקבל על הדעת שמנוע יחשב מנוע האצה קרקעית עם דלק באיכות גבוהה, ומנוע גובה עם דלק באיכות נמוכה.

הדיון הבא עוסק בשלושה משתנים של אותו מנוע בסיסי. ההנחה היא שחטיבת הכוח והסל"ד זהים בכל מקרה, ההבדל היחיד הינו בדרגת הגידוש. יש לציין שמנוע ההאצה קרקעית, עקב ההספק הנמוך מאד שמכוון למדחס הגידוש, מספק יותר הספק (BHP) לציר המדחף בגובה פני הים מאשר מנוע מגודש ברמה גבוהה, המשתמש בדלק 87 או 100 אוקטן. הביצועים הטובים של מנוע האצה קרקעית הם יותר ממפוצים על ידי הביצועים העדיפים ביותר של מנוע מגודש ברמה גבוהה בגובה.

אין לתרגם את מגבלות המבנה על תפוקת ההספק המירבי כמשתקפות במנוע. בעיית המתכנן הינה לשמור מעט ביצועים רצויים לגובה הגבוה האפשרי, עם המשקל ומידת המנוע הקטנים ביותר, ובדלק האיכותי הזמין. דבר זה מושג במנוע גובה, או מגודש ברמה גבוהה, על ידי אספקת קיבולת שאיבה הגדולה מאשר נדרש, או בטוח לשימוש בגובה פני הים או קרוב לו, בכדי לעמוד בדרישות שאיבה גדולות יותר בגבהים. כיוון שקיימת סכנה שהמפעיל יעשה שימוש לא מכוון בהספק עודף זה בגבהים נמוכים, על ידי חריגה ממגבלות לחץ סעפת בטוחות, חיוני שיפעיל זהירות ושיפוט להגן על המנוע מפני תוצאות של תפעול בלתי מוגבל.

יב. מערכת התנעה, מתח וויסות מתח

עקב התיישנות המערכות המתוארות בספר, וחוסר הרלוונטיות שלהם למטוסים של היום, פרק זה לא תורגם.

דלקים

כללי - שריפה או בעירה, במובן החימי, הינם שילוב של גורם אחד או יותר עם חמצן, אשר גורמים להיווצרות תחמוצות של הגורם, מלווים בכל המקרים בשחרור חום. החום הנוצר הינו התוצאה של התגובה החימית, אשר הופכת את האנרגיה (האגורה) הפוטנציאלית בדלק לחום, אשר בתורו ניתן להשתמש בו בתוך צילינדר סגור, ולהופכו בחלקו לאנרגיה קינטית (אנרגיית תנועה). ניתן להעביר ולהפוך את האנרגיה בהרבה דרכים, אולם היא לעולם לא נוצרת או מחוסלת.

חמצן (O_2), החיוני לבעירה, מרכיב בערך 20% מנפח האוויר. שאר 80% הם בעיקר חנקן, גז אדיש מאד שאינו מעורב בצורה חימית בתהליך הבעירה. חמצן, גז פעיל מאד, יתחבר עם מספר גדול של יסודות ורכיבים; בכל מקרה, כמות החום המשתחררת תלויה בטבעו החימי של החומר המעורב. מימן ופחמן כשלעצמם, או בצורותיהן השונות, מייצרים כמויות חום גדולות כאשר בוערים ומיצרים את מרבית הדלקים החשובים ליצירת חום והספק.

מימן (H) הינו גז קל ודליק מאד. כאשר מערבבים אותו באוויר ומציתים, הוא מתחבר לחמצן ליצירת תחמוצת H_2O (מים). תהליך הבעירה של חנקן טהור הוא מהיר מאד, ויכול ליצור לחץ גבוה מאד. פחמן (C) הינו מוצק הקיים בשלוש צורות: הפחמן המוכר קיים בפיח, גרפיט ויהלום. למרות השוני בתכונות הפיזיות, כולם פחמן טהור, ובתנאים מתאימים, צורה אחת ניתנת להפיכה לצורה אחרת, ללא שינוי במבנה החימי. בטמפרטורה גבוהה מאד, הפחמן יעבור ממצב מוצק למצב של אד. פחמן בצורתו הטבעית אינו קיים כנוזל. כאשר מציתים אותו בכמויות גדולות מאד של אוויר או חמצן, הפחמן בוער בלהבה נקייה ויוצר דו תחמוצת הפחמן (CO_2), גז לא פעיל ולא מזיק. כאשר אספקת החמצן אינה מספיקה (תערובת עשירה), תיווצר כמות מסוימת של חד תחמוצת הפחמן (CO). חד תחמוצת הפחמן הינו גז רעיל, אשר עלול לגרום למוות בנוכחותו באוויר בכמות של רק 4 חלקים ל 10,000 בנפח. הגז חסר צבע וריח ולפיכך אינו נותן התראה לנוכחותו.

כדלקים, המימן והפחמן קיימים לעתים רחוקות במצבם הטבעי. הם מופיעים בשילוב זה עם זה ויוצרים תרכובות הידועות כפחמימנים (קבוצת CH). אלפים רבים של תרכובות אלו קיימים ומסווגים כדלקים. הפחמימנים מופיעים בכמויות גדולות בפחם ונפט כמוצקים, נוזלים וגזים. נפט גולמי, עקב השפע שלו, והמוצרים הרבים שניתן להפיק ממנו, הפך למקור החשוב ביותר לתרכובות פחמימנים לדלקים למנועי בעירה פנימית וחומרי סיכה. למרות שתרכובות הנפט הגולמי שונות זו מזו בשדות השונים, כולן בנויות ממספר גדול של תרכובות פחמימניות, המסודרות בקבוצות. סדרת הפרפין היא הנפוצה ביותר. הנפט הגולמי יכול להיות מופרד בעזרת זיקוק ליצור המוצר המסחרי הרצוי, כולל בנזין, נפט ושמן סיכה.

בנזין – הבנזין הינו מיזוג, או תערובת, של נוזלי פחמימנים, המשתרעים בנקודת הרתיחה מבערך 90° עד 425° פרנהייט. לא נקבעו מגבלות מדויקות לטווח התערובת הזה. עקב המרווח בנקודת הרתיחה, ותכונות שונות אחרות, לא ניתן לערוך רשימת תקנים מפורטים של הבנזין. כל מדגם חייב להיות נתון למספר בדיקות, לפני שקובעים את תכונותיו המדויקות. רק לאחר בדיקה כזו, הבנזין מוגדר כמשביע רצון לשימוש כדלק בדגם מוגדר של מנוע שריפה פנימית.

אלכוהול ובנזול – למרות שחלק הנפט, הידוע כבנזין, נמצא בשימוש כמעט בלעדי כדלק למנועי שריפה פנימית, נחקרו גם דלקים נוזליים אחרים, והשתמשו בהם במידה מסוימת. האלכוהול והבנזול ביו המועדפים. האלכוהול הוא תרכובת של מימן, פחמן וחמצן, אשר ניתן להכין אותם מכל תרכובת אורגנית כגון גרגרי תבואה, עמילן או סוכר. תכונתם העיקרית, כדלק מנוע, היא יכולתם לעמוד בלחץ דחיסה גבוה, אשר מאפשר תפעול מנוע יעיל. החיסרון של האלכוהול, בהשוואה לבנזין, הוא ערך החום הנמוך, לחץ אידי נמוך ומשיכה למים. הבנזול הוא תרכובת פחמימנית המופק בעיקר מפחם. ניתן לדחוס אותו לרמה גבוהה, אולם יש לו ערך חום נמוך למשקל, שיעור שריפה נמוך, נקודת קיפאון גבוהה ומחיר גבוה יותר. שילבו אותו בהצלחה עם בנזין כתרכובת נגד דטונציה. לא משתמשים בבנזול כדלק תעופתי, עקב נקודת הקיפאון הגבוהה שלו.

דלק הנעה סילונית – בדלק הנעה סילונית למטוסים, למספר הביצוע אין משמעות, והטווח יהיה ביחס ישר לערך החום של הדלק אשר ניתן לשאת, בתנאי כמובן שהדלק נשרף לחלוטין, דבר שלא יהיה סביר במקרה של דלק כבד. משתמשים במגוון רחב של דלקים, החל מבנזין עד לנפט, בצורה מוצלחת במנועי סילון. הגורם החשוב יותר הוא, שתכנון נחיר מזרק הדלק ותא השריפה חייבים להיות כאלה, שיוודאו אידי נרחב ושריפה נאותה של הדלק.

נדיפות של דלקים נוזליים – כיוון שבדרך כלל השימוש בדלקים נוזליים הוא במנועי שריפה פנימית, הם חייבים להיות תמיד מומרים למצב אדים, לפני שהבעירה מתרחשת. תכונה זו של נוזל, שמאפשרת לו להפוך לאד, ידועה כ"נדיפות", תכונה שניתן לקבוע אותה על ידי בדיקת זיקוק ובדיקת לחץ אידי.

בבדיקת הזיקוק, הבנזין מחומם ומאודה בשיעור קבוע. נקודות הרתיחה נרשמות כאשר אחוזים שונים של דלק מופיעים מחדש. טמפרטורות אלו הן שקובעות את טווח הנדיפות בין נקודות הרתיחה ההתחלתיות והסופיות של הדלק הנבדק.

מבדק לחץ אידי מבוצע על ידי איטום מדגם דלק בתא סגור, המצויד במד לחץ. המכשיר מוטבל באמבט בטמפרטורה קבועה, וחיווי הלחץ נרשם. ככל שלחץ האידי של הדלק הנבחן גבוה יותר, כך הוא רגיש יותר לאידי.

לנדיפות הדלק חשיבות בקבלת החלטה באם ניתן להניע את המנוע בקור. בהקשר זה, ידוע היטב שבנזין אינו דליק במצבו הנוזלי, בעיקר מפני שהמולקולות של הנוזל לא יתערבבו עם החמצן שבאוויר. אדי בנזין כן יתערבבו עם החמצן, ויאפשרו בעירה מהירה מאד. מכאן ניוכח שדלק מנוע חייב להיות נדיף מספיק ליצירת אדים בעירים בטמפרטורה אטמוספירית נמוכה. נדיפות יתר של בנזין אינה רצויה, כיוון שנוצר מצב הידוע כ"חסם אדים". מצב זה הינו עקב היווצרות אדים בצנרת הדלק, אשר מגבילים את זרימת הנוזל, וגורמים לתערובת ענייה, ואפשרות לכישלון מנוע.

בדרך כלל מושגת פשרה בין שני המצבים הקיצוניים של התנדפות הבנזין, המאפשרת תכונות התנעה משביעות רצון, ובאותו הזמן חופשיות מחסם אדים, בכל המצבים הרגילים של התפעול.

דרוג מספר אוקטן ומספר ביצוע – "אוקטן" ו"מספר ביצוע" הם מונחים בשימוש כללי לציון ערך נגד דטונציה של תערובת הדלק בצילינדר המנוע. מנועי מטוסים מודרניים, בעלי תפוקת הספק גבוהה, התאפשרו בעיקר כתוצאה ממיזוג של דלקים בעלי שיעור אוקטן גבוה. השימוש בדלקים אלו אפשר הגדלה ביחס הדחיסה ולחץ הסעפת, עם שיפור בהספק ויעילות המנוע. יש לזכור, שאפילו דלק באוקטן גבוה יגיע לדטונציה במצבי תפעול חמורים, או אם בקורות מנוע מסוימות יתופעלו שלא כראוי.

בהקשר זה, נחוץ להתחשב בטבעה של הבעירה בצילינדר מנוע בעל תפוקת הספק גבוהה. התפשטות להבה ולחץ, הנוצרים בצילינדר במהלך בעירה נורמאלית, וכן במהלך דטונציה, ניתנים להיווצרות באותו המנוע על ידי תפעולו בדלק המכיל תכונות נגד דטונציה, ואז בדלק בעל תכונות לא מתאימות לדטונציה.

לימוד של תא השריפה במהלך בעירה נורמאלית, מתאר כיצד הבעירה של התערובת נוצרת באלקטרודות של המצתים (הצתה כפולה), ומתקדמת בהדרגתיות לכיוון מרכז תא השריפה. עקומת הלחץ מגלה שעליית הלחץ היא רגילה, למרות הגעתה המהירה לערך השיא, כאשר הבוכנה בנקודה מתה עליונה, או קצת לאחר מכן. לחץ גבוה למדי נשמר במהלך פעימת העבודה, וכך המנוע יכול לפתח את ההספק שלו. תפוקת ההספק יחסית ללחץ היעיל הממוצע. בדטונציה, יש סכנה חמורה לחלקי המנוע, הנובעת מלחץ שיא בלתי נורמלי בצילינדר.

כאשר מתרחשת דטונציה, אופי תנועת הלהבה שונה במקצת. התחלת בעירת התערובת, ושיעור התקדמות הלהבה, נורמאליים עד אשר ארבע חמישיות מהתערובת נשרפת. בנקודה זו מתרחש שינוי משמעותי. הבעירה מואצת במהירות כזו, שהתערובת הנוותרת בוערת כמעט מיידית, וגורמת לעליית לחץ מהירה ובלתי רגילה. עקומת הלחץ מטפסת לשיא גבוה מאד, ואז נופלת במהירות לערך נמוך, ונשארת נמוך יחסית במהלך שארית פעימת הכוח. הלחץ האפקטיבי הממוצע, וכתוצאה מכך תפוקת ההספק, קטנים באופן משמעותי כאשר הדטונציה מתרחשת. באותו הזמן המנוע נתון להלם מכאני. אם מאפשרים לדטונציה להמשיך, ההלם יהפוך לאלים, וכנראה יסתיים בפטאומיות ובכישלון מנוע.

כיוון שחשוב מאד להימנע מדטונציה בתפעול מנועי מטוסים, יש לשקול היטב את הגורמים העיקריים התורמים למצב זה. ערך הדלק נגד דטונציה, טמפרטורת הצילינדר, טמפרטורת התערובת, יחס התערובת ולחץ הסעפת, הינם הגורמים החשובים ביותר, וכל אחד יידון בנפרד. ניתן להכליל גורמים מכאניים רבים אחרים, אולם לאלו הנזכרים למעלה יש את המשמעות הגדולה ביותר לתפעול מנוע.

הן תפוקת ההספק, והן אמינות המנוע, תלויים במידה רבה בשימוש בדלק בעל ערך נגד דטונציה מספק או מספר האוקטן. השימוש בדלק נחות, במקרי חרום מסוימים, מלווה בסכנה חמורה של דטונציה, אלא אם המנוע מתופעל במצגרת חלקית. טמפרטורת הצילינדר והתערובת, במנועים בעלי הספק מסוימים, הינם תחת הבקרה של המפעיל בתחום מגבלות מסוימות. אין לחרוג מהערכים המרביים המוגדרים למנוע מסוים.

בנוגע ליחס התערובת ולחץ הסעפת, ברור שיש קשר מוחלט בין שני הגורמים הללו בתנאים של דטונציה. התפעול של מנוע בעל תפוקה גבוהה, בכוח מלא, דורש בדרך כלל תערובת עשירה מאד, בכדי להימנע מחימום יתר ודטונציה. לפיכך, תערובת ענייה באופן חריג, כאשר פועלים בלחץ סעפת גבוה, נחשבת סכנה מוחשית. כאשר לחץ הסעפת מופחת לערך המומלץ לשיוט ממושך, מומלץ לגרום לעיתים לתערובת ענייה מעט בכדי להקטין את תצרוכת הדלק. התהליך המדויק לשימוש בבקרת התערובת משתנה, מותנה באופיון של כל סוג מנוע.

כאשר מבטאים את התכונות נגד דטונציה של בנזין במספר מדויק, מסתמכים על דרוג האוקטן של הדלק. מערכת מספר האוקטן מתבססת על השוואה של כל דלק עם תערובת מסוימת של איזו אוקטן והפטן נורמאלי. מספר האוקטן של הדלק מוגדר כאחוז של איזו אוקטן בתערובת של איזו אוקטן והפטן נורמאלי, אשר יש להם

את אותם המאפיינים נגד דטונציה כמו הדלק הנשוא. לאיזו אוקטן יש ערך גבוה מאד נגד דטונציה' בעוד שההפסד גורם בקלות לדטונציה בצילינדר המנוע. תערובת של שני נזלים אלו תכיל ערך ביניים, תלוי באחוז היחסי של כל אחד מהנזלים בתערובת.

לביצוע בדיקה לדירוג האוקטן, משתמשים בבדיקה נגד דטונציה בצילינדר יחיד. מחברים שני תאי מצוף במאייד, כך שהדלק הנבדק יכול להיות מוזן מתא אחד, ותערובת האיזו אוקטן וההפסד מתא אחר. מפעילים את המנוע בתנאי עומס, אשר יוצרים דטונציה קלה, לחילופין, בדלק הנבדק ובתערובת הידועה לבדיקה. מוצאים את התערובת של האיזו אוקטן והפסד אשר יתאימו במדויק לערך נגד דטונציה של הדלק הנבדק בתא המצוף השני. כך שלמשל, אם הדלק הנבדק שווה באפיונו נגד דטונציה לתערובת של 70% איזו אוקטן ו- 30% הפסד נורמאלי, דירוג הדלק הוא 70 אוקטן.

דלקים שונים ביניהם בצורה נרחבת בדרוג מספר האוקטן ומספר ביצוע. יכולתם לייצר הספק תלויה פחות או יותר בדרוג שלהם. כאשר ציון הדלק הוא מספר של 100 או פחות מ- 100, מספר זה מציין את מספר האוקטן. אם המספר הוא 100 או יותר, זה מציין את ההספק היחסי שהמנוע יכול לפתח בבטיחות, עם נטייה לדטונציה שווה, וידוע כמספר ביצוע. כאשר הציון כולל שני מספרים, כגון 100/130 או 91/98, המספר הראשון מציין את הדרוג בתנאי תערובת ענייה והשני את הדרוג בתערובת עשירה. לפיכך, ציון של 100/130 מציין שיעור תערובת ענייה של 100 מספר ביצוע (כמו כן מספר אוקטן 100) ומספר ביצוע תערובת עשירה מציין שהמנוע יפתח 130% (פי 1.3) הספק בדלק זה בתנאי תערובת עשירה. שני המספרים, הראשון והשני ב- 91/98 מתייחסים למספרי אוקטן. לצערנו השיטה לציון הדרוג חייבת לזוז מסקאלה אחת לשנייה. זאת עקב העובדה שסקאלת מספר האוקטן בעל מגבלה עליונה של 100 הייתה מספיקה עד אמצע שנות הארבעים, אולם מיד לאחר מכן דלקים בעלי דרוג של למעלה ממספר אוקטן 100 בתנאי תערובת עשירה, נכנסו לשימוש כללי ונדרשה שיטת ציון מתאימה. הטבלה הבאה מציגת טווחי דירוג מקורבים של מרבית הדלקים הנפוצים:

מנוע תפוקה גבוהה.....115/145

מנוע תפוקה בינונית.....91/98 ו- 100/130

מנוע תפוקה נמוכה.....73 ו- 80

יש לציין את ההבדל בין דטונציה והצתה מוקדמת. תחת מספר מצבי תפעול של מנוע מתרחשת תופעה, שבעוד שלפעמים מבלבלים אותה עם דטונציה, ידועה כהצתה מוקדמת או הצתה עצמית. הצתה מוקדמת נגרמת בדרך כלל עקב חימום יתר של חלקים, כגון אלקטרודות המצת, שסתומי פליטה, משקעי פחם וכו', ברמה גבוהה שכזו, שהתערובת ניצתת לפני שהניצוץ מתרחש באלקטרודות של המצת. במקרים כאלה, המנוע יכול להמשיך לפעול עד אשר אספקת הדלק במאייד נגמרת, למרות שההצתה מופסקת.

טוהר – חשוב שהבנזין הסופי, לאחר זיקוקו, יהיה נקי ככל האפשר מחומרים זרים. רצוי במיוחד להסיר תרכובות גופרית מאכלת, בפרט בבנזין מטוסי. המכשיר לבדיקת הבנזין, לאיכול, מורכב מצלחת נחושת ממורקת מאד, ואמבטיית קיטור. לאחר אידיוי דוגמת הבנזין, שהוכנס לצלחת הנחושת, המרבץ האפור או השחור הדהוי במשטח הפנימי מציין את נוכחות החומר המאכל.

למרות שנקטטים כל האמצעים באחסנה וטיפול בבנזין מטוסי, אין זה חריג למצוא כמות קטנה של מים ומשקעים במערכת הדלק של המטוס. כמות קטנה של זיהום שכזה, נשארת בדרך כלל במסננים, הממוקמים בנקודות שונות במערכת הדלק. דבר זה אינו נחשב למקור סכנה גדול באופן כללי, בתנאי שהמסננים מנוקזים בתדירות קבועה. המים יכולים ליצור בעיה חמורה, כיוון ששוקעים לתחתית המיכל, ויכולים להיסחף בצורה חופשית למערכת הדלק. כמות קטנה של מים, שתזרום עם הבנזין דרך נחירי המאייד, לא תזיק במיוחד. כמות חריגה של מים, כשמגיעה למאייד, תגרום לצמצום הזרימה של הדלק בנחירים, דבר שיכול לגרום לתקלת מנוע. מפרידי מים יעילים מותקנים בצידו שירות. בתנאים מסוימים של טמפרטורה ולחות, מתרחש עיבוי הלחות על פני השטח הפנימיים של מיכלי הדלק. כיוון שכמות עיבוי זו היא יחסית לנפח הלא ממולא של המיכל (חלל האוויר), ברור שתדלוק מטוס, מייד לאחר הטיסה, תפחית סכנה זו.

כאשר יש חשש להמצאות מים במערכת הדלק, ניתן לנקז כמות קטנה של בנזין מהנקודה התחתונה של המערכת, ולבדוק עם נייר בדיקת מים. נייר זה מצופה במשחה אשר נמסה במים, אולם אינה מושפעת מהבנזין. מכניסים סרט נייר למיכל, עד שיגיע לקרקעית. אם יש מים, הציפוי יוסר מהחלק התחתון של הסרט, ובכך יציין את כמות המים. קיימות משחות נוספות לאיתור מים למטרה זו.

סיכום

הדלק המתאים לתפעול מנועי מטוסים צריך להיות כדלהלן:

1. נוזל זמין בכמויות גדולות, הבנזין עומד בדרישה זו.
2. נדיף מספיק בכדי לאפשר התאיידות בטמפרטורות נמוכות והבטחת התנעה של המנוע, כמות מספקת של תוספים קלים בבנזין עומדת בדרישה זו.

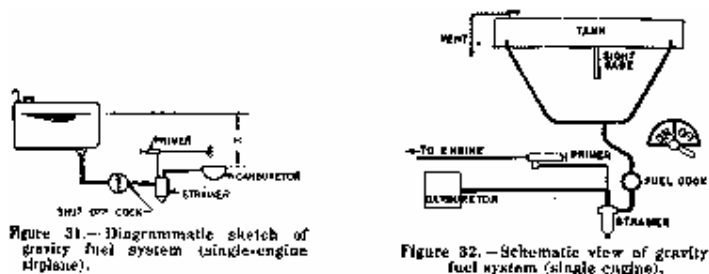
3. חופש מנטייה לחסם אדים למניעת אדים בצנרת הדלק, מהילה מדויקת של התוספים בבנזין עומדת בדרישה זו.
4. מספר אוקטן גבוה מספיק לאפשר דחיסה של הדלק המאוייד ברמה גבוהה, ללא דטונציה, שתגרם לתפוקת הספק גבוהה של המנוע. לבנזין בדרגה טובה עם תערובת של נוזל אתיל, איזו אוקטן או שניהם, יש דירוג אוקטן גבוה מאשר לשאר הדלקים.
- מהאמור בסיכום, ניתן לציין שהבנזין המכיל אחוז גבוה של איזו אוקטן הוא הדלק הרצוי ביותר למנועי מטוסים.

מערכת הדלק

כללי – מערכת דלק מתוכננת כיאות, חייבת ליצור את החלל הנדרש לאחסון כמות הדלק הדרושה במבנה המטוס, והיכולת להעברת הדלק למאייד בשיעור והלחץ הנאותים. המערכת חייבת להיות אמינה בכל מצבי הטיסה, ואם אפשר, פשוטה בתפעול. מחוונים, כגון מדי לחץ דלק ומחווני כמות דלק, מותקנים בכדי לספק חיווי מתמשך של תפקוד המערכת.

הפיתוח המתמשך של מטוסים מודרניים מלווה בהרבה בעיות ביחס למערכות הדלק. הניסיון בהתקנת מספר רב של מיכלי דלק קטנים, מאשר מעט גדולים, הסתיים בהגדלת הצנרת וסיבוכה, אולם אפשר שימוש יעיל של חלל אחסון הדלק. השימוש במדחסי גידוש חיצוניים, הגדיל גם הוא את הדרישות במערכת הדלק, במיוחד ביחס לקיבולת השאיבה בגבהים. המגמה של הפיתוחים המאוחרים במאיידים, היא כלפי הגדלת הלחצים להעברת הדלק. מערכת הדלק של מטוסים מודרניים היא כמובן מאד מסובכת, ודורשת התקנה זהירה, ויסות ובדיקה.

מערכת דלק בסיסית – כיוון שלכל מערכת דלק יש את המאפיינים המיוחדים שלה, יש להתחיל תחילה בתכנון הפשוט יותר.



מערכת הדלק בכובד (ציורים 31 ו- 32), למרות פשטות תכנונה, עדיין בשימוש במספר גדול של מטוסים בעלי הספק נמוך. היתרונות הם פשטות ואמינות, אולם לא ניתן להשתמש במערכת זו במטוסים בעלי הספק גבוה בגלל סידורי המבנה ודרישות הלחץ הגבוה. הלחץ המעשי הזמין ממערכת בכובד הינו כ- 1 PSI לכל גובה של 40 אינץ'. מכאן, ניתן להעריך שנדרש גובה של 120 אינץ' לייצור לחץ העברה של 3 PSI.

ציור 33 הינו דיאגרמה סכמטית של מערכת דלק מלאה מסוג פשוט יחסית. מספר יחידות נוספות הושמטו בכוונה, בכדי לציין בבהירות את העקרונות הבסיסיים. כשעוקבים אחרי זרימת הדלק, ניתן לשים לב למיקום מסנן הדלק הראשי וסידור שתי משאבות דלק עם שסתום הקלה יחיד. מערכות מסוג זה משתמשות בקו אוורור מקו יניקת האוויר למד לחץ ושסתום הקלה. הלחץ המדויק המיוצר על ידי משאבת הדלק, תלוי בוויסות שסתום ההקלה, ויכול להיות מ- 3 עד 30 PSI, בהתאם לסוג המאייד שמשמשים במנוע. באופן כללי, לחץ הדלק המתאים למאייד מסוג מצוף, או מזרק דלק, הוא 3 PSI בערך, לדגם דיאפרגמה ונטורי משתנה הוא 5 או 6 PSI, ולמאייד הזרקת דלק 13 עד 30 PSI.

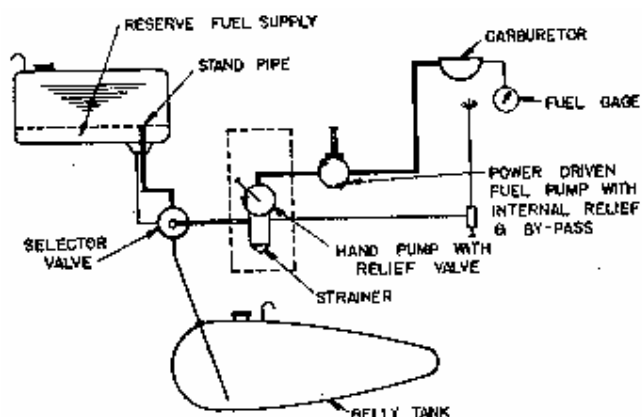


Figure 33.—Diagrammatic sketch of series fuel system incorporating two tanks.

בכל המקרים, מספרים אלו מייצגים לחץ דלק דיפרנציאלי רצוי, ומחוון הלחץ מחובר כך שיעביע על הפרש זה. במטוסים רבים, לחץ אוויר המאייד גבוה בהרבה מאשר הלחץ האטמוספרי הנורמלי, ההגדלה הנוצרת היא באמצעות אוויר מגח או מדחס גידוש חיצוני.

יחידות מערכת הדלק – על מנת להבהיר את עקרונות הפעולה של מערכות דלק מורכבות למטוסים, היחידות השונות מתוארות בנפרד בסעיפים הבאים:

מיכלים – מיכלי הדלק עשויים בדרך כלל מאלומיניום, סגסוגת אלומיניום או פלדת אל-חלד. הצורה שלהם משתנה, תלויה במטוס שעליו הם מתוכננים. מיכלים גדולים דורשים לוחות פנימיים להגדלת הקשיחות,

ולמניעת מכות דלק בזמן הטיסה. בכדי למנוע שיתוך במיכלי אלומיניום או סגסוגת אלומיניום, מרכיבים קפסולה של אשלגן חסר צבע קרוב לתחתית המיכל.

צווארי המילוי של מיכלי הדלק מורכבים כך, שיש חללי התפשטות אוטומטיים כאשר ממלאים את המיכל. קו אוורור מחלקו העליון של המיכל מוביל החוצה, כך שיקטין את סכנת האש מהדלק, או האדים, שיפלטו החוצה. אוורור המיכלים מונע בנית לחץ הפרשי עודף במהלך פעולת המטוס. חשוב ביותר שקו אוורור זה יותקן כיאות, ויהיה חופשי מכל חסימה.

מרבית מערכות הדלק מספקות דלק רזרבי, הן על ידי שימוש במיכל רזרבי נפרד או על ידי סידור לאספקה רזרבית בתוך המיכל. בכל מקרה, אספקת הדלק הרזרבי מתאימה בדרך כלל לפעולת מנוע של לפחות 20 דקות בהספק מלא.

מספר מטוסים, במיוחד מסוגים לטווח ארוך, יכולים להיות מצוידים במיכלי דלק מיוחדים, בכדי להגדיל את טווח השיט למשימות נבחרות. כאשר משתמשים במיכלים כאלו, יש לשים לב למשקל הכללי של המטוס בכדי למנוע משקל יתר.

לעתים ניתן למצוא מים במיכלי הדלק, הן כתוצאה מהתעבות או מילוי חסר זהירות. לפיכך, ניקוז סדיר של משאבות הדלק הינו חשוב ביותר.

קווים ומחברים – קווי דלק עשויים בדרך כלל מנחושת מחושלת או צנרת מסגסוגת אלומיניום, האחרון נפוץ יותר במטוסים המודרניים.

מידות הצנרת נקבעות על ידי דרישות אספקת הדלק של המנוע. למעט קווים קצרים בין חיבורים גמישים, הצנרת חייבת להיתמך כיאות על ידי תפסים למבנה. פס או צבע אדום, ליד כל קצה, מהווה זיהוי של קו דלק. חיבורים בין הצנרת ויחידות מערכת הדלק מתבצעים על ידי מחברים מסוגים שונים.

שסתומים וחוגות – לשסתומי הדלק מספר שימושים במערכות הדלק של מטוסים. הם משמשים כבוכרים למיכלי דלק, בוחרים מנועים, שסתומי הזנה וכו'. המידות ומספר היציאות של שסתומי דלק משתנה באופן טבעי בהתאם לסוג ההתקנה, שעבורם הם מיועדים. שסתומי הדלק חייבים להכיל קיבולת ספיקה מלאה של קווי הדלק, חייבים להיות חופשיים מנזילות, וחייבים לפעול במאמץ קטן בלבד. דרישות אלו יצרו מספר רב של יחידות הזמינות כיום.

שסתומי דלק בעלי גוף קוני מסתובב נמצאים בשימוש נרחב במערכות דלק, והם משביעי רצון. החיסרון העיקרי שלהם הוא הפיתול הגבוה הנדרש להפעלה, וכתוצאה, תחושה לא בטוחה בהפעלה שלהם. פותח דגם משופר יותר, המשתמש בזיזים למצבי ביניים בין המצבים הנדרשים, כך שהבוכר יקפוץ למצבים הנכונים.

ניתן למצוא גם שסתום מתכתי עם גומי סינטטי, המוכנס סביב הפתחים. דגם זה פשוט יותר, פועל בחופשיות ומספק תכונות איטום טובות.

החוגה שמשתמשים בה עם שסתום הדלק מציגה את מצבי החיוויים הנדרשים להתקנות המסוימות.

מסננים – המסנן הראשי במערכת הדלק הינו הפריט החשוב ביותר. תפקידו למנוע לכלוך, או גופים זרים אחרים, מלהיכנס למשאבת הדלק והמאייד, ועקב מיקומו הנמוך, ללכוד כל כמות של מים שעלולים להיות במערכת. בתחתית המסנן קיימת נקודת ניקוז לניקוז סדיר, וכל גוף המסנן ניתן להסרה וניקוי.

מסנני רשת גסים מותקנים במיכלי הדלק, בחיבורי היציאה. תפקידם ברור ואינו דורש הסבר.

גוף המאייד מכיל בדרך כלל מסנן קטן, בעל קיבולת מתאימה לעצירת גופים זרים, שעוברים דרך המסננים הראשיים, או גופים שעלולים לחדור כאשר מחליפים קווי דלק. מסנן המאייד דורש תדירות קטנה יותר של ניקוי מאשר המסנן הראשי.

משאבות ושסתומי הקלה – משאבות דלק נדרשות לאספקת דלק כאשר מתניעים את המנוע, ואספקה מתמשכת בלחץ הנאות בכל משך תפעול המנוע. סוגי המשאבות השונות ותכונותיהן המיוחדות מתוארות בהמשך:

משאבת יד ממוקמת בקרבה ליחידות מערכת הדלק האחרות, ומופעלת מתא הטייס על ידי ידית מתאימה. פשטות תכנונה אמין מאד, ופשוט מאד להפעלה. התאים שאינם מעבירים דלק מתמלאים, ויספקו את הדלק כאשר הידית מועברת למצב שני. משאבות אלו מותקנות בדרך כלל במצב אנכי, בכדי לאפשר פעולה נאותה של שסתום כיוון אחד. חיבורי הכניסה והיציאה מסומנים על גוף המשאבה בדרך כלל.

המשאבות המונעות מהמנוע, הנפוצות ביותר בשימוש מערכות הדלק במטוסים, הן מסוג שבשבות אקסצנטריות. כאשר רוטור המשאבה מסתובב, השבשבות מעבירות את הדלק מפתח הכניסה לפתח היציאה של המשאבה. כיוון שהמשאבה היא סימטרית בציר האנכי, היא תשאב דלק בכל כיוון ביעילות שווה. להפיכת כיוון הסיבוב יש השפעה כמו לשינוי מיקום המשאבה על תושבתה ב - 180° . מרבית המשאבות מדגם זה מסומנות לציון פתח היציאה לכל כיוון של סיבוב. בנקודה בה מתחבר ציר ההנעה לגוף המשאבה, מותקן אטם למניעת נזילת דלק. האטם עשוי בדרך כלל מפלדה המוחזקת בלחץ כנגד מיסב המשאבה. מעט מאד בעיות בשרות אובחנו בסוג זה של אטם. קיים צינור ניקוז, לניקוז דלק במקרה שהמשאבה מתבלה או מתעוותת.

במטוסים בעלי הספק גבוה, מותקנות בדרך כלל משאבות הגבר חשמליות, בכדי לוודא אספקת דלק נאותה למשאבה המונעת מהמנוע, במיוחד במהלך תפעול בגבהים או במזג אוויר חם, כאשר צפויים קשיים עקב חסימות אדים. ניתן להשתמש במשאבות אלו למטרות הזנת דלק, כלומר לאספקת דלק מכל מיכל שהוא, שאינו מספק בצורה נורמאלית דלק למנוע ממיכל זה. משאבות הגבר הינן בדרך כלל משני סוגים – המשאבה "הטבולה" המותקנת בתוך מיכל הדלק, והמשאבה המותקנת חיצונית למיכל הדלק.

בכדי לספק דלק בלחץ הרצוי למאייד, משלבים שסתום הקלה בגוף המשאבה. בכדי לוודא שלחץ דלק זה ישמר בכל מצבי התפעול, המשאבה מספקת יותר דלק מהנדרש על ידי המנוע, ועודף הדלק מוחזר על ידי שסתום ההקלה לקו הכניסה של המשאבה. שולטים בלחץ המדויק שמשאבה יוצרת על ידי ויסות מתח הקפיץ בשסתום ההקלה. משאבות דלק בשימוש במנועים בעלי הספק גבוה משלבות בדרך כלל אמצעים לשמירת לחץ דלק הפרשי קבוע במאייד, על ידי מתן אמצעים לפיצוי אוטומטי לשינויים בלחץ המאייד, עקב אוויר המגח והגובה. מרבית המשאבות מונעות מנוע, מהתכנון האחרון, משלבות גם שסתום עוקף, אשר מאפשר זרימת דלק דרך המשאבה, אם המשאבה נכשלת ומשתמשים במשאבת חירום.

בהתקנות מסוימות, בריחת דלק דרך שסתום ההקלה יוצרת צורת אדים חמורה במערכת, עם תוצאות של אובדן יעילות שאיבה. תופעה זו אובחנה במערכות בעלות מאיידים בלחץ גבוה ו/או מדחסי גידוש, הפועלים בגבהים. בריחת דלק מהצד של הלחץ הגבוה במשאבה, דרך שסתום ההקלה, גורמת לעתים אידוי של דלק במעברים. לתיקון מצב זה ניתן להשתמש במשאבה בעלת נפח משתנה ללא שסתום הקלה. בסוג זה של משאבה, מופעלת דיאפרגמה, על ידי לחץ הדלק, ומווסתת את מצב שריוול המשאבה ביחס לרוטור. הכוח הפועל על הדיאפרגמה הוא לחץ יציאת הדלק כנגד קפיץ מווסת. על ידי סידור זה, שריוול המשאבה מקבל את המצב המתאים להעברת הנפח הנדרש של דלק למאייד, בלחץ המתאים. כל שינוי בלחץ מהקביעה המתאימה, תיצור ויסות מידי של מצב השריוול. החלל מעל הדיאפרגמה מאוורר בדרך כלל לפתח כניסת האוויר למאייד, בכדי לשמור על לחץ הפרשי. המיתקן של משאבת נפח משתנה דומה מאד למשאבות בעלות שסתומי הקלה. נדרשת תשומת לב מיוחדת למיקום משאבת הדלק במעגלי הצנרת, עקב הנדיפות הגבוהה של הבנזין. באופן כללי, המשאבה חייבת להיות מתחת למיכלי הדלק, וקרוב אליהם ככל האפשר, בכדי להימנע מקשיים של חסם אדים.

אזהרות – במטוסים בעלי שני מיכלים או יותר, קיימת סכנה של גמר הדלק במיכל אחד, לפני העברת הבוחר למיכל אחר. לעתים תכופות הטייס עשוי להיות עסוק בפעילות אחרת, ולא ישים לב לגובה הדלק הנמוך עד אשר המנוע יפעל בצורה לא חלקה, עקב תערובת ענייה. בתנאים אלו נדרש לפעול מיידית למניעת כשלון המנוע. להקטנת סכנה זו, קיימות אזהרות לחץ דלק.

מנגנון ההפעלה של אזהרת לחץ דלק הינו דיאפרגמה (או מפוח), המחוברת ללחץ הדלק בצידה האחד, וללחץ האוויר במאייד בצידה השני. הדיאפרגמה מחוברת בצורה מכאנית למגעים חשמליים. המגעים מחוברים למקור מתח ולנורה אדומה בתא הטייס. במהלך פעולה נורמאלית של המנוע, לחץ הדלק מספיק גבוה כדי לשמור את המגעים פתוחים, כך שהנורה לא דולקת. כאשר נוצרת נפילה חמורה של לחץ, המגעים נסגרים, והנורה האדומה דולקת, ומזהירה את הטייס על לחץ דלק נמוך. מתקן זה הוא היעיל ביותר כשמשמשים במאייד אשר מאחסן כמות קטנה של דלק בתא האספקה. המפסק מורכב בסמוך מאד למאייד, ובאותו הגובה, בכדי להקטין טעויות לחץ. אין צורך בצמצמים, כמו אלו המורכבים בקו מחוון לחץ הדלק, בין המאייד והנורה. מאייד אשר דורש לחץ מתמשך לאספקת הדלק, יפסיק פעולתו מיידית עם נפילת הלחץ, לפיכך, אתרעה במערכות אלו אינה נותנת אזהרה מספקת לכישלון מערכת הדלק.

מחוון לחץ – מחוון לחץ דלק, הינו מחוון לחץ הפרשי בעל שני חיבורים. חיבור האוויר מתחבר לפתח היניקה של המאייד, וחיבור הדלק מחובר לתא הלחץ במאייד. החיווי מצביע על ההפרש שבין לחץ הדלק הנכנס למאייד, ולחץ האוויר בכניסה למאייד. במערכות אחדות, ללא מדחס גידוש או כניסת אוויר מגח, חיבור האוויר על המחווון פתוח ללחץ האטמוספרי הנורמאלי. בכדי לשחרר מכות לחץ, שגורמות לריטוט המחוג, מותקן צמצם בקצה צינור הדלק למאייד. ערך לחץ הדלק הנכון תלוי בסוג המאייד. בהקשר זה, יש לזכור שמחוון לחץ דלק מצביע על הלחץ הקיים במאייד בלבד, רק באם מורכב באותו הגובה כמו המאייד. אם המחווון ממוקם מעל המאייד, הקריאה תהיה נמוכה יותר מלחץ המאייד, ואם המחווון מתחת למאייד הוא יקרא לחץ גבוה מהנורמאלי. במטוסים מסוימים, יש לבצע תיקון לגורם זה בכדי לקבל קריאת לחץ דלק מדויקת בכניסה למאייד.

מונעי אדים – במערכות דלק רבות, כמות נכבדה של אדי דלק מצטברת לעתים בקו הלחץ המחובר למאייד. האדים נוצרים בעיקר עקב פעולת המשאבה המכאנית, במיוחד כאשר הלחץ בכניסת המשאבה נמוך מאד. במאייד מטיפוס מצוף, ההפרעה על ידי כמות קטנה של אדי דלק אינה רצינית, כיוון שתא המצוף מאפשר אוורור של האדים. היווצרות אדים תגרום לתקלה במאיידים רבים בעלי לחץ גבוה ובמזרקי דלק. לתיקון מצב זה משתמשים במונעי אדים. המנגנון הפנימי של מונעי האדים מורכב ממצוף ושסתום ניתוק. היחידה מורכבת

בדרך כלל בקו הלחץ לפני המאיד או המזרק. בזמן הפעולה, החלק העליון של הבית מכיל כמות קטנה של אדים ובחלק התחתון דלק. כאשר כמות האדים גדלה, המצוף יורד מעט, ובכך פותח שסתום מחט ומאפשר לחלק מהאדים לצאת. כאשר האדים יצאו, גובה הנזל עולה, והמצוף סוגר את שסתום המחט למניעת איבוד דלק. פעולת שסתום המחט מתרחשת לסירוגין, אולם יעילה בשחרור אדי הדלק. פתח היציאה מחזיר את האדים לאחד ממיכלי הדלק. מספר מאידים בנויים עם מונע אדים קטן כחלק אינטגרלי מיחידת המאיד. **מדי כמות** – למעשה, כל מדי הכמות הם מטיפוס מצוף אולם שונים בשיטה הנהוגה לשידור החיווי ללוח המכשירים. קיימות שלוש שיטות נפוצות: סוג מכאני ישיר, סוג הידראולי וסוג חשמלי. לכל הסוגים יש ויסות לטווח הפעולה ולמצב המחוץ, כך שהמחוץ ניתן לקריאה מדויקת על הסקאלה שלו. שיטות הוויסות משתנות לכל סוג.

מערכת תיחול – במהלך פעולת ההתנעה, אין זה רצוי לספק דלק למנוע דרך המאיד. הדלק במצב זה מהווה גורם סכנה לאש, במקרה של אש חוזרת (back fire). מרבית המאידים לא יספקו דלק עד לאחר ההתנעה. על מנת לספק למנוע את כמות הדלק הנאותה, ובאופן הנדרש להתנעה, פותחו מספר מערכות תיחול שונות. **תיחול רב נקודתי** – מערכות תיחול למנוע רדיאלי מחולקות לשלוש קבוצות. המערכת הראשונה מזריקה את הדלק לתוך פתחי היניקה של הצילינדרים, מעל קו האמצע של המנוע. ממפלג מרכזי מועברים קווים קטנים לכל צילינדר שנבחר לתיחול. המפלג מקבל דלק ממספר מקורות של לחץ דלק. מערכת זו מספקת דלק לנקודה שבה המנוע יכול להשתמש בדלק זה. הדרישה לקווים קטנים במספר גבוה מציגה בעיות בהתקנה, ולכן בלתי רצויה מאשר תיחול לשתיים או שלוש נקודות.

תיחול מפזר – במערכת השנייה מתבצעת הזרקה של נקודה בודדת בחלקו העליון של בית המפזר. הדלק מאולץ לתוך חטיבת המפזר דרך נחיר ריסוס. למערכת זו יתרון של מספר חלקים מועט, אולם היא מספקת דלק בנקודה מרוחקת יותר מהצילינדרים.

מתאם תיחול – המערכת השלישית מאלצת את הדלק דרך נחירי הזרקה, הממוקמים במתאם המאיד. הדלק מסופק עדיין רחוק מהצילינדרים, אולם בעיות ההתקנה הן מינוריות, וזה יתרון לגבי המערכות האחרות. דלק, המתעבה על הדופן הקרה של המנוע, יכול להיות מנוקז דרך שסתום ניקוז של מדחס הגידוש. כיוון שסתום זה מנקז דלק רק מחטיבת הכניסה של המאיץ, עודף דלק משתי המערכות האחרות ניתן לניקוז לתוך צינורות היניקה הנמוכים, ותורם לחסם הידראולי של הצילינדרים הנמוכים. במספר התקנות, מערכות מהסוג השני והשלישי משולבות לאספקת תיחול מתאם פיזור. דבר זה משביע רצון למדי, כיוון שהוא נותן פיזור טוב של הדלק דרך מערכת היניקה של המנוע, ויש בו מספר מזערי של חלקים, אולם עדיין קיימת אפשרות של חסם הידראולי.

מפעיל תיחול – עם לחץ דלק, הנוצר על ידי משאבות ידניות או משאבות הגבר חשמליות, ניתן לספק דלק למערכת התיחול באמצעות משאבת תיחול טובלן ידנית מוכרת, או באמצעות שסתום סולונואיד חשמלי. שימוש בשסתום סולונואיד מסיר את סכנת האש של קווי הדלק בתא הטייס. כמו כן זה מפחית את הצורך למערכת מסובכת של קווי דלק דרך המטוס. שסתום תיחול מסוג סולונואיד ממוקם בדרך כלל על גוף המאיד בקרבת חיבור כניסת הדלק.

בשסתום תיחול סולונואיד טיפוס, הסולונואיד מוזן כאשר מפסק התיחול בתא סגור. פעולה מגנטית מרימה את השסתום מעל תושבתו ומאפשרת לדלק לזרום תחת לחץ למערכת התיחול.

טכניקת תיחול – שימוש נאות במערכת התיחול בתהליך ההתנעה היה נושא לדיון מאז ומתמיד, כנראה בגלל שהוא הפריט ההפכף ביותר בתהליך ההתנעה. לשינוי טמפרטורה וצמיגות דלק השפעה על פעולת נחירי התיחול, והשפעה גדולה יותר על דרישות התיחול של המנוע. אין כל רווח בתיחול המנוע לפני חיבור המתנע כיוון שמרבית הדלק תתעבה על הדפנות הקרים של מערכת היניקה. לאחר העיבוי, דלק זה או שיתנקז לניקוז מדחס הגידוש או יקווה בצינורות התחתונים של מערכת היניקה, תלוי בנקודת ההזרקה, ויכול לתרום לאפשרויות של חסם הידראולי. לפיכך, לעולם לא יידרש לספק דלק דרך מערכת התיחול בכמויות כאלו שהדלק יתנקז דרך שסתום הניקוז של מדחס הגידוש. התיחול יעיל ביותר לאחר שהמנוע התחיל להסתובב. אז יש להשלים את התיחול באופן ובכמויות המוכתבות על ידי הניסיון של המפעיל ומצבי ההתנעה. תיחול חייב להיות מתמשך עד אשר המנוע פועל חלק, בזמן זה הדלק מסופק מהמאיד על ידי הזזת ידית התערובת ממצב חדל למצב עשיר.

במהלך סיבוב המנוע וההתנעה, ידית התערובת חייבת להישאר במצב חדל עד אשר המנוע פועל על דלק התיחול בלבד (הערת המתרגם: תהליך זה אינו ישים למטוסים הקלים שעליהם אנחנו טסים בימים אלו). דלק המאיד הקיים במנוע במהלך ההתנעה נחשב כסכנת אש, ודלק ממקור זה אינו עוזר במיוחד להתנעה.

במהלך ההתנעה, מערכת התיחול היא אשר מספקת דלק למנוע. המצערת נדרשת לשלוט על זרימת האוויר, כיוון שהיא מודדת את כמות האוויר הנדרשת להתנעה. יותר מדי מצערת, שגורמת לאספקת כמות אוויר עודפת, יוצרת תערובת ענייה, שהיא הסיבה העיקרית לאש חוזרת. פחות מדי מצערת, יוצרת תערובת עשירה

ותורמת להצפת המנוע. מצב המצער הרצוי ביותר במהלך ההתנעה הוא מצב השווה ל – 800 עד 1200 סל"ד של המנוע. מנועים המצוידים בחפיית שסתומים קטנה, יכולים להתניע במצער נדיבה יותר, בעוד שמנועים בעלי חפיית שסתומים גבוהה יותר דורשים מצב מצער מזערי למניעת אש חוזרת.

אש חוזרת הינה תוצאה של תכונות בעירה איטית של תערובות עשירות או עניות מדי. כאשר שסתום היניקה נפתח, תערובת אוויר-דלק במערכת היניקה יכולה להיות מוצתת על ידי התערובת, אשר עדין בוערת בתא השריפה או בסעפת הפליטה, כאשר שסתום הפליטה עדיין פתוח בזמן זה. תערובת ענייה יכולה לבעור כה לאט, שהלהבה או הגזים הלוהטים משתהים בצילינדר עד לפעימת היניקה הבאה. התערובת הטרייה תוצת אז ותנוע אחורה דרך מערכת היניקה, דבר המכונה "אש חוזרת" או "backfire". תערובת עשירה, מצד שני, לא תבער במלואה בצילינדר, ועודף הדלק ימשיך לבעור בצילינדר, או בסעפת הפליטה, כאשר שסתום היניקה פתוח. עודף דלק זה יוצת לעתים בסעפת הפליטה, ויגרום לנפץ רם או להבה. כמו כן, הלהבה יכולה להצית את התערובת הנכנסת ושוב ליצר אש חוזרת. ככל שחפיית השסתום גדולה יותר, ומהירות המנוע קטנה יותר, כך גדולה יותר התערבות התערובת הנכנסת עם גזי הפליטה, והנטייה לאש חוזרת גדלה.

משאבות האצה המופעלות מכאנית ומחברות למצער, אינן בשימוש נפוץ על מנועי מטוסים גדולים, אולם קיימות. שיטה זו של תיחול אינה אמינה למילוי דרישות התיחול של מנוע. סוג זה של משאבת האצה יסייע לתפעול המנוע מייד לאחר ההצתה, ויפחית את הצורך במערכת תיחול מייד לאחר שהמנוע התחיל לפעול ובקרת התערובת מועברת למצב עשיר.

מעגלי מערכת דלק טיפוסיים – היחידות והמעגלים החיוניים של מערכת דלק טיפוסית למטוס חד מנועי מתוארת בציר 33. ציור זה אינו מתייחס למטוס מסוים, הוא מייצג עקרונות סטנדרטיים של מערכת דלק. יש לשים לב להתקנה של מד לחץ. בנוסף, ניתן להתקין מנורת אזהרה. המערכת כמתואר ניתנת להתאמה למטוסים בעלי כניסת אוויר מגח ומדחס גידוש חיצוני.

מערכת דלק למטוס דו מנועי היא בעיקרה מערכת של זוג מטוסים חד מנועים המחוברים בקווי הצלבה, עם שסתום בכל קצה שלהם. כאשר שתי המערכות פועלות עצמאית, כגון במהלך ההמראה, סידור זה מבטיח מניעת אובדן הספק סימולטאני של שני המנועים, במקרה של כשלון פריט באחת ממערכות הדלק. על ידי שימוש בקווי הצלבה במהלך השיט, ניתן להזין מנוע אחד או שניהם מכל אחד ממכלי הדלק.

בהרבה מטוסים בעלי מספר גדול של מיכלי דלק קטנים, על הטייס לשים לב באופן תדיר לשסתום בוחר הדלק ומד כמות הדלק. בכדי לשחרר את הטייס מחובה זו, תוכננו מערכות דלק אוטומטיות. מערכות אלו מחייבות מעט מאד תשומת לב במהלך הטיסה והן די אמינות בפעולתן. קיימות התקנות לפעולה ידנית במקרה שפעולה אוטומטית אינה רצויה.

פעולה – בנוסף למידע הייחודי לכל סוג מטוס, יש לשים לב להנחיות הבאות לגבי תפעול כללי של מערכות הדלק:

במהלך פעולת קרקע, שסתום בוחר המיכלים חייב להיות במצב של כל המיכלים בזמן התפעול בכדי לבדוק את זרימת הדלק מכל מיכל. יש לשים לב לקריאת מחוון לחץ דלק. בודקים את אור האזהרה לפעולה נאותה ואת חיווי מד כמות בכל מיכל. במטוסים רבי מנועים כל מערכת נבדקת בנפרד עם שסתום ההצלבה במצב חדל.

את ההמראה מבצעים כאשר שסתום בוחר המיכלים מסובב למיכל הידוע כמכיל את כמות הדלק הנדרשת. אם אספקת דלק עיקרית ורזרבית מסופקת מאותו המיכל, בוחר הדלק ימוקם במצב רזרבי לפני ההמראה. כאשר משנים מצב מיכלים בעת הטיסה, הבוחר יוזז למצב המתאים, ואם מבחינים בריטוט לחץ הדלק ניתן להשתמש במשאבה הידנית. בכל מקרה אין להשתמש במשאבה הידנית שתגרום ליצירת לחץ דלק עודף. יש ליישם את אותן ההנחיות כלליות בעת נחיתה כמו בהמראה (הערת המתרגם: הנחיות אלו לא תמיד מתאימות לדרישות המוכרות לנו כיום וכך יש להתייחס אליהן).

במהלך תמרוני תפעול נורמאליים, מרבית מערכות הדלק אמינות לחלוטין, ולא דורשות תשומת לב מיוחדת. מכל מקום, מערכות סטנדרטיות אינן מתוכננות לפעול כיאות במצבי טיסה הפוכה או תמרונים בלתי מאושרים אחרים.

חומרי סיכה

כללי – חומר סיכה הינו חומר בעל תכונות שמנוניות, ומשתמשים בו רק להקטנת חיכוך בין משטחי מיסבים. ניתן להשתמש בו גם למניעת חלודה בחלקי מתכת הנתונים לשיתוך.

חומרי סיכה נפוצים מסווגים לחומרי סיכה מהחי, מהצומח ומינראליים, בהתאם למקור ממנו הם מופקים. חומרי סיכה מהחי מצוינים, בתנאי שאינם חשופים לטמפרטורות גבוהות. הם אינם מתאימים לסיכת מנועי שריפה פנימית, כיוון שהם יוצרים תחמוצות שמנוניות מעל טמפרטורות מסוימות. חומרי סיכה מסוימים מהצומח, כגון שמן זית ושמן מזרעי כותנה, הינם בעלי תכונות סיכה משביעי רצון, אולם אינם יציבים כימית תחת תנאים השוררים במנועי שריפה פנימית. שמנים מינראליים, בעלי איכות גבוהה, מחליפים כמעט לחלוטין את השמנים האחרים. יש להם תכונות רצויות רבות לשימוש בסיכה של מנועי שריפה פנימית.

תיאור וסיווג חומרי סיכה מינראליים – חומרי סיכה יכולים להיות מסווגים בקלות בהתאם לתכונות הפיזיות שלהם כמוצקים, חצי מוצקים ונוזלים. חומרי סיכה מוצקים משמשים למשטחי מיסבים, ליצירת משטח חלק מושלם, ובאותו הזמן לאספקת שכבה חלקה שמקטינה את החיכוך. חלוקה עדינה של חומר סיכה פועל גם למירוק עדין, המחליק את פני השטח שחוספסו על ידי בלאי עודף. חומרי סיכה מוצקים משביעי רצון במידה ניכרת במכונות בעלות מהירות נמוכה, אולם חסרים את היכולת לפיזור חום, אשר לעתים הינה דרישה חיונית. חומרי סיכה מוצקים מסוימים, הינם בעלי יכולת לשאת עומסים גדולים. מסיבה זו הם לעיתים מוספים לנוזלים, כך שיקטינו את הבלאי בין המשטחים הנתונים ללחצים גבוהים.

חומרי סיכה חצי מוצקים כוללים חומרים כגון שמנים כבדים וגריזים. התעשייה המודרנית דורשת הרבה חומרי סיכה כאלו ליישומים מיוחדים. הגריזים מספקים שירות טוב כאשר משתמשים בהם באופן תקופתי, אולם עקב מצבם, הם אינם מתאימים לשימוש ממושך או לזרימה במערכות סיכה.

נוזלים (שמנים) נמצאים בשימוש כללי במנועי שריפה פנימית מסיבות רבות. הם ניתנים לשאיבה קלה וריסוס, הם מספקים ריפוד טוב, והם יעילים בספיגת ופיזור חום. באופן תיאורטי, חומרי סיכה נוזלים מבוססים על הפרדה מעשית של משטחים כך שלא ייווצר מגע בין מתכות. בדרך זו, חיכוך מתכתי מוחלף בחיכוך פנימי (חיכוך נוזלי) של חומר הסיכה עצמו, כל עוד שכבת השמן לא נפגמת. ברור שתחת מצב אידיאלי שכזה לא יכול להיווצר בלאי. הרבה חלקי מנוע חיוניים מקבלים הגנה מתאימה על ידי אספקת שמן בלחץ ישיר. במקום ששיטה זו אינה מעשית, ריסוס יהיה מספק. חלקים הנושאים עומסים כבדים, במהירויות שפשוף גבוהות, משומנים, באם אפשר, בלחץ ישיר. בתהליך הזרימה במנוע, השמן סופג חום מחלקים שונים, ומפזר את מרבית החום דרך מקרן מתאים, או מחליף חום. בדרך זו חלקי המנוע מוגנים הן מבלאי והן מטמפרטורות חריגות.

חומר סיכה נוזלי אידיאלי יהיה מסוגל לספק שכבת שמן חזקה למניעת חיכוך מתכתי, ובאותו הזמן לייצר כמות מזערית של חיכוך צמיגות וגרר. לרוע המזל, גוף השמן (הצמיגות) מושפע משינויי הטמפרטורה ברמה כזו, שמצבים אידיאליים קשים להשגה. שינויים בטמפרטורות האקלים לבדם ייצרו לעתים שינוי מדהים בצמיגות השמן. אין זה בלתי אפשרי בכלל, לכמה דרגות של שמן, להפוך למוצקים מלאים במזג אוויר קר, עם זרימה חלשה וגרר של שמן. ולהיפך, שמן יכול להיות דליל בטמפרטורות פעולה גבוהות, ברמה כזו ששכבת השמן נשברת, דבר שמאפשר בלאי מהיר של החלקים הנעים. הבעיה העיקרית של הסיכה, הינה להשיג פשרה משביעת רצון בין שני התנאים שלמעלה.

שמני סיכת מנוע – נפט גולמי, אשר מספק את הדלק לכל מנועי בעירה פנימית, מספק גם את השמנים משביעי הרצון לסיכה. התרכובות הרבות מספור, המוכלות בנפט הגולמי, מסודרות בקבוצות, כגון סדרת הפרפין ואחרים. מדגם בודד של נפט יכול להכיל את כל הקבוצות, ביחסים משתנים. שתי השיטות הנפוצות העיקריות לזיקוק הם סחיטת חומצה וסחיטת תמיסה, האחרון פותח לאחרונה (לפני כששים שנים). תהליך זיקוק חומצתי מערב את הטיפול של חומר הסיכה עם חומצת גפריתנית, אשר מגיבה באופן כימי עם הרבה תרכובות בלתי רצויות, וכך מסירה אותן מהתערובת. ריכוז החומצה ומשך הטיפול חייבים להיות נשלטים בהירות. חשיפה בלתי מספקת תגרום לכישלון בהסרת התרכובות הבלתי רצויות, וחימום יתר יהרוס חלק מהמרכיבים. לסוג הנפט הגולמי יש השפעה ישירה, במרבית המקרים, על איכות המוצר הסופי כאשר מזקקים בחומצה.

סחיטת התמיסה, מצד שני, אינה מחייבת תגובה כימית. כפי ששמה מרמז, היא מפרידה את התרכובות השונות על ידי דילולם בתמיסות נבחרות מסוימות. מפיקים תועלת מהעובדה שהתרכובות הרצויות מסיסות בנוזלים מסוימים, בעוד המרכיבים הבלתי רצויים מסיסים בנוזלים אחרים. על ידי שימוש בתמיסה אחת או

יותר, חומר הסיכה ניתן לחלוקה בצורה מדויקת לחלקים הרצויים. בתהליך זה, ניתן ליצר שמן סיכה טוב מכל כל נפט גולמי שהוא.

סחיטת שמנים, על ידי אחת מהשיטות המוזכרות למעלה, מחייבת טיפולים רבים מעבר לתהליך הסחיטה הבסיסי. על מנת להסיר שעווה כבדה מהשמנים שזוקקו מפרפין על בסיס נפט גולמי, שיגרום לקשיים במזג אוויר קר, השמן מקורר ל -40°F , והשעווה הכבדה מוסרת על ידי מסננים מיוחדים או מפרידים צנטריפוגליים. הסינון חיוני ביותר, ומהווה חלק רגיש של מרבית שיטות הזיקוק. לאחר שזוקקו כראוי, החלקים העיקריים מעורבים בקפדנות ליצירת דרגות שונות של שמן הנדרש לפעולת התעשייה המודרנית.

החלטה לגבי מאפייני שמני סיכה – כיוון ששמנים מינראליים מיוצרים בהרבה דרגות, חשוב ביותר לבחון מפרטים ייחודיים כאשר בוחרים שמנים לשימוש במנועי שריפה פנימית. הגורמים המשמעותיים ביותר הם צמיגות, נקודת הצתה, יציבות חימית, נקודת סמיכות ותוספים.

צמיגות – דרגת ההתנגדות של שמן לזרימה מצינת את צמיגותו. שמן אשר זורם לאט מתואר כשמן צמיג, או שמן בעל צמיגות גבוהה. שמן שזורם בקלות אמור להיות בעל צמיגות נמוכה. כיוון שהצמיגות של מרבית השמנים משתנה בצורה ניכרת עם הטמפרטורה של השמן, נדרש תמיד, כאשר מציינים את צמיגות השמן, לציין גם את הטמפרטורה. באופן כללי, ככל שצמיגות השמן גבוהה יותר (בטמפרטורת הפעולה), כך גדול החיכוך הנוזלי. לכן, רצוי לבחור שמן בעל הצמיגות הנמוכה ביותר, אשר יספק שכבה שלמה, כך שהחיכוך יהיה מזערי. כאשר מתחשבים בעובדה שהשמן חייב לעתים לסוך מעל טווח טמפרטורות של 0 עד 300 מעלות פרנהייט, הבעיה הופכת למורכבת, ומחייבת לימוד זהיר.

על מנת למדוד צמיגות שמן, משתמשים במד צמיגות. על ידי סידור מתאים, כמות מסוימת של שמן מחוממת לטמפרטורת בדיקה תקינה, בדרך כלל מאה, מאה ושלושים או מאתיים ועשר מעלות פרנהייט. השמן מחומם בתא גלילי, אשר מצויד בנחיר יציאה דרכו השמן זורם לבקבוקון. הזמן (בשניות) הנדרש להעברת 60 סמ"ק של שמן מציין את הצמיגות האוניברסאלית בטמפרטורה הנתונה. לדוגמה, אם הזמן הנדרש למדגם מסוים הוא 120°F שניות ב- 210°F , לשמן תהיה צמיגות של 120 בטמפרטורה הזו.

על מנת לפשט את בחירת השמנים, הם מסווגים תחת מערכת SAE לשבע קבוצות (SAE10 עד SAE70), בהתאם לצמיגותם. דרגות 10 עד 40 נבדקות ב- 130°F והאחרים ב- 210°F .

נקודת הצתה – סיכת דפנות הצילינדר והבוכנות של מנוע שריפה פנימית דורשת התחשבות של גורמים אחרים, בנוסף לצמיגות השמן. עקב כמות החום הרבה המופקת מהצילינדרים במהלך פעימת הכוח, בדיקת הצתה של השמן הינה חשובה ביותר.

הבדיקה מבוצעת על ידי חימום מדגם שמן בכלי פתוח, בעוד הטמפרטורה עולה, להבה מועברת בצורה מחזורית בצורה איטית מעל פני השטח של השמן. הטמפרטורה שבה אדי השמן מעל הכלי יוצתו לראשונה נרשמת כנקודת ההצתה. כיוון שהגורמים האחרים מוגדרים כשווים, מועדף שמן בעל נקודת הצתה גבוהה בבדיקה, עקב דרגת ההגנה הגבוהה שהוא מעניק לצילינדרים והבוכנות, והסבירות לצריכת שמן נמוכה במהלך פעולת מנוע מתמשכת.

יציבות חימית – בנוסף לאפיונים שנזכרים למעלה, שמן טוב חייב להציג רמה גבוהה של יציבות חימית, בכדי להתנגד לתופעות של טמפרטורה גבוהה, לחות וחומציות, כל אלה נמצאים לעתים בבית גל הארכובה של המנוע. תנאים אלו יכולים לגרום ליצירת משקעים מיותרים במנוע, חומצה שיכולה לגרום לחלודה של חלקי מנוע מסוימים וכו'. לפיכך, חשוב מאד שהשמן, שבשימוש במנועי מטוסים, יהיה בעל איכות גבוהה, בנוסף להיותו בעל צמיגות מתאימה. בכדי לוודא ששמן מתאים יהיה בשימוש, יש לעקוב אחרי המלצות יצרן המנוע.

נקודת סמיכות – התנעה ותפעול במזג אוויר קר דורשים גם הם התחשבות מיוחדת. אין זה בלתי נפוץ להתניע מנועי בעירה פנימית בטמפרטורות של אפס מעלות ולמטה. מעיון בטבלת הצמיגויות-טמפרטורות, מגלים שבטמפרטורות נמוכות, צמיגויות השמן מגיעות למספרים גבוהים, אשר מחייבים פיתול גבוה מאד בהתנעה על מנת לסובב את גל הארכובה. יתר על כן, בטמפרטורה נמוכה מסוימת, השמן ייקרש או יקפא לחלוטין, כך שלא ייווצר מעבר שמן, אפילו אם ניתן היה להתניע את המנוע באמצעים מיוחדים.

באשר לשאלה האם נקודת סמיכות נמוכה, או עקומת צמיגות טובה, הינם הטובים ביותר להתנעת מנוע שריפה פנימית בטמפרטורה נמוכה, הניסיון מראה בבירור ששתיים חיוניות. מקדם הצמיגות חייב להיות טוב (רצוי ערך של 90 או יותר), ונקודת הסמיכות חייבת להיות בתחום של 5°F מטמפרטורת ההתנעה הממוצעת. נקודת הסמיכות של השמן הינה הטמפרטורה הנמוכה המיטבית שבה הוא יזרום, כאשר הוא קר ללא הפרעות. השמן הנבדק מוכנס לצנצנת בדיקה מזכוכית, ומקורר באמבט קירור, עד אשר הוא מפסיק לזרום כאשר צנצנת הבדיקה מוצאת מהאמבט, ומוחזקת במצב אופקי למשך חמש שניות בדיוק.

משתמשים הרבה שיטות מתוחכמות להתנעת מנועי מטוסים במזג אוויר קר, המשביע רצון ביותר מביניהם הוא דילול שמן הסיכה בבנזין לפני כיבוי מנוע, באם מצפים להתנעה קרה. על ידי הוספת אחוז קטן של בנזין מטוסים ישירות לשמן הסיכה, צמיגות השמן מופחתת בצורה ניכרת, וסיבוב המנוע בהנעה קל יחסית, אפילו

בטמפרטורות שמתחת לאפס. כשמתניעים מנוע שהוכן כך, השמן הקר המדולל שוטף בקלות, ומספק סיכה מתאימה. כאשר המנוע מגיע לטמפרטורות הפעולה הנורמאליות שלו, הבנזין מתנדף, והשמן חוזר למצבו המקורי. נמצאו מספר חלקי מנוע עם יתר חלודה שנגרמה על ידי הוספת נוזל אתיל משתך בשמן, אולם הנזילות הטובה יותר של השמן בטמפרטורות ההתנעה, וההתנעה הקלה יותר, שווה חיסרון זה. מערכת זו של דילול שמן, בליווי שינוי במערכת השמן, מספק את הפיתרון האמיתי לבעיית שמירת צמיגות שמן, נמוכה יחסית, במזג אוויר קר, לצורכי התנעה. באותו הזמן, הוא עומד בדרישות הטמפרטורות הגבוהות בפעולה מתמשכת.

תוספים – נמצא שלהוספת כמויות קטנות של תרכובות כימיות מסוימות לשמני הסיכה, במהלך היצור שלהם, יש השפעה חיובית על כמה גורמים חשובים כגון:

1. ניקיון המנוע (תוספי דטרגנטים)
2. יציבות השמן (מעכבי חמצון)
3. שיתוך (תוספים מונעי שיתוך)
4. חוזק שכבת השמן (משפרי חוזק שכבה)
5. מקדם צמיגות (משפרי צמיגות)
6. נקודת סמיכות (חומר מדכא)
7. התקצפות השמן (תוספים מונעי קצף)

תוספים אלו, הרשומים למעלה, נמצאים בשימוש בשמני סיכה מסוימים ברכבים, משאיות, אוטובוסים, טרקטורים, מנועי דיזל וכו', וכמו כן בתעשיות מסוימות. שמנים המכילים תוספים אלו, יכולים לעמוד בדרך כלל בתנאי תפעול חמורים בשביעות רצון רבה יותר, ולעתים ידועים כ – "Heavy Duty oils".

דרישות משמני מנועי מטוסים – בעיות הסיכה העיקריות, המוצגות במנוע מטוס, הן הטמפרטורות הגבוהות שנתקלים בהן במהלך הפעולה, לחץ המיסבים הגבוה על החלקים הפועלים ועכבות השמן בטמפרטורות ההתנעה. כל התנאים הללו מחייבים שמן בעל צמיגות גבוהה יחסית, ורצוי בעל תכונות צמיגות-טמפרטורה אחידות. רק שמנים כאלה יאפשרו תופעות שיכון נאותות, במיוחד בין חלקים מועמסים מאד, להגן עליהם מחיכוך ובלאי. כפי שצוין קודם, יציבות כימית ברמה גבוהה גם היא תכונה חיונית לחומרי סיכה למטוסים. בכדי לעמוד בדרישות תפעול מנוע מטוס, בטמפרטורות אטמוספיריות הנעות ממינוס 20 עד 110 מעלות פרנהייט, הומלצו לעתים הרבה דרגות של שמן. תשומת לב רבה ניתנה לבעיה זו, וכתוצאה, ניתן היום לכלול את כל הדרישות בשמן בעל שתי דרגות צמיגות ביניים בלבד. שמנים בעלי דרגת צמיגות גבוהה במיוחד אינם דרושים כאשר וסתי טמפרטורת שמן מתאימים מורכבים במערכת הסיכה. באמצעות וסתיים אלו, טמפרטורת השמן מופחתת במזג אוויר חם, וכתוצאה מכך הוגדלה הצמיגות המבטיחה סיכה נאותה. מצד שני, הדרגות הנמוכות, שנדרשו קודם במזג אוויר קר, אינן נדרשות גם הן, כיוון שמערכת דילול השמן הסירה את מרבית קש"י מזג אוויר קר.

בקצרה, התכונות העיקריות הרצויות בשמן מטוסים הינן כדלקמן:

1. צמיגות גבוהה מתאימה
2. עקומת טמפרטורת צמיגות ישרה (מדד צמיגות גבוה)
3. נקודת הצתה גבוהה
4. יציבות כימית
5. נקודת סמיכות נמוכה

שמן שזוקק כיאות מנפט גולמי יעמוד בכל הדרישות הנ"ל. בכדי להבטיח שמשתמשים בשמן בעל דרגה נכונה (צמיגות) ואיכות, רצוי ביותר לעקוב אחרי המלצות יצרן המנוע.

צריכת שמן – ישנן שלוש דרכים בהם שמן נצרך במנוע:

1. כאשר השמן נשרף בתא השריפה
 2. על ידי אובדן אדי שמן מהנשם
 3. על ידי נזילה, כאשר גל הארכובה, וצירים אחרים, חופשיים בבית גל הארכובה.
- הגורמים המשפיעים על תצרוכת השמן הם:

1. מהירות המנוע
2. טמפרטורת המנוע
3. מצב בלאי המנוע
4. תכנון ושילוב טבעות הבוכנה
5. מאפייני חומר הסיכה:

א. שמנים בעלי צמיגות נמוכה נצרכים בדרך כלל מהר יותר מאשר שמנים בעלי צמיגות גבוהה.

ב. כאשר הגורמים האחרים שווים, שמן בעל נקודת הצתה נמוכה צפוי להכלות במהירות גבוהה יותר מאשר שמן בעל נקודת הצתה גבוהה.

מהירות המנוע היא קרוב לוודאי הגורם החשוב ביותר המשפיע על צריכת השמן. לחץ השמן גדל עם המהירות, עד שמגיעים ללחץ המירבי, מעבר לו שסתום ההקלה שומר על לחץ קבוע. בדרך כלל לחץ מירבי מושג במהירות נמוכה, מכאן, גורם המהירות על לחץ השמן בין המשאבה והמיסבים הראשיים ניתן להזנחה. הגורם של הכוח הצנטריפוגאלי על השמן במובילי גל הארכובה מגדיל את לחץ השמן בצורה ניכרת בפני גל הארכובה. דבר זה מגדיל את שיעור זרימת השמן דרך מיסבים אלו. הגדלה במהירות המנוע, מגדילה את הטמפרטורה, ומקטינה את הצמיגות.

כמו כן, הדבר גורם לזרימת שמן מוגברת דרך מיסבי פין גל הארכובה. ככל שזורם יותר שמן דרך מיסבי פין גל הארכובה, כמות גדולה יותר מותזת על דפנות הצילינדר. במהירות גבוהה, הטבעות אינן צמודות לדופן הצילינדר כמו במהירויות נמוכות, אולם נוטות לפעול לעתים כמשטח החלקה – רוכבות על שכבת השמן. במצב זה, יותר שמן עובר לתא השריפה, במקום להיגרף חזרה לבית גל הארכובה.

טמפרטורה שמן גבוהה, צמיגות שמן נמוכה, נוטים להגדיל את האובדנים מקצוות הציר וצנרת הנשם. אובדנים אלו מוגדלים עקב זרימת הגז דרך הטבעות במהירויות גבוהות, דבר הנוטה להעלות את לחץ בית גל הארכובה, ולאץ יותר שמן ואדי שמן, או רסס, החוצה מבית גל הארכובה. במנועים בעלי הספק גבוה, ובעלי לחצים אפקטיביים ממוצעים גבוהים, אובחנו בעיות נכבדות של בריחת גז במנועים משופצים לפני שפני השטח הוחלקו תוך כדי פעולת המנוע. נעשו ניסיונות להימנע ממצב שכזה על ידי שימוש בטבעת בעלת שיבוץ של 90 מתכת רכה בתוכה, ובכך להפחית את משך ההתאמה של הדפנות.

בלאי של מיסבים שונים מגדיל את המרווחים ויוצר שטחים גדולים יותר דרכם השמן יכול לזרום החוצה בלחץ השמן הנתון. בעקבות כך, גדלה כמות השמן האובדת בנזילות והתזה על דפנות הצילינדר. בלאי של בוכנות וצילינדרים מאפשר שכבות שמן דקות יותר, ומגדיל את הקושי להקטנת האובדן הגדל כל הזמן, עקב כשלון האיטום של הטבעות.

הוגדר כבר שהקטנת צמיגות השמן מגדילה את תצרוכת השמן. לכן איפה, נצפה שהשמן הכבד יותר יעבור את טבעות הבוכנה בכמות קטנה יותר. יש להניח, אם כן, שהגדלת הצמיגות מקטינה את תצרוכת השמן. הגדלת הצמיגות מקטינה את תצרוכת השמן עד לנקודה בה התנקזות איטית של שמן צמיג יותר מדפנות הצילינדר, והגדלת הנטייה של הטבעות לרכב מעל שכבת השמן, גורמים לשמן לחלוף את הבוכנה אל תוך תא השריפה.

מסנני שמן – הרבה סוגים של מסנני שמן תוכננו על מנת להסיר לכלוך מוצק מהשמן במהלך זרימתו. מסננים כאלו הם משני סוגים כלליים: (א) מסנני זרימה מלאה, שבהם כל זרימת השמן עוברת דרך המסנן, ו- (ב) מסננים עוקפים, שבהם חלק קטן של זרימת השמן נעקף דרך המסנן, ומוחזר לעוקת המנוע או מיכל השמן. סוג הזרימה המלאה חייב להיות ממוקם בקו הלחץ של משאבת השמן, וחייב לכלול שסתום הקלת לחץ, אשר יאפשר לכל זרימת השמן לעקוף את המסנן, במקרה שהמסנן נסתם. בסוג העוקף משתמשים בעיקר במטוסים קטנים. המסנן נמצא בדרך כלל ב"בית מסנן" אשר חייב להיות מוחלף בתדירויות מוגדרות בכדי לוודא יעילות פעולה של המסנן.

ניקוז שמן – במהלך פעולתו, השמן חשוף תמידית לחומרים מסוכנים רבים, אשר עם הזמן יפחיתו בצורה חמורה את יכולתו להגן על החלקים הנעים. הגורמים העיקריים לזיהום הם משקעי דלק, חומצות, לחות, לכלוך, פחם וחלקיקים מתכתיים. עקב הצטברות של חומרים מזיקים אלו, נהוג לנקז את כל מערכת הסיכה במרווחי זמן קבועים, ולמלא שמן חדש. נהוג זה פתוח להתנגדות, שאומרת, שלא תמיד ניתן להחליט מתי בדיוק יש לנקז את השמן. אם מחליפים בתדירות גבוהה מדי, יגרם בזבז מיותר והוצאות. מצד שני, אם השמן בשימוש ממושך מדי, צפויים בלאי עודף ותקלות מכאניות. למרות שאין יחס מדויק בין אורך השירות של השמן ומצבו כאשר מנוקז, ניקוז תקופתי סדיר הוא תהליך בטוח.

מיכל שמן מרזבי – לאחרונה (לפני שנים שנה) פותח סידור לאספקת שמן לשימוש במערכות הסיכה (עוקה יבשה בעלת אספקה חיצונית) למטרת חימום השמן במהירות גבוהה יותר אחרי התנעת המנוע. מיכל קטן, או מרזב, משולב בתוך מיכל השמן הראשי במעבר ישיר של זרימת השמן. בעזרת סידור זה, כמות קטנה בלבד (עשרה אחוז או פחות) של אספקת השמן הכללית עוברת דרך המנוע. שארית השמן במיכל משמשת למילוי מחדש בלבד של השמן במרזב. עם מערכת זו אפשרית התנעה מהירה יותר, כיוון שאין צורך להביא את כל השמן במיכל לטמפרטורת הפעולה. יתרונות נוספים למיכל המרזבי הם כדלקמן:

א. צריכה מוגברת של חלק השמן שבשימוש בכל זמן נתון, מאפשר פחות התחמצנות והשפעות מזיקות אחרות.

ב. פחות קצף, כיוון שהשמן החוזר משוחרר בצורה סיבובית כנגד דופן המרזב.

ג. תדירויות נמוכות להחלפת שמן.

חומרי סיכה שונים – במקרים מסוימים, עקב טבעם של תנאי התפעול או ייחודיות התכנון, אין זה אפשרי או בלתי רצוי לסוך את היחידות באמצעות שמן מנוע. במקרים אלו נדרשים חומרי סיכה מיוחדים (במרבית המקרים גריזים). קיים מגוון רחב של חומרי סיכה אלו, לכל אחד מהם יש מאפיינים מיוחדים, למשל, יחידה אחת דורשת גריז בעל התנגדות למים, בעוד שנקודת המסה גבוהה הינה החשובה ביותר ביחידה אחרת. לעתים נדרשות תכונות אחרות, כגון עמידה בעומסים נמוכים, יציבות כימית ויכולת לתמוך בעומסים כבדים ובלתי רגילים. בכדי לעמוד במצבים אלו, פותחו סדרות של חומרי סיכה. הם מכילים תרכובות כימיות שונות, אשר מגינות על החלקים מפני בלאי, על ידי הגדלת חוזק השכבה של חומר הסיכה.

כיוון שמספר רב של חומרי סיכה צריכים להיות זמינים לשימוש נכון ביחידות מטוסים ואביזרים, יש להדגיש את העובדה שיש ליישם בקפדנות את ההוראות המפורטות. חומר סיכה מסוים מותאם עבור פריט או ציוד רק לאחר שבוצעו בו ניסויים מקיפים. החלפה של חומר סיכה באחר יהיה לא רצוי בדרך כלל, ולעתים מסוכן. למשל, לחלקים זהים (כגון מיסבים), יידרשו חומרי סיכה שונים כשמשתמשים בהם באביזרי מטוסים שונים. שמן מנוע יהיה ייחודי במקרה אחד, במקרה אחר יתכן ותידרש נקודת התכה גבוהה יותר. גריז גרפיט יכול להיות נכון במקרה אחר, למרות שהמיסבים זהים. כשסכים חלקי מטוס, יש לעקוב בקפדנות אחרי ההנחיות המפורטות בספרות הטכנית לגבי סוג ודרגת חומר הסיכה, ולגבי תהליכי הסיכה המעשיים.

סיכת מנוע

דרישות סיכה – כאשר משטח מתכת אחד נע מעל משטח אחר, נוצרת התנגדות, או חיכוך, אשר גורמים ליצירת חום ובלאי. אם שמנים חומר שמנוני, או חומר סיכה, בין שני המשטחים המתכתיים, בלאי המתכות נמנע, והחום קטן למינימום. ניתן לסווג את סוגי החיכוך בין משטחי מתכות כהחלקה, גלגול ומיסב כדורים. חיכוך החלקה, כמו זה שנתקלים בו במרבית המנועים במיסבי הטלטלים וחיבוריהם, דורש יותר סיכה מאשר חיכוך גלגול במיסבי גלילים. מתוך השלושה, חיכוך מיסב כדורים דורש את הכמות הפחותה יותר של סיכה.

במנועי מטוסים, מערכת הסיכה מתוכננת לטפל בבעיות של טמפרטורות גבוהות, עומסי מיסבים גבוהים ותפקוד נאות בכל מצבי הטיסה של המטוס, למעט טיסה הפוכה. הטמפרטורה הגבוהה של חלקי המנוע השונים נוטה לדלל את חומר הסיכה (להקטין את הצמיגות שלו), דבר המקטין את יעילותו בהתגברות על חיכוך מתכתי. לפיכך, יש לצייד באמצעים לקירור השמן באופן חיצוני. השמן המקורר, בהיכנסו בחזרה למערכת הסיכה של המנוע, מסייע בהקטנת הטמפרטורות הגבוהות של החלקים השונים, במיוחד המיסבים. העומסים הגבוהים של המיסבים, במיוחד בטלטלים, יוצרים חיכוך אשר מופחת למינימום על ידי אפשרות לשכבה עבה של שמן במרווח מתאים בין משטחי המיסבים. שכבת שמן זו מאפשרת שיכוך, אשר מפחית בצורה ניכרת את המאמץ של עומסי הזעזועים.

משאבת לחץ השמן, הצנרת שלה והמעברים, מזרימים שמן תחת לחץ לחלקים השונים של המנוע, כל עוד השמן מסופק לפתח הכניסה של משאבת השמן. החלק החיצוני של מערכת השמן מספק כמות זו תחת כל תנאי התפעול של המנוע למעט טיסה הפוכה. מערכת השטיפה חייבת לנקז ביסודיות את בית גל הארכובה מעודפי שמן. דבר זה מושג על ידי השימוש בניקוזים שונים ועוקה, המשולבים בחטיבה התחתונה של המנוע, ועל ידי שימוש במשאבת שטיפה. בצלילה חדה ומתמשכת, נסיקה תלולה, פניות אנכיות וטיסה הפוכה, יש אפשרות שמערכת השטיפה תפסיק לפעול, ותגרום להצטברות עודף שמן בבית גל הארכובה. בתנאים אלו, יש למנוע, במהלך התכנון ומיקום נשמי השמן של בית גל הארכובה, זרימת עודף שמן זה החוצה מהמנוע.

המערכת המספקת שמן תחת לחץ לחלקים הפועלים, ושוטפת לחלוטין את בית גל הארכובה משמן עודף, ידועה כעוקה יבשה, סוג של מערכת סיכה. מנועי עוקה רטובה, בדרך כלל בעלי צילינדרים אופקיים מנוגדים ובעלי הספק נמוך, משתמשים בחלל העוקה במנוע להכיל את כל שמן המנוע. למרות שחלק הלחץ של המערכת הינו עצמאי פחות או יותר מחלק השטיפה, שניהם חייבים לתפקד כיאות בכדי להבטיח סיכה נאותה.

חלק הלחץ של המערכת מורכב ממשאבת לחץ, שסתום הקלה וצנרת, או מעברים, המובילים לחלקים השונים הדורשים סיכה. בנוסף לחלקים אלו המיועדים לסיכה תחת לחץ, יש עוד הרבה חלקים, כגון בוכנות, דפנות צילינדר, מנגנון השסתום (במרבית המנועים בעלי הספק נמוך), תמסורות אביזרים וכו', אשר מקבלים סיכה על ידי התזה או ריסוס של שמן, המנוער על ידי סיבוב גל הארכובה והטלטלים. שסתום הקלת לחץ שמן, המורכב בחלקים מסוימים של מערכת הלחץ, ומווסת לשמירת לחץ שמן ספציפי, מסיט את עודף השמן חזרה למערכת השטיפה או לפתח הכניסה של משאבת הלחץ. במקרים בהם משתמשים בבקרי מדחף הידראוליים, ניתן להשתמש בשני שסתומי הקלת לחץ שמן, או שסתום הקלה מפצה, להבטחת לחץ חיובי לציר המדחף. במספר חלקים של מערכת הלחץ מתקנים מחברים לחיבור מד לחץ השמן. מסנן שמן מתאים, משולב במערכת להסרת חלקיקים זרים, משקעים וכו' מהשמן, לפני שהוא מגיע למשטחי המיסב.

חלק השטיפה של המערכת מורכב ממשאבת שטיפה, עוקות ניקוז, מסננים וקווים מחזירי שמן נדרשים. נדרשות עוקות ניקוז, אחד או יותר, לאיסוף עודפי השמן מבית גל הארכובה של המנוע, והן ממוקמות בחטיבה התחתונה של המנוע. מסננים משולבים בעוקות למניעת חלקיקים זרים, משקעים וכו', הנאספים במהלך הזרימה במערכת. הקווים המחזירים, או המעברים, מחברים את תאי העוקה לפתח היניקה של משאבת השטיפה, אשר מחזירה את השמן למיכל האספקה לשימוש חוזר בחלק הלחץ של המערכת.

מנוע עוקה רטובה – מערכת עוקה רטובה, הפשוטה ביותר, כוללת עוקת מנוע שבה נמצא השמן. גובה פני השמן מצוינים על ידי מוט אנכי המחובר למצוף מתאים. תחתית העוקה מצוידת במסנן העשוי מרשת בעלת סדרת פתחים ללכידת חלקיקים בלתי רצויים בשמן, ובאותו הזמן מאפשרת מעבר כמות מספקת של שמן לפתח הכניסה של משאבת הלחץ. החלקים המקבלים אספקת שמן בלחץ, מתיזים ריסוס לתוך מכלולי הצילינדר והבוכנה. לאחר סיכת היחידות השונות, שעליהם מותז השמן, השמן מתנקז חזרה לתוך העוקה, והמחזור חוזר על עצמו.

החסרונות של מערכת עוקה רטובה הן כדלקמן:

1. אספקת השמן מוגבלת על ידי מגבלות קיבולת העוקה.
2. קשה להתאים התקנות לקירור השמן כיוון שהמערכת הינה עצמאית.
3. טמפרטורות השמן על מנועים גדולים גבוהות יותר, כיוון שהשמן נתון לטמפרטורות התפעול המתמשכות של המנוע.
4. המערכת אינה מותאמת לטיסה הפוכה, כיוון שכל השמן יישטף החוצה מהמנוע.

היתרון העיקרי למערכת הינו, שניתן להשתמש בה בטווח ההספק הנמוך ביותר, כאשר נפח החום המופק אינו חריג, וכאשר לא נהוגה טיסה הפוכה.

סיכת מנוע רדיאלי – מעגל השמן במנוע רדיאלי טיפוס מתואר בסעיפים הבאים:

בחלק הלחץ של המערכת, השמן נכנס למשאבת הלחץ, אשר דוחפת אותו, דרך מסנן, לחיבורים הקדמיים והאחוריים של גל הארכובה. השמן נדחף דרך מעברים קדומים בחיבור האחורי של גל הארכובה, אשר מובילים לפין הגל, מיסב חיבור ראשי של הטלטל ופני מפרק הטלטל. קו אחד או יותר, או מעברים, מסתעפים מהחיבור האחורי של גל הארכובה, ומובילים את השמן למיסבים של צירי הנעת האביזרים השונים בחטיבה האחורית. הקו המסתעף מהחיבור הקדמי של גל הארכובה מוביל את השמן, תחת לחץ, לשסתום בקרה, שבעזרתו משתנה פסיעת מדחף פסיעה משתנה, ישירות לחלקו הקדמי של ציר המדחף. שסתום ההקלה של לחץ השמן מווסת להשגת הלחץ הרצוי במערכת, ומעביר את עודף השמן למערכת השטיפה או לצד היציאה של משאבת הלחץ. בנוסף, השמן נדחף החוצה בנקודות שונות במערכת הלחץ אשר סכות, על ידי התזה או ריסוס, חלקים כגון בוכנות, טבעות, דפנות הצילינדר, תמסורות הנעת אביזרים וכו', לפני התנקזותו לתוך מערכת משאבות השטיפה של המנוע.

במערכת השטיפה, עוקת שמן ממוקמת בחטיבה התחתונה של בית גל הארכובה ואוספת את כל עודפי השמן המנוקז ממערכת הלחץ. המסנן הממוקם בעוקה, מונע חלקיקים זרים מלצמצם את זרימת השמן החוזר למשאבת השטיפה, וגניש להסרה וניקוי תקופתיים. משאבת השטיפה אוספת את השמן מהעוקה ודוחפת אותו חזרה למערכת השמן החיצונית לשימוש מחדש.

בהקשר למערכת הסיכה, נשם בית גל הארכובה מורכב במספר נקודות בחלק העליון של בית גל הארכובה לשחרור לחץ פנימי, הנובע מטמפרטורות גבוהות ופעולת הבוכנה במהירות גבוהה. קיימות התקנות במבנה הנשם המאפשרות בריחת לחץ ללא אובדן שמן, בדרך כלל באמצעות שימוש בלוחות פנימיים. במספר נשמים, שסתום הכובד נשאר פתוח במצבים סדירים של המנוע, ונסגר כאשר המנוע הפוך. דבר זה נעשה בכדי למנוע מהשמן לזרום החוצה מהנשם במהלך טיסה הפוכה.

סיכת מנוע טורי ומנוע V – מעגל השמן דרך מנוע טיפוס מסוג טורי או V מתואר להלן.

בחלק הלחץ של המערכת, השמן נכנס למשאבת הלחץ, אשר דוחפת אותו דרך מסנן או רשת וצנרת פילוג לכל אחד ממפרקי גל הארכובה. מהחיבור האחורי של גל הארכובה, השמן נדחף לגל זיזים חלול, המאפשר סיכה למנגנון השסתום. בדרך כלל מייצרים התקנה במספר נקודות במערכת הלחץ, במנועים בעלי הספק גבוה, לפעולה הידראולית של מדחף פסיעה משתנה. במנועים בעלי תמסורת, קו לחץ מוביל לתמסורת האטה של ציר המדחף. שסתום הקלת הלחץ, המווסת להשגת הלחץ הרצוי במערכת, דוחף את עודף השמן לפתח היניקה של משאבת הלחץ. השמן נדחף למפרקי גל הארכובה, לפיני הגל ומיסבי הטלטלים באמצעות כוח צנטריפוגלי. בנוסף, השמן מותז באמצעות התזה או ריסוס בנקודות שונות במערכת הלחץ לסיכת חלקים כגון בוכנות, טבעות, דפנות הצילינדר, שסתומים, מסוטים, תמסורת אביזרים ומיסבים, לפני ניקוזו למשאבות השטיפה.

במערכת השטיפה יש שתי משאבות שטיפה; אחת מנקזת את העוקה הקדמית דרך מסנן, והשנייה מנקזת את השמן מהעוקה האחורית, ודוחפת אותו חזרה למיכל לשימוש מחדש.

נשם השמן מותקן בדרך כלל בקצהו הקדמי של המנוע, ובתוך בית גל הארכובה, למניעת אובדן שמן דרך הנשם במצבים מסוימים של פעולת המנוע. מספר לוחות משולבים בנשם לסיוע במניעת בריחת שמן, או אדי שמן, בכל תנאי הפעולה.

מערכת השמן

כללי – פרק זה עוסק ביחידות המערכת החיצונית בלבד. מערכת הסיכה הפנימית תוארה בנפרד למעלה. מערכת השמן מבצעת שני תפקידים. היא מספקת את הכמות הנדרשת על ידי תכולת מערכת השמן, ומשלבת אמצעים לקירור השמן החם היוצא מהמנוע. היא מתוכננת וממוקמת במטוס לאספקת שמן בכובד לפתח הכניסה של משאבת הלחץ במהלך כל מצבי הטיסה, למעט טיסה הפוכה.

יחידות מערכת השמן – היחידות העיקריות במערכת השמן כוללות את מיכל האספקה, הצנרת הנדרשת והמחברים, יחידת בקרת טמפרטורת השמן, מחוון טמפרטורת השמן ומחוון לחץ שמן. מספר מערכות שמן מודרניות כוללות גם מערכת דילול שמן.

מיכל הזנה – המיכלים בנויים בדרך כלל מאלומיניום, סגסוגת אלומיניום או פלדת אל חלד, ומתוכננים להתקנה במטוס, קרוב ככל האפשר למנוע. המיכלים חייבים להיות ממוקמים כך שפתח יציאה מהמיכל יהיה מספיק גבוה מעל פתח הכניסה למשאבת השמן של המנוע, כאשר המטוס על הקרקע, בכדי לספק כמות של שמן למשאבה. קיבולת המיכל חייבת להספיק לאספקת כמות של שמן ביחס לכמות הדלק שבמטוס. היחס הנהוג למטוס הינו בערך גלון אחד של שמן לכל 30 גלונים של תכולת דלק. דבר זה אינו כולל את השמן בצנרת, בווסת הטמפרטורה ובמנוע.

פתח היציאה של המיכל ממוקם בדרך כלל בחלקו התחתון ביותר, בכדי לאפשר הורקה מלאה בעת שהמטוס על הקרקע, או במצב טיסה שגרתית. פתח היציאה מסודר כך שכאשר המיכל חצי מלא מהקיבולת הרגילה שלו, הוא לא ייחשף בכל מצב טיסה רגיל. קו הכניסה מבקר הטמפרטורה נכנס לחלקו העליון של המיכל, ובדרך כלל הוא באותה המידה כמו הקו היוצא. שתי יציאות האוויר מובילות מחלקו העליון של המיכל לבית גל הארכובה של המנוע. המסנן ויחידת המכסה ממוקמים בצורה נוחה לבדיקת כמות השמן במיכל.

מיכל שמן, קווים ומחברים – צנרת מערכת השמן בדרך כלל יותר פשוטה מצנרת מערכת הדלק, ובעלת קווים בעלי קוטר גדול יותר. מיכל ההזנה מחובר בדרך כלל למתלה המנוע בתושבת קשיחה. נובע מכך שיש תנועה יחסית עקב רעידות, אשר יכולות להיות חמורות, בין יחידות מערכת השמן הקבועות והמנוע. רעידות אלו יכולות לגרום לכישלון התעייפות של הצנרת. לכן משתמשים בצנרת גמישה בין המנוע והחלקים הקבועים של מערכת השמן.

משתמשים בצנרת גומי לחיבורים הגמישים, והם נתפסים בעזרת תפסים סטנדרטיים. הצנרת המתכתית משתמשים בה במערכת השמן, עשויה בדרך כלל מסגסוגת אלומיניום. צנרת השמן מסומנת בפסים של צבע צהוב קרוב לכל קצה, למטרות זיהוי.

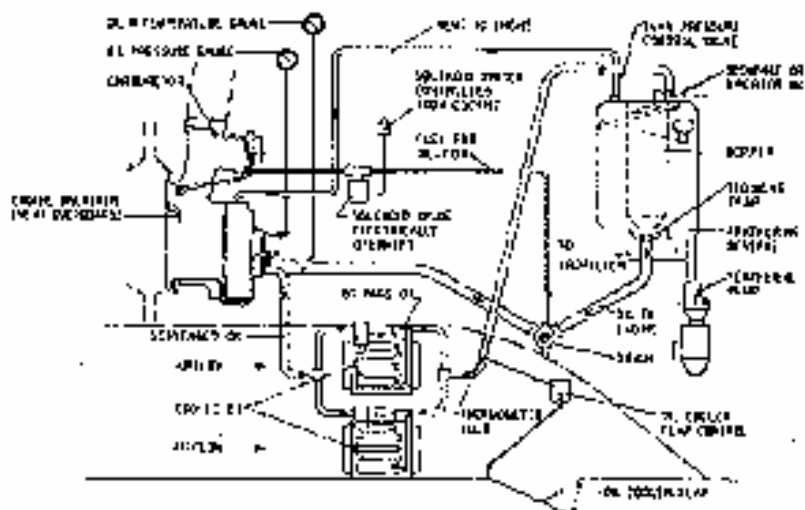
במערכת מורכב שסתום ניקוז. כניסה אחת לשסתום היא מהמיכל, והאחרת ממשאבת המנוע, שתיהן מנקזות לפתח משותף. השסתום מבוקר ידנית על ידי סיבוב ידית ממצב אנכי, שפותח את השסתום, למצב אופקי, שסוגר אותו. כאשר סגור, ידית השסתום נעולה במצבה למניעת תזוזות. במערכת דילול שמן, יש שסתום עזר בשסתום הניקוז, בכדי לאפשר ערבוב כמות מסוימת של דלק בשמן.

בקרת טמפרטורת השמן – משתמשים במספר גדלים של בקורות טמפרטורה לבקר את טמפרטורת הפעולה של השמן. יש לשמור את טמפרטורת הפעולה במגבלות מסוימות בכדי לבקר את הצמיגות לסיכה נאותה.

בקר טמפרטורת השמן, הידוע גם בשם מקרן שמן, ממוקם במערכת השמן בין פתח יציאת השמן מהמנוע, ופתח הכניסה למיכל ההזנה. הוא מורכב מיחידת ליבה, המוקפת במעטפת מתכתית, ושסתום בקרה טרמוסטטי, המשולב ביחידה לבקרת זרימת השמן בצורה אוטומטית, או דרך הליבה או סביב המעטפת, תלוי בטמפרטורת השמן. השמן מקורר על ידי תנועת האוויר הנעה דרך צינורות הליבה, בעוד השמן חולף סביב הצינורות. מקרני השמן הינם גליליים בדרך כלל, ומתוכננים כך שמכלול שסתום ההקלה מווסת את כמות השמן הנדחפת דרכו למיכל ההזנה. משתמשים בקטרים שונים לליבות השונות, תלוי בכמות השמן הזורמת דרך המנוע המסוים.

בבקרת טמפרטורת השמן משלבים שסתום הפועל בצורה טרמוסטטית, בכדי לשלוט בצורה אוטומטית במעבר השמן דרך המקרן. כאשר השמן הנשטף מהמנוע קר יחסית, השסתום הטרמוסטטי פתוח, ומאפשר לשמן לזרום סביב מעטפת הליבה לחלקו העליון של מיכל ההזנה, ללא זרימה דרך הליבה. כאשר השמן מגיע לטמפרטורה סדירה, השסתום הטרמוסטטי נסגר, ומכוון את השמן דרך הליבה למטרות קירור. למרות שניתן לשנות מעט את טמפרטורת הפעולה של השמן, על ידי שילוב מספר אטמים במכלול שסתום הבקרה הטרמוסטטי, חייבים להניח ששסתומים אלו אינם ניתנים לוויסות. הם מתוכננים בדרך כלל להסיט את השמן

מד לחץ – מד לחץ השמן בתא הטייס מחובר לקו הלחץ של מערכת הסיכה במנוע. נחיר צמצום ממוקם בקו מחוון לחץ השמן, בקצה שליד המנוע. במזג אוויר קר, ניתן למלא את צינור המחוון בשמן מכשירים, דבר המאפשר חיווי מהיר יחסית, ואמיתי, של לחץ השמן, אפילו בעת חימום המנוע, כאשר השמן בצינור המחוון עדיין קר.



מערכת שמן מטוס טיפוסית – על ידי עיון בציור 36, ניתן לקבל מושג כללי לגבי מעגל השמן מהמנוע ואילו. בהנחה שמיכל ההזנה מולא כיאות לגובה הנדרש, השמן זורם בכובד דרך צנרת גדולה לצד הכניסה של משאבת לחץ שמן המנוע, אשר דוחפת את השמן תחת לחץ דרך מערכת הסיכה הפנימית. משאבות השטיפה של המנוע מחזירות את השמן מעוקות השמן, דרך בקרת טמפרטורת השמן, לחלקו העליון של מיכל ההזנה. במרבית המקרים, בית גל הארכובה מאוורר דרך צנרת מתאימה לחלקו העליון של מיכל ההזנה. במנועים בעלי הספק גבוה,

יש לציין ששסתום הניקוז הראשי של מערכת השמן אינו מנקז שמן ממכלול בקרת הטמפרטורה, אותו יש לנקז בנפרד על ידי הסרת פקק הממוקם בנקודה התחתונה של המכלול.

כיוון ששימוש במערכת דילול השמן מגדילה את בעירת האדים בנשם גל הארכובה, מורכב צינור להובלת אדים אלו מקצה הנשם למדף הקירור.

הוראות תפעול – בעת מילוי שמן מנוע במיכל, אסור למלא אותו לחלוטין, כיוון שחייב להישאר חלל אוויר לצורך התפשטות. במרבית המיכלים, מכסה המילוי ממוקם כך שהגובה הנכון מתקיים בצורה אוטומטית. במספר מיכלים יש ברז גובה המאפשר בדיקה מדויקת לתהליך המילוי.

במהלך חימום המנוע על הקרקע, חשוב ביותר לבדוק בקפדנות את פעולת מערכת הסיכה. כאשר מנוע מותנע לראשונה, חיווי לחץ השמן יהיה באופן כללי גבוה מאד עקב הצמיגות הגבוהה של השמן. גם בלחצים גבוהים, שיעור הזרימה יכול להיות נמוך למדי. ומכאן, דרושה זהירות מיוחדת במהלך ההתנעה למניעת בלאי המנוע. באופן כללי, סל"ד המנוע חייב להישמר נמוך, עד שמבחינים בעליית טמפרטורת השמן, דבר המצביע על זרימה תקינה. ניתן לבצע המראה בטוחה רק לאחר פעולה ממותנת על הקרקע, בתנאי שחיווי לחץ השמן קבוע ובתחום הטווח המתאים, טמפרטורת השמן עולה לערך הנכון, והמנוע במצב משביע רצון. המראה מהירה חריגה אפשרית במטוסים בעלי מערכות דילול שמן. תפעול ממושך על הקרקע מזיק למרבית המנועים בעלי הספק גבוה.

כללי – ההתקנה של מערכת הכוח הפכה כנראה לבעיה המורכבת ביותר בתכנון מטוסים מודרניים גדולים. השימוש במנוע אמין אינו מספיק; מנוע זה חייב להיות מותקן כראוי, אחרת יתעוררו בעיות מערכת כוח חמורות מאוד.

הפיתוח המואץ בתחום התעופה הטיל מעמסה כבדה על מתכנן התקנת מערכת הכוח. הוא נדרש להתקין מערכת כוח השווה בהספקה לקטר גדול. הוא מחויב לתחום את הפריט לחלל מזערי, אולם נגיש לאחזקה ושירות. המיתקן חייב להיות קל במשקל ככל האפשר, אולם קשיח מספיק לעמוד בשימוש הנדרש ממטוסים. בצד דרישות אלו, הוא מוצא שההתקנה משפיעה על כל תכנון המטוס והתכונות האווירודינמיות שלו. כמו כן הוא מוצא שלצורך התקנה מספקת, כל אביזר במערכת הכוח (מתלה המנוע, מערכת הבקרה, מערכת הקירור, מערכת השמן, מערכת הדלק, מערכת היניקה, מערכת הפליטה וכו') דורשים חקירה הנדסית זהירה בכדי לוודא תפעול נאות של מערכת הכוח.

מתלי מנוע

כללי – תפקיד מתלה המנוע הוא לחבר את מערכת הכוח עם מבנה המטוס, ולשמור יחס גיאומטרי נכון בין השניים. כל הכוחות שמקורם במערכת הכוח זורמים דרך המתלה למבנה המטוס ולמטוס, שם הם מאוזנים על ידי כוחות אווירודינמיים, כוחות קרקע, או שילוב בין השניים. הכוחות הינם כוחות קווים, פיתוליים וכוחות כיפוף בטבעם. מתלה המנוע חייב להיות מתוכנן כך, שיספוג את הכוחות התוצאתיים הקיצוניים המצופים בכל כיוון, ללא תופעות תהודה רעידות אובייקטיביות. בנוסף, יש לאפשר גורמי בטיחות לאפשרות של כוחות בלתי צפויים או סטיות קלות באיכות החומרים ומיומנות העבודה.

כיוון שכל המבנים גמישים במידה מסוימת, מתלה המנוע חייב להיות קשיח מספיק בכדי לשמור על יחס גיאומטרי נכון בין מערכת הכוח ומבנה המטוס, תחת תנאי העומס שהוזכרו למעלה, בתחום המגבלות הנאותות. המתלה ותומכיו, אסור שיהיו קשיחים מדי, ויעבירו התעייפות בלתי רצויה, וכוחות יוצרי רעש, למטוס. כיוון שקשה לקבוע את דרגת הגמישות של מתלה המנוע, נהוג לבנות את מבנה מתלה המנוע קשיח דיו, ולספק גמישות על ידי התקנת תותבים גמישים בנקודות התמיכה.

תכנון – תכנון מתלה המנוע נקבע בעיקר על ידי היחס בין משרעת וכיוון הכוחות אשר הוא חייב להעביר, והיחס הגיאומטרי בין רפידות המנוע ונקודות התמיכה של המטוס. כמו כן יש להתחשב בחומרים ושיטות המבנה, משקל, נגישות ליחידות מערכת הכוח, משך, עלות ותכונות עמידות כנגד אש. אסור שהמנוע יהווה חלק ככלי אחר של המבנה. מתלים למנוע רדיאלי בנויים בדרך כלל מצנרת מרוחקת, היוצרים מבנה המשכי. האלמנטים הבודדים והחיבורים של מבנה כזה חייבים להיות ממוקמים, כאשר אפשרי, כך שהם יעבירו כוחות צירים בלבד.

מתלי מנוע למנועים טוריים ו"שטוחים" בנויים בדרך כלל משני התקנים נפרדים או יותר; הם יכולים להיות בנויים מאלמנטים צינוריים מרוחקים, קורות, מתכת, או שילוב שלהם. חומרי המבנה יכולים להיות פלדה, אלומיניום או עץ. הפלדה מועדפת עקב תכונות ההתנגדות להתעייפות ואש, וחוזקה הגבוהה ליחידת שטח.

תותבי מתלה המנוע – עד לפני שנים ספורות (כאמור, נכתב לפני כששים שנה), המנועים היו מוברים ישירות למתלה המנוע, והמתלה לשירות לנקודות התמיכה. היום משתמשים לעתים בתותבים בתכנון מיוחד בנקודות התמיכה של המנוע או של המתלה, או שניהם, בכדי להפחית את כמות רעידות ההספק, המועברות למתלה והמטוס. דבר זה מקטין את ההתעייפות של המתלה ומבנה התמיכה שלו, וכן מקטין את הרעש הלא נעים לנוסעים ולצוות. יש ליישם בזהירות את בחירת הסוג והמיקום, למניעת סטייה עודפת או קשיחות מיותרת בכל כיוון, וכן להבטיח שלא תהיה תגובת תהודה לכוחות היוצרים רעידות.

מערכת הבקרה

כללי – בקורות מערכת הכוח הם חיבורים, או מנגנונים, שבאמצעותם מערכת הכוח ומכלוליה נשלטים. בקרה זו מתבצעת בדרך כלל מתא הטייס, עם הכפלה או שילוש לשימוש מספר חברי הצוות השונים. בכל המקרים הבקורות מורכבות משלושת האלמנטים הבאים:

1. ידית, מנוף, מוט, כבל או מפסק, המופעל על ידי הטייס, טייס המשנה או מהנדס הטייס.
2. אמצעי חיבור מתאימים, כגון מוטות או כבלים, כבלים גמישים במוליך, קווים הידראוליים או פניאומאטיים, או כבלי חשמל. לאלה ניתן להוסיף ארכובות, מנופים, משאבות הידראוליות, משדרים ומנועים, שסתומים, מגברים, ממסרים וכו'.

3. חלק מפעיל או מנגנון אשר מפעיל את היחידה הנדרשת לבקרה; אלמנט זה יכול להיות קצה מוט, קצה כבל, מנוף, תמסורת, משאבה הידראולית או מנוע, ממסר חשמלי, או מנוע חשמלי.

מבחר האמצעים לבקרה תלוי בחשיבות הבקרה לפעולה מתמשכת של המנוע, באם נדרש מיצוב פוזיטיבי, המרחק לחלק הנדרש לשליטה, גישה לחלקי הבקרה, הכוח הנדרש והעדפות המתכנן. מוטות או צנרת וכבלים מועדפים בדרך כלל לשימויות קריטיות כגון מצערת, תערובת ובקרת מדחף. יחידות כאלו תורמות למיצוב פוזיטיבי עם סיכויים קטנים לכישלון. מהם - מוטות או צנרת מועדפים; הם יכולים להעביר דחיפה, משיכה ופיתול, למרות שבקרת כבלים מציעה נוחיות לבקרה למרחק גדול או במקום שנדרשות להגיע קבוצות רבות לחלק הנדרש לבקרה.

לעתים משתמשים בבקרות של כבלים גמישים בתוך מוליכים הן לבקרות קריטיות והן לפחות קריטיות, במיוחד בהתקנות קטנות. היתרון בסוג זה של בקרה הוא קלות הרכבתה, כיוון שכיפופים מתונים יחסית ניתנים לביצוע ללא שימוש בארכובות. המגבלות של בקרות אלו הינן הקושי לשמור על קיבוע עקב הגמישות שלהן, אלא אם הבקרה משלבת אמצעי נעילה פוזיטיביים, העומסים המוגבלים והחיכוך הפנימי, שהופך לחריג במקום שהקווים חייבים להיות ארוכים, או במקום שנדרשים כיפופים פחות מתונים.

לבקרות פניאומאטיות והידראוליות יש שימוש מוגבל ביישומים של מערכת הכוח, בעוד שבקרות חשמליות, למרות שלא היה בהם שימוש נפוץ בעבר, השימוש בהם מתרחב. קווים הידראוליים רגישים לאוויר לכוד, בעוד שקווים פניאומאטיים ומעגלים חשמליים תלויים במקורות כוח. במקומות בהם נדרש מצב בקרה אחד או שניים, משתמשים לעתים בבקרות חשמליות מסוג סליל. דוגמה ליישום כזה הינו שינוי מהירות מדחס גידוש ממצב נמוך לגבוה. למשדרים או למנועים יתרון, כיון שתנועת המשדר משוכפלת בדיוק על ידי המנוע. יחידות אלו דורשות מקור זרם חילופין.

מערכת קירור

כללי – למרות שמערכת הקירור נדונה בפרק קודם ביתר פירוט, נוסיף מספר מלים. במהלך השנים האחרונות, מנועים מקוררי אוויר החליפו את המנועים מקוררי נוזלים לרמה כזו שנשארו רק מספר מועט של מנועים מקוררי נוזלים במטוסים אזרחיים. דיון זה, לפיכך, יגע במנוע מקורר אוויר.

לאחר שמנוע מסוים נבחר, ומיקומו במטוס הוחלט, יש לשקול את התכנון של מערכת הקירור שלו. דבר זה מורכב מקירור האוויר וקירור השמן.

מערכת קירור האוויר מורכבת מאזור כניסה ותא לחץ, או כונס אוויר, ולוחות הטיה לכיוון האוויר לצילינדרים וצלעות ראש הצילינדר, תא התפשטות ושטח יציאה. מספיק אוויר צריך להיות מכוון גם למגע עם משטחים אחרים של המנוע, כולל חטיבת האביזרים, כך שגם הם יתקררו בצורה נאותה.

מערכת קירור השמן מורכבת מצנרת שמן ומחברים, מקרן שמן ושסתום עוקף, מיכל, שטח כניסה או כונס אוויר, מוביל אוויר בכניסה וביציאה ויציאת אוויר.

פרט לתפקידים העיקרי להקטנת גרר מערכת הכוח, חיפוי המנוע מספקים גם אזור לחץ חיובי ומופחת, שבו ממוקמות כניסות ויציאות האוויר. במספר מקרים, משתמשים באמצעי עזר, כגון שרוולי מדחף או מאוורר, להגברת זרימת אוויר הקירור דרך המנוע ומערכת קירור השמן. לעיתים קרובות משתמשים בפתח כניסה יחיד לאוויר קירור המנוע והשמן. מדפי הקירור משמשים גם הם להגברת הזרימה במהלך פעולה על הקרקע או בטיפוס.

לכל מנוע יש מגבלות (טמפרטורה מירבית, ראש צילינדר, קנה וטמפרטורת שמן) שאסור לחרוג מהם בשום מצב טיסה או תפעול קרקעי. כמו כן, עודף אוויר קירור גורם לגרר חסר תועלת. המתכנן, לפיכך, מנסה לתכנן את מערכת הקירור כך שטמפרטורות הפעולה תהינה גבוהות ככל האפשר, מבלי לחרוג מהערכים הייחודיים. תכנון מערכת הקירור נקבע על ידי ניסיון עבר, חישובים, ובמרבית המקרים משתנה עם המידע הנאסף מניסויי מנהרת רוח.

אזור כניסת האוויר – הפתח ממוקם בדרך כלל בחיפוי הקדמי ישירות מתחת למדחף, למרות שכל מיקום הנתון ללחץ אוויר מגח יכול להתאים. גודלו תלוי במהירות המטוס, ההתנגדות הכללית של זרימת האוויר במערכת הקירור, וכמות האוויר הדרושה לקירור המנוע. משתנים אלו חייבים להבחן לכל התנאים, במצבי טיסה ועל הקרקע, היוצרים טמפרטורה גבוהה. תנאים אלו הם בדרך כלל הסעה, טיפוס במנוע מלא, וטיסה ישירה ואופקית במהירות גדולה. ניתן לפתוח את מדפי הקירור לתפעול על הקרקע ובנסיקה; אולם המערכת צריכה להיות מתוכננת כך שהיא תקורר ברמה נאותה, בטיסה ישירה, גם במדפים סגורים. צורת פתח הכניסה תלויה בשטח הזמין לפתח, החתך צריך להיות מתוכנן בקפידה בכדי להימנע ממערבולות מיותרות, במיוחד במטוסים בעלי מהירות גבוהה.

תיבת הלחץ – חלל זה תחום בדרך כלל על ידי הצילינדרים ולוחות ההטיה שלהם, מקטע של בית גל הארכובה, חיפוי ואזור הכניסה. הוא חייב להיות אטום, למעט הפתחים המיועדים, ובעל גודל מתאים לשינוי

לחץ מהירות האוויר בכניסתו, עד לכמעט לחץ סטטי טהור. אם זה מושג, האוויר בתיבת הלחץ יהיה בעל מהירות נמוכה והמערבולת והלחץ בסמוך לכל צילינדר יהיו כמעט שווים, דבר המבטיח זרימה שווה של אוויר קירור לכל הצילינדרים.

לוחות הטיה וצלעות קירור – לוחות ההטיה מסופקים בדרך כלל על ידי היצרן, ובכל המקרים מתוכננים להטיית עד כמה שיותר אוויר הנכנס מתיבת הלחץ למגע עם ראש הצילינדר, קנה וצלעות הקירור. (היצרן יכול להיות לתועלת רבה למתכנן המטוס על ידי אספקת מידע בקשר לנפילת הלחץ על פני הצילינדרים ולוחות ההטיה לזרימות אוויר שונות – בדרך כלל מבוסס כגורם מוליכות – בתוספת משקל האוויר הנדרש לקירור המנוע תחת מצבי הספק שונים). נדרש גם שמספיק אוויר יבוא במגע עם המצתים, כך שהם יקוררו בהתאם. לעתים נדרשים הודפי אוויר מיוחדים, באם לא ניתן לספק מספיק אוויר קירור בלעדיהם.

תא התפשטות – תא זה אוסף את האוויר החם, ומקטין שוב את מהירותו, הנוצרת על ידי חליפה על פני הצילינדרים, לכמעט אפס. כיוון שמהירות האוויר קרובה לאפס, והאוויר ספג את החום, מכשולים קטנים בתא זה הינם שוליים כל עוד מסופק מספיק נפח. השטח של תא זה חייב להיות גדול יותר מאשר תא הלחץ, כיוון שהאוויר התחמם והתפשט.

אזור היציאה – הגודל של אזור היציאה יכול להיות קבוע, כמו במנועים קטנים, או נשלט באמצעות דלתות מחליקות או מדפים. המדפים נפתחים החוצה, ויוצרים שטח לחץ מופחת אשר מגביר את הזרימה. אזור יציאת האוויר, בכל המקרים, חייב להיות מתוכנן בקפדנות על מנת לאפשר שטח מרווח ואובדן נמוך של זרימת אוויר על ידי התנגדות או מערבולת במצב פתוח וסגור. בנוסף, המדפים חייבים להיות מתוכננים כך שהתנגדות לאוויר החיצוני תהיה נמוכה ככל האפשר.

אזור כניסה למקרן השמן והמוביל – למרות שמסת האוויר הדרושה לקירור השמן נמוכה בהרבה מזו הדרושה לצילינדרים, נדרשת זהירות גדולה בתכנונו. אזור הכניסה חייב להיות נכון אולם צורת הפתח אינה חשובה, עקב מהירות האוויר הנמוכה. במקרה בו משתמשים באזורי כניסה או כונסים נפרדים, יש לשים לב לצורת החתך כמו לשטחו, כך שתהיה זרימת אוויר חלקה. התעלה למקרן השמן חייבת להיות ישרה ככל האפשר, ללא כיפופים, ישירות בחזית מקרן השמן. כאשר לא ניתן להימנע מכיפופים, ניתן למנוע את ריבוד האוויר על ידי התקנת שבשבות הטיה בצורה כזו, שמשגים לחץ מהירות ולחץ סטטי אחיד על פני המקרן.

העברת חום לשמן – למרות שניתן להשיג את נתוני העברת החום לשמן מהיצרן, הדוגמה והדין הבאים לגבי מנוע רדיאלי היפותטי מקורר אוויר יתארו את כמות החום המעורבת, ביחד עם מספר בעיות בהם נתקלים. נניח את נתוני המנוע הבאים:

הספק המראה ----- BHP 1,700
הספק מתמשך מירבי ----- BHP 1,500
העברת חום לשמן ב – BHP 1,500 ---- BTU 3,000

לפיכך: BTU 3,000 לדקה שווים ל – 70.6 כוח סוס. אם הספק החיכוך הינו 10%
בערך מה – BHP, או 150 כוח סוס, אזי העברת החום לשמן =
 $\frac{70.6}{150} \times 100\% = 4.7\%$ מהספק החיכוך, אשר שווים ל: $\frac{70.6}{150} \times 100\% = 47\%$

מהספק המנוע ב – BHP.

מספרים אלו מראים שהעברת החום לשמן הינה אחוז קטן מהספק המנוע, וזה מנוע בר מזל. כמו כן מראים מספרים אלו שרק כ – 50% בקירוב מהחום הכולל המושקע בשמן, עקב הספק החיכוך, יוצא מהמנוע בפתח יציאת השמן. שאר חמישים האחוז של החום, המועברים לשמן, מתפזרים דרך בית גל הארכובה ודפנות הצילינדר. מנקודת מבט של הקירור, זהו מצב בר מזל, אולם מנקודת המבט של בקרת העברת החום, מוצגת בעיה קשה מאד. היא מציגה גורם התקנה שעליו למתכנן אין שליטה.

על מנת לנתח כיאות את דרישות קירור השמן, יצרן המטוס חייב להשיג נתוני העברת חום ספציפיים מיצרן המנוע. כיוון שלמשתנה אוויר הקירור ולגורם ההתקנה יש השפעה על חמישים אחוז בקירוב של החום הכולל המועבר לשמן, יצרן המנוע, כאשר מתבקש לציין את נתון העברת החום הכולל לשמן, באופן טבעי ישתמש במספר בעל שוליים נוחים, באם אפשר. בכדי לסבך את הבעיה של נתוני העברת החום המשתחרר עוד יותר, יצרן המנוע ימצא שזרימת השמן הינה משתנה כיוון שהבקרה עליו נשלטת על ידי אפיציות מורכבות של התאמות המיסבים, מעברי זרימה ומצבים אחרים.

מחקרים מעמיקים של בעיות בקרה על העברת חום וזרימת שמן, בוצעו על ידי יצרן מנוע, על סדרה גדולה של מנועים. הוא הגיע למסקנות הבאות:

1. המשתנים המוצגים בתכנון המנוע הם כאלו שניתן לצפות לסטייה של לא פחות משלושים אחוז מהמירב, במצבי תפוקת ההספק, סל"ד, טמפרטורת כניסת השמן, לחץ שמן וטמפרטורת האוויר במאייד.
2. המשתנים המוצגים בתכנון המנוע הם כאלו, שניתן לצפות לסטייה של לא פחות משישים אחוז מהמירב בהעברת חום לשמן, במהלך מצבי בדיקה מבוקרים לתפוקת ההספק, סל"ד, טמפרטורת כניסת השמן, לחץ שמן וטמפרטורת אוויר המאייד.
3. השינויים בהעברת חום, אשר ניתן לצפות להם בין מנועים, ניתנים להערכה חלקית רק לאחר ניסויים ובחינות יצור שהושלמו על דגם מנוע מסוים. השינוי, או הערך הממוצע, יכול להשתנות עקב שינויים במבנה המנוע, שנדרשים כתוצאה מניסיון השירות של המנוע.
4. כל ערובה נדרשת להעברת חום לשמן וזרימת שמן נדרשת במפרט מנוע, לפני צבירת ניסיון יצור מעשי, חייבת להתבסס בבירור על הערכות ניסיון העבר בלבד; בכדי למנוע עיכובי יצור רציניים והוצאות, יש לספק אפיציות מספקות שיאפשרו שינויים בבקרה של יצרן המנוע מעבר לסביר והמעשי.

בכדי לשמור בקרה סבירה של ייצור מנועים, יצרן המנוע מעמיד מגבלות יצור לגבי העברת חום וזרימת שמן, שהם בהתאם למגבלות המרביות הניתנות במפרט המנוע. לפיכך, כל מנוע נבדק תחת תנאי בקרה סבירים בכדי לוודא שהוא אינו חורג ממגבלות מרביות אלו. מנוע מעבר למגבלות מוצא מיידית מסדרת הבדיקה, ומפורק לבדיקה בכדי לקבוע את הסיבה לחריגה כל שהיא בזרימה או העברת החום. אין לשחרר מנוע שחורג ממגבלות היצור למשלוח.

לפיכך, מנועים המתקבלים במפעל יצרן המטוסים יכולים להשתנות במגבלות המוזכרות, אפילו שהם בתוך המגבלות המרביות שנתנו במפרט המנוע. לא יהיה זה חמור למדי, אם מתכנן ההתקנה יכול להיות בטוח שהוא בדק מנוע במצבים מכסימליים של זרימה והעברת חום. לא תמיד זה אפשרי, מהסיבות הבאות: בדיקות המתכנן מתבצעות בדרך כלל על דגם ניסיוני; לא התקבל ניסיון יצור על הדגם הנבחן; טיסת המבחן למנוע אינה יכולה להבנות כך שהוא יפתח את מירב המצבים של זרימה והעברת חום. אפשר לספק נתוני זרימה והעברת חום על המנוע הנבדק. היעילות של מערכת קירור המטוס, כפי שמורכבת, יכולה להבחן על בסיס תוצאות הקירור המושגות על מנוע זה. על ידי שימוש בנתוני הביצוע של מקרן השמן, ניתן לקבוע באם מערכת הקירור מתאימה או לא, ולטפל במנוע המיוצר במצבי זרימה והעברת חום מרביים. ניסיון זה לא ממומש בצורה נרחבת.

קירור שמן הציג בעבר בעיות התקנה, לא רק מנקודת מבט של מגבלות נפח והתנגדות, אלא גם מנקודת מבט של בקרת טמפרטורה. מקרני השמן היו נתונים למצבים של קפיאה רצינית וויסות עלוב. למזלנו, יצרני מקרני השמן הצילו את המצב על ידי שיפור תכנון המקרן ושסתום הבקרה, שהתגברו על מצבים בלתי משביעי רצון אלו.

תפעול מנוע בגבהים הציג לאחרונה קושי במערכת השמן שיש לתקנו. קושי זה מופיע בצורה של אובדן לחץ שמן, ומוצג על ידי ריטוטי מחוון לחץ השמן, הנובעים מקצף במיכל השמן. הדבר נגרם על ידי אוויר שחדר לשמן המוזן למנוע. מצבים אלו הפכו למעשיים יותר בהספקי מנוע וזרימת שמן גבוהים. שמן העובר דרך המנוע מתערבב לעתים עם האוויר, ויוצר כמויות גדולות של קצף. השמן, הקצף והאוויר יוצאים מהמנוע ועוברים למקרן השמן והמיכל. דבר זה נעשה כיוון שלמערכת משאבות השטיפה יש קיבולת גדולה יותר מאשר למערכת אספקת לחץ השמן, וגם כיוון שהשמן במצב חצי נוזלי. יש להפוך קצף זה לשמן נוזל על ידי התזת השמן על לוחות מתאימים במיכל. הקצף חייב להיפרד מהשמן הנוזלי עד אשר התהליך מושלם.

מערכת הדלק

דרישת לחץ דלק – הופעת אידוי אוטומטי במנועים בעלי ביצועים גבוהים, הציגה דרישה לבקרה צמודה של לחץ דלק בכניסה למאייד, בתחום מגבלות מוגדרות. דרישה זו לבקרה צמודה של הלחץ, למרות שמעיקה מעט, מוחמרת בהמשך כיוון שנדרשות זרימות דלק גבוהות למנועים המייצרים הספק גבוה, בגבהים שלא היו ניתנים להשגה קודם לכן. מצב זה של מערכת הדלק הוביל להדגשת הצורך בחיסול אדי דלק הנוצרים בדלק, כיוון שמערכת הנתונה להיווצרות אדים תגרום לשיבוש כל שיטה של לחץ דלק ובקרת אספקה. למרות שטיסה בגבהים אלו בדרך כלל מיושמת במטוסי קרב, דיון קצר בדרכים להתגבר על בעיה זו תוצג בגלל הגבהים שבשימוש מטוסים אזרחיים בעלי דחוס תא.

מפריד אדים – מפריד האדים מורכב ממיכל בעל קיבולת של בערך קוורט אחד, המשלב שסתום אוורור מופעל מצוף בחלקו העליון, ומורכב בקו הדלק בין משאבת הדלק והמאייד. האוורור מובל לשסתום הקלה המתוכנן ללחץ של 1 או 2 PSI מתחת ללחץ הדלק של המנוע. קביעה זו נוצרה בכדי להימנע מריטוטים קיצוניים בלחץ הדלק, כאשר האוורור פתוח. שסתום ההקלה יגרום לריטוטי לחץ דלק של 1 או 2 PSI בלבד. לצורך קריאת

שיעור הזרימה המדויק, הוא חייב להיות מותקן לפני מד הזרימה. בהתבסס על ניסיון נרחב בבדיקת קיבוע מאייד בטיסה, נמצא שיש צורך חיוני להסיר את האדים לפני קריאת שיעור הזרימה.

משאבת הגבר – משאבת הגבר צנטריפוגלית, מופעלת חשמלית ומותקנת במיכל, משפרת בצורה רבה את בקרת לחץ הדלק במערכות הנתונות למצבי אדים. משאבה מדגם זה חייבת להיות מותקנת ישירות על עוקת מיכל הדלק, כיוון שהמאיץ פועל כמפריד אדים, ובוועות האדים העולות ממרכז המאיץ חייבות להתאוויר ישירות למעלה, דרך אספקת הדלק במיכל. בנוסף, מסיבה זו פתח הכניסה למאיץ חייב לפנות כלפי מעלה לתוך המיכל. המשאבה אינה משמשת כמפריד אדים בלבד, אלא גם משרתת כמשאבת חרום ומקור לחץ דלק בהתנעה. משאבות חשמליות בעלות שבשבות משמשות לעתים גם כמשאבות הגבר. משאבה מדגם זה אינה פועלת כמפריד אדים כיוון שהדלק מוכל במהלך פעולת השאיבה.

דיחוס מיכל – במטוסים צבאיים, המתוכננים לשינויים מהירים בשיעורי נסיקה, משתמשים בדחוס מערכת מיכלי הדלק לאספקת לחץ של גובה נמוך במיכל, בעוד המטוס טס בגבהים. מערכת זו מונעת רתיחת הדלק במיכלים בגבהים; הלחץ מושג על ידי איטום מערכת המיכלים, ושימוש בלחץ סעפת המנוע כאמצעי הגבר. יחידת ויסות משולבת במערכת הצינורות, עם שסתום הקלה נדרש. הוסת מווסת מראש לאחזקת לחץ דיפרנציאלי מעל ללחץ האטמוספרי. שסתום הקלה מוודא שלא ייווצר לחץ עודף במיכל במקרה של כשל שסתום הדיחוס. כמו כן מותקן שסתום על/תת לחץ שימנע התמוטטות מיכלים אפשרית במהלך הנמכה חריפה. עוד מותקן עוקף ידני למניעת הוויסות, אם נדרש, על ידי פתיחת אוורור עזר וסגירת ערוץ לחץ הסעפת ביחידת הבקרה הראשית.

מערכת היניקה

כללי – מערכת היניקה חייבת לספק אוויר, באיכות וכמות מתאימים, למערכת תאי השריפה של המנוע. המצב של אוויר זה, בכניסה למאייד, חשוב מאד. לפעולה תקינה, חיוני שזרימת האוויר תהיה חלקה ואחידה, נקייה ובלתי מוגבלת, בטווח הנרחב של הספק המנוע המצופה.

כשמתחילים בנקודה בה האוויר האטמוספרי נאסף, חייבים להינתן שיקולים שווים למובילי האוויר, מעברים זוויתיים, דלתות חימום מוקדם, מקרנים או פריטים אחרים אשר חוצצים בין האוויר החופשי והמאייד.

על מנת למדוד את הכמות המתאימה של הדלק, המאייד חייב למדוד בצורה מדויקת ועקבית בטווח נרחב של זרימת האוויר. ציוד מעבדה רגיל למדידת זרימת אוויר הראה שיש לנקוט בזהירות רבה עם מובילי האוויר לנחיר מדידת האוויר. זהירות מקדימה זו מוודאת את מצב אוויר הנכון בנחיר, כלומר, אוויר שיש לו מהירות ומרקם שווים בנחיר הכניסה. הבנה זו במהלך שלב התכנון, והשימוש בשיטות הידע הטובות ביותר של ההתקנה, ימנעו ניסיון בלתי מוצלח של תערובת עשירה או ענייה מדי, כאשר מתחילים בטיסת המבחן. כל עקרון הפעולה של המאייד תלוי במדידה מדויקת של מסת האוויר הזורמת בכניסה למאייד.

לקריאה מדויקת על ידי מערכת זרימת האוויר, חיוני שהאוויר יפגע בכל מכשירי המדידה בזוויות נכונות (בצורה נורמאלית בפני הכניסה של המאייד) ושכל המכשירים ימדדו בצורה זהה את מדגמי האוויר, כלומר, אלה שאין להם ריבוד של טמפרטורה או לחץ. אוויר הנכנס בזווית לפני המאייד שואף ליצר מדידה לא נכונה (לא רק על ידי הוונטורי, אלא גם על ידי יחידת בקרת התערובת האוטומטית) עם תוצאה לא נכונה של מדידת הדלק.

הקיצוב של המאייד מתבצע על ידי מדידת המהירות בזרם אוויר של אזור ידוע, עם תיקון לצפיפות האוויר במקור הזרימה. הוונטורי קובע את אזור הזרימה; המהירות נקבעת על ידי הפרשי הלחץ בין לחץ המגע או הטוטאלי, וירידת המהירות. אם אחד האלמנטים, או שניהם, של לחץ חיובי או לחץ שלילי, מאותר למעט בנקודה של מהירות בריבוע ממוצעת, הפרשי הקיצוב ישתנו מזה המיוצר על ידי אותו משקל אוויר הזורם בזרימה אחידה.

דרישות עיקריות – הדרישות העיקריות למערכת יניקה משביעת רצון הינן כדלקמן:

- א. מובילי האוויר חייבים להיות בעלי שטח חתך מתאים לאספקת כמות האוויר הדרושה למנוע בלחץ המרבי.
- ב. פתח היניקה חייב להיות ממוקם כך שיקבל אוויר נקי, לא מדולל, נקי מאבק, גזי פליטה ותרסיס.
- ג. אספקה מתאימה של אוויר חם חייבת להיות זמינה, כאשר נדרשת, להמסת קרח או למניעת היווצרותו.
- ד. שסתומי האוויר חייבים לאפשר בקרה אחידה ותערובת של אוויר חם או קר.
- ה. זרימה חיובית של אוויר דרך מערכת חימום הקדם כאשר המנוע פועל במזג אוויר קר למדי.
- ו. מערכת יניקה בעלת עוצמה מספקת, וקשיחות לעמידה באש חוזרת, ובלאי בבקרת השסתום.
- ז. טמפרטורה ולחץ אחידים, ללא ריבוד, בפני המאייד.

פרטי מובילי אוויר מאיד

כניסה – להגנה על פנים המנוע מנזק, להבטחת פעולת מנוע תקינה, ולמניעת סתימה של הכונס, הכניסה חייבת להיות ממוקמת כך שתקבל אוויר נקי, ובלתי מדולל, הנקי מאבק, תרסיס, קרח וגזי פליטה. המיקומים הבאים אותרו כמוצלחים: על שפת ההתקפה של טבעת החיפוי (NACA); בתוך הטבעת הקדמית של החיפוי; כונס יניקה קצר הבולט מבית האביזרים; ובשפת ההתקפה של הכנף.

מיקומים על שפת ההתקפה של טבעת החיפוי משביעי רצון. כאן הכניסה ממוקמת קרוב למדחף. לפיכך, אין אפשרות לאבק, המועלה על ידי קצה המדחף, להיכנס לכונס. כמו כן, מיקום זה בשפת ההתקפה של החיפוי מספק מהירות אוויר גדולה יותר למוביל האוויר. דבר זה מאפשר הגדלה באוויר המגח בשיעור של בערך 5% בתפעול במהירות גדולה, ומעט יותר בנסיקה, כשמשמשים בשרוולים. מספר חוקרים מדווחים שמיקום זה התנסה במהירות גדולה, זרימה מערבולית וכמו כן פעימות לחץ במוביל האוויר, בגלל שלהבי המדחף חולפים בכניסה. לחץ שלילי מרבי הוקטן על ידי מיקום פני מוביל האוויר קרוב למצב נורמאלי, ביחס לציר זרימת האוויר. כמו כן, מצב זה מקטין את הנטייה של האוויר להצטבר בקצה הרחוק של הכניסה.

נעשה שימוש במיקומי כניסה בתוך הטבעת הקדמית של החיפוי, אולם אלה יכולים לאסוף אוויר מערבולי וחם מפני הצילינדרים הקדמיים במהלך מספר מצבי טיסה, במיוחד בזווית התקפה גדולות. אם משתמשים במיקום זה, יש להתחשב בהשפעה של להבות האש החוזרת, כמו גם בהשפעה המזיקה על הקירור, עקב מגבלות קירור יציאת האוויר הנגרמת על ידי מיקום מוביל האוויר.

כונסי יניקה קצרים, הבולטים מבית האביזרים, הועדפו בהרבה מקרים עקב פשטות ההרכבה. למצבים של הפרעות כנף או זנב יש השפעה ניכרת על מיקום בהיקף בית המנוע, אולם בכל המקרים מועדפת כניסה מעל לקו האמצע האופקי של בית המנוע. בסוג זה של כונס, יש להרים את השפה הפנימית של כניסת מוביל האוויר מעל למשטח החיפוי, בכדי להימנע משכבת הגבול. עם הגדלת זווית ההתקפה, הלחץ בכונס זה יורד, עקב מניעת זרימת האוויר על ידי החיפוי, והנטייה של זרימות מסוימות לגלוש על ראש החיפוי. מיקומים בשפת ההתקפה של הכנף מועדפים, במיוחד במנועים בעלי שתי דרגות ובעלי מדחס גידוש. מיקומי כניסה אלו חייבים לכלול את המאפיינים הבאים:

- א. גרר חיצוני נמוך.
- ב. ללא השפעות מפריעות על מאפייני ההזדקרות של הכנף.
- ג. לחץ דינאמי מלא על פני טווח נרחב של זוויות התקפה.
- ד. מספר מאך קריטי גבוה למטוסים בעלי מהירות גבוהה.

התוצאות הטובות ביותר של כניסות אוויר מלבניות, בשפת ההתקפה של הכנף, מושגות באופן כללי עם שפות במישור האנכי בקירוב של שפת ההתקפה של הכנף. למעט בכניסות קטנות, מצב זה מחייב הארכת השפות מעבר לקו מתאר הכנף. בכניסות קטנות, הגרר מוגדל על ידי הוספת עובי לשפה העליונה, ויש גם את הסכנה של הקדמת נקודת ההזדקרות המקומית.

המטרה של הכניסה למוביל האוויר הינה להפוך חלק גדול מהאנרגיה הקינטית של זרימת האוויר החופשי לאנרגית לחץ במוביל. דבר זה מושג על ידי הקטנת מהירות האוויר V_0 באוויר החופשי למהירות V_1 בתוך המוביל. ניתן להפוך אנרגיה זו בצורה חיצונית, כמו גם פנימית. דבר זה מומלץ, במרבית המקרים, כיוון שמתאפשרת הפחתה בהתפשטות הפנימית, ולפיכך תושג הפחתה באורך מקטע המפזר, ותתאפשר התקנה קומפקטית יותר. כמו כן, ההתפשטות החיצונית מסייעת לזרימה הפנימית על ידי ליבוי קווי הזרימה, כך שהם יעקבו אחרי הדפנות הסוסים בתוך הכניסה, ויגרמו לזרימה פחות מערבולית בתוך מוביל האוויר.

שטח הכניסה חייב להישמר קטן ככל האפשר, על מנת להשיג נצילות כוללת טובה יותר, וכמו כן למנוע בעיות של קרח ושלג. שטח כניסה גדול מדי יגרום לגלישה, וכתוצאה מכך לגרר גבוה. החישובים לשטח כניסה מזערי מבוססים על הנחות של שימוש מלא באוויר המגח בשני מצבים: המהירות המירבית בטיסה ישרה, בהספק מלא בגובה קריטי, ובמהירות מתאימה לשיעור הנסיקה הטוב ביותר. למטוסים מרובי מנועים (יותר ממנוע אחד), המהירות הטיסה המרבית חייבת להיות כזו שתושג עם מספר מזערי של מנועים, הדרושים לשמור טיסה ישרה. שיטה אחת להפיכת מהירות לחץ במוביל האוויר, הינה על ידי כניסת פיתו ללא התפשטות פנימית. במקרה זה, מהירות הכניסה הממוצעת שווה למהירות במוביל האוויר. ההפיכה של האנרגיה הקינטית מתרחשת בחוץ, בחזית הכניסה למוביל האוויר. דבר זה הינו אידיאלי מנקודת המבט של הגרר הפנימי, כיוון שהוא אינו סובל מאובדן התפשטות. מכל מקום, ההתבדרות המהירה של קווי הזרימה בחזית הכניסה דורשת חיפוי חיצוני עבה, אשר לא תמיד ניתן להשתמש בו. המקום הברור לסוג זה של כניסה הינו בשפת ההתקפה של הכנף, במקום שקו המתאר של הכנף מהווה חיפוי טבעי, ומספק שפת כניסה עגולה או קמורה הדרושה לזרימה חיצונית טובה.

המהירויות הקריטיות הגבוהות ביותר לכניסה מתרחשות בשיעורי מהירות כניסה גבוהים ובהתאמה לפעילות הלחץ השלילי המרבי. בשיעורי מהירות כניסה נמוכים, מתרחש אובדן אוויר מגח עקב קלקול הזרימה, ונוצרים

זרמי מערבולת בכניסה למוביל האוויר. דבר זה משבש את הזרימה הראשית, וגורם לאובדן של אוויר מגח. בשיעורי מהירות כניסה הגבוהים ביותר, ובזרימות גבוהות, אובדני המוביל הופכים גדולים יותר, נוטים להקטין את אחידות הזרימה, ומגדילים את אובדני הלחץ. הלחץ נקבע על ידי הקימור של השפה, עובייה וזווית ההתקפה שלה. ניתן להשיג לחץ שלילי מזערי בכונס בעל שפה דקה המווסתת במהלך הטיסה לפעולה בזווית ההתקפה האידיאלית. לחצי השיא מוקטנים על ידי הגדלת רדיוס העקמומיות באזור של הלחץ השלילי, ופילוג לחץ אחד מקושר לצורות שעוצבו כיאות עבור זווית התקפה שבה הם פועלות. לנצילות הטובה ביותר, על פני טווחים רחבים של מהירות וגובה, יידרש כונס אוויר מתכוונן.

הכונס המעשי הופך להיות פשרה לתפעול הממוצע הטוב ביותר על פני טווח הטיסה, בהתחשב במהירות ובגובה, עם דרישה ייחודית שהמהירות הקריטית על שפת הכונס חייבת לחרוג מזו של שאר המטוס. באשר לשטח כניסה קבוע, דבר זה דורש להפטר משפות דקות, עקב הרגישות שלהן לשינויים בזווית ההתקפה. יש צורך במספיק עובי בשפות להקטנת השינויים בפילוג הלחץ במהירות הכניסה.

מפזרים – מטרת המפזרים היא לאפשר התפשטות האוויר הנכנס למוביל האוויר. ההתפשטות חייבת להתבצע מייד לאחר שהאוויר נכנס למוביל האוויר, במטרה להבטיח מצב של מהירות נמוכה ולחץ גבוה בהקדם האפשרי. למפזר המתוכנן כיאות תהיה מהירות כללית פנימית נמוכה, V_1 ביחס למהירות הטיסה V_0 . יעילות המפזר יכולה להיות מוגדרת כשיעור ההפרש בין אנרגיית זרימת האוויר הפנימית ואובדן האנרגיה במוביל האוויר, לאנרגיית זרימת האוויר הפנימית. היא מושפעת מהשיקולים הבאים:

- הזווית הכללית של קונוס ההתפשטות היא באופן כללי היעילה ביותר ב- 7° אולם עד 15° האובדן עדיין נמוך. אובדנים גדולים מתרחשים עקב התפשטות מהירה.
 - מפזרים מלבניים בעלי שני צדדים מקבילים, ושני צדדים סוטים, הם בעלי יעילות מרבית כאשר 2θ שווה ל- 11° , כאשר 2θ הינו הזווית המוכללת בין שתי הדפנות הסוטות המנוגדות.
 - למקטע ריבועי, להשגת יעילות מרבית, 2θ חייב להיות שווה ל- 6° .
 - התפשטות תלת מימדית טובה יותר מאשר התפשטות דו מימדית.
 - פיזור מערבולי של זרימה, בכניסה למפזר, מקטין את היעילות לבערך 7% מזו המושגת כאשר מהירות הכניסה קבועה.
 - המפזר, כאשר ממוקם בקרבת כניסות מוביל האוויר, מגדיל את היעילות.
 - אורכו של מוביל האוויר מאחורי המפזר משפר בצורה ניכרת את היעילות, כיוון שהלחץ ממשיך לעלות לאורך המוביל, מעבר ליציאת המפזר, עד לפי שש בערך מהקוטר ביציאת המפזר.
 - היעילות קטנה עם הגדלה ביחס השטח A_2/A_1 , למעט בזוויות קטנות בהתאמה ליעילות המרבית (הערה: A_1 הינו שטח החתך ההתחלתי ו- A_2 הינו שטח החתך הסופי של המפזר).
- עקב הקומפקטיות והמחיר, שימוש במפזרים ארוכים, הדרושים ליעילות טובה, אינם אפשריים תמיד. ההצעות הבאות מאפשרות יעילות בשיעורים גבוהים יחסית של התפשטות:

- שימוש בדפנות מעוקמות, במקרה של מפזר קוני, מגדיל את היעילות בבערך 0.20.
- שבשבות מסתובבות, או מסיטי זרימה, מקטינים את המשרעת והחדות של העלייה בלחץ בקרבת הדפנות; מתגברים על האינרציה של הזרימה בשינויים פתאומיים של כיוון הדפנות; ומסיטים אוויר במהירות גבוהה לתוך אזור הגבול. בזוויות של 90° ו- 180° , מסיטי זרימה מייצרים הגדלת יעילות של בערך 0.40.
- שיטה אפקטיבית יותר של השגת יעילות, בשיעורים גדולים של התפשטות, מבוססת על בקרה של שכבת הגבול על ידי יניקה. נוצרים שיפור בשיפוע (gradient) הלחץ בחתך, ושכבת גבול חדשה עם אנרגיה גבוהה, אשר מסוגלים להתנגד טוב יותר להיפרדות. כולל ההספק הנדרש ליניקה, ניתן להשיג יעילות של 0.80 בזווית התפשטות של 50° . שיטה אחרת של אספקת אנרגיה חדשה, לאזורים בקרבת הדפנות, הינה להכניס אוויר במהירות גבוהה ממקור חיצוני.
- אם לזרימה בכניסה למפזר יש רכיב סיבובי, הדבר ייצור שיפוע לחץ רדיאלי, ויסייע לאוויר לעקוב אחרי השינוי בדפנות. אם הסיבוב הינו מסוג מערבולי, כגון מאחורי מאוורר במוביל האוויר, ההתפשטות היא היעילה ביותר במפזר בעל מקטע טבעתי.

כניסה למאייד – חלוקה אחידה של לחץ אוויר וטמפרטורה חיוניים מאד בכניסה למאייד. על מנת להשיג זאת, אורכו של מוביל האוויר הישר, בין המאייד וסיבוב המרפק, חייב להיות פי ארבע מעומקו, אם אפשרי. לאורך זה יתכנו חתכים משתנים על מנת לשנות מבחינת יחס הסיבוב למידות כניסת המאייד.

במקום כל שהוא במערכת היניקה, לפני המאייד, נדרש חיבור גמיש במוביל האוויר ליצירת תנועה יחסית של המאייד ביחס לחפוי או לחלק ממוביל האוויר המחובר למבנה הקשיח. אפילו ומוביל האוויר קצר, ואינו מחובר אלא למאייד, עדיין נדרש חיבור גמיש להקלת המשקל מאוגן המאייד, ורעידות אשר מועברות על ידי הכונס עם

נזק אפשרי למאייד. המחבר חייב להיות קרוב ככל האפשר למאייד בכדי לשמור על משקל החלקים נמוך ככל האפשר.

התקרחות – סוגי הקרח שעלולים להיווצר במערכת היניקה הם:

קרח מגע – נוצר ממים הקיימים באטמוספירה כמו שלג, גשם מעורב בשלג, או מים הפוגעים בפני השטח הנמצאים בטמפרטורה שמתחת ל 32°F . קרח זה מתאסף קרוב לפני השטח ומשנה את כיוון זרימת האוויר כך שחלקיקי המים או הקרח, בצפיפות הגדולה בהרבה מהאוויר, נישאים למשטח זה. ההשפעה המסוכנת ביותר של קרח מגע הינה עקב אפשרות להתאספות קרח על יחידות המידוד של המאייד, וההשפעה על יחס הדלק-אוויר. נקודות קריטיות אחרות הם שסתום חימום קדם ודפנות כונס האוויר בקרבתו, תקרת מרפק הכונס והמסננים.

קרח מצערת – סוג זה נוצר על, או בקרבת, המצערת כשהיא סגורה חלקית (עד ל 30°F) עקב תופעת הקירור הנובעת מהגדלת האנרגיה הקינטית של האוויר באזור זרימה מצומצמת. הקרח נאסף על חלקי מתכת, ועשוי בעיקרו מחלקיקים אשר קופאים מחוץ לשכבת הגבול ונישאים למשטחי המתכת, כגון פרפר המשנק, על ידי התאוצה הראשונית שלהם. בגלל קיבולת החום הנמוכה של נפילת טמפרטורת המצערת בחלקי מתכת קרה, הטמפרטורה המירבית שבה נוצר קרח המצערת הוא 37°F בלבד. הקרח נוצר בחלק המרכזי של זרימת האוויר, בטמפרטורת אוויר של בערך 37°F , אולם טמפרטורות המתכת הינן גבוהות מדי בכדי שהקרח יתאסף על פני משטח מתכתי.

קרח דלק – נוצר כתוצאה מתופעת הקירור של אדי הדלק, לאחר שהדלק מתווסף לזרימת האוויר. דבר זה יתרחש קרוב לוודאי בצורה תדירה יותר בטיסה, היות והקרח יכול להיווצר בטמפרטורות אוויר מאייד הרבה מעל 32°F . מרבית החום הנדרש לאידוי הדלק מסופק מהאוויר בעת ירידת הטמפרטורה שלו. קרח הנוצר מאידוי דלק, יכול להשפיע על זרימת האוויר על ידי חסימת צוואר המאייד, על יחס דלק-אוויר על ידי השפעה על זרימת הדלק, ולהשפיע על חלוקת התערובת, או כמות התערובת, לצילינדרים מסוימים, על ידי שיבוש חלוקת זרימת הדלק בנחיר הדלק, או זרימת האוויר בצוואר המאייד.

חקירות לגבי קרח דלק הגיעו למסקנות הבאות, במקרים בהם דלק נפרק במאייד או מייד מאחורי המאייד: "קרח הנוצר בתוך מערכת היניקה לא ישמור על אחיזתו לדפנות המתכתיות אלא אם טמפרטורת המתכת תהיה $+32^{\circ}\text{F}$ או נמוכה יותר. טמפרטורות של מתכת מערכת היניקה החשובה לתערובת תהיה כמו טמפרטורת התערובת, כל עוד אין שכבת קרח שתבודד את המתכת מהתערובת המצוננת הנכנסת. חום מהאוויר הסביבתי, העוטף את המערכת, וממקורות אחרים, נוטה להעלות את טמפרטורת המתכת לאחר שהקרח נוצר. בטמפרטורות סביבתיות הגבוהות באופן ממש מעל הקיפאון, הקרח לא ייצמד למתכת, אולם הוא ניתמך על ידי צורת המעבר או על ידי תפיחות שבמעבר."

המשתנים המשפיעים על קרח במאייד הם: טמפרטורת האוויר, תכולת המים באוויר, גודל הריסיסים, יחס התערובת, זרימת האוויר, נפילת הלחץ במאייד, טמפרטורת המתכת, מידת פתיחת המצערת והגובה.

העדויות למצבי התקרחות במערכת היניקה, לפי סדר הסבירות הן כדלקמן:

- א. אובדן הספק, עקב צמצום של מעברי אוויר או תערובת, וכתוצאה ירידה בלחץ ההגבר.
- ב. שינויים ביחס התערובת; התערובת הופכת לעשירה או עניה יותר. דבר זה יכול להפוך לרציני לפני שיהיה שינוי ניכר בלחץ ההגבר.
- ג. היתקעות המצערת.
- ד. מכשירי חיווי התקרחות.
- ה. התקרחות על משטחי הכנפיים או משטחים אחרים.

משתמשים במספר שיטות למניעת היווצרות קרח או להסרתו לאחר שנוצר. הן מתוארות בסעיפים הבאים:

- ניתן לספק חימום מפני מאסף צינור הפליטה.
 - ריסוס אלוהול או חומר מונע התקרחות אחר לתוך האוויר במערכת היניקה, לפני כניסתו למאייד.
 - הפעלת המנוע בהספק גבוה ומצערת פתוחה.
 - להפסיק הצתה ולגרום לאש חוזרת. דבר זה יחשב כפעולת חרום על מנת להימנע מנזק לשסתום החימום המוקדם.
 - שימוש ברשת, שהקרח יצטבר עליה בפתח מוביל האוויר, וכניסת חרום שתעקוף רשת זו.
 - ניתן להשתמש במגן זרימה בקדמת כונס האוויר למאייד. זה נמצא יעיל במניעת כניסת קרח וגשם לכונס, אולם לא ברורה השפעתו על אוויר המגח.
 - ניתן למקם שומר קרח לפני הכניסה לכונס להטיה ותפיסת הקרח.
- שיעור ירידת זרימת האוויר, במרבית מצבי ההתקרחות החמורים, עדיין מספק מרווח זמן לטייס להפעיל חימום מאייד. רשת מאייד מושפעת פחות מפגיעת הקרח, ומציעה הגנה מסוימת לצנרת והוונטורי.

ניתן להוסיף תא הסתעפות/כינוס למרפק הכונס בכדי לשפר את תכונות איסוף הגשם, ולהפחית את סכנת כניסת הקרח לתוך המאייד. בזרימת אוויר בשיט, התא ישפר את חלוקת המהירות והטמפרטורה בכונס. אסור שיהיו מכשולים בכונסים לפני המרפק (כגון תומכים, להבי הכוונה או רשתות) אלא אם הם ממוקמים כך שהקרח אינו יכול לפגוע בהם. דלתות אוויר חם, או שסתום פוסק אוויר קר, חייבים להיות כאלה שהם ישמרו בטמפרטורה הגבוהה האפשרית.

דפנות הכונס, רצפתו ותקרתו לפני המרפק, חייבים לנטות מזרימת האוויר ככל שניתן על ידי תכנון אווירודינמי נאות. בשום מקרה אסור שהם יתכנסו לתוך זרימת האוויר, במיוחד במקום שפועל שסתום החימום המוקדם.

חימום אוויר מאייד – אוויר חם נדרש לפעולה נאותה של מספר מנועים המצוידים במאייד, ולכול המנועים למניעת הקרח. מקור האוויר החם הנוח ביותר הוא מסביב למאסף צינור הפליטה.

בכדי להגן על מאייד מסוג מצוף מפני התקרחות, או לפזר קרח שהתהווה, יש צורך בחימום קדם נוסף. ההתאיידות של הדלק, בתוספת ירידת הלחץ עקב שינוי מצב המצערת ומעבר הדלק דרך הוונטורי ושסתום הפרפר, גורמים לירידה בטמפרטורה של בערך 70°F במערכת היניקה. נפילת טמפרטורה זו גורמת לאדי המים המוכלים באוויר להתעבות ולקפוא. כיוון שהקפיאה מתרחשת ב -32°F , נפילת הטמפרטורה תדרוש לפחות 32°F פלוס 70° , או 102° טמפרטורת אוויר למניעת היווצרות קרח ב 0°F טמפרטורת אוויר חיצוני. להסרת הקרח שנוצר, מערכת חימום הקדם חייבת להיות בעלת יכולת העלאת הטמפרטורה הנכנסת למאייד בלפחות 150°F , בהספק שיט, בטמפרטורת אוויר חיצונית של 0°F . דבר זה מספק מרווח מניעת הקרח של 150° פחות 102° , או 48°F , אשר ימיס את הקרח במהירות.

למאיידים מטיפוס הזרקת מידוד אין כמעט נטייה להקרח עקב אידי דלק; אולם יש לספק חימום למניעת הקרח במובילי האוויר, מסנן המאייד, מצערת, שבשבות מפוח, וחלקים אחרים של המערכת.

משתמשים בשלוש שיטות למטרה זו: דלק מוזן ממתאם בין המאייד והמנוע; דלק מוזן לתוך עין המפוח; השבשבות בצוואר המפוח מוסרות ומשתמשים בהזרקה.

תחת כל התנאים הללו, תפעול סדיר מתבצע עם אוויר קר למאייד. כאשר מתקיימים תנאים להקרח, נדרש חימום; אולם הכמות הנדרשת משתנה. לתפעול בטוח, מערכת קדם החימום חייבת להיות מסוגלת להעלות את הטמפרטורה של האוויר הנכנס למאייד ל 110°F לפחות, בתנאי שיט של 0°F אוויר חיצוני. ספר תפעול המטוס מגדיר בדרך כלל את הכמות של החימום המוקדם שנדרש לספק, ושיטת המדידה. בדיקות קירור הראו שדגמים מסוימים של נחירי פריקת דלק, תכנון צווארי מפוח, ושימוש בהזרקה, דורשים טמפרטורה נמוכה בהרבה משזו שהוגדרה למעלה, למניעת היווצרות קרח. בבדיקות אלו, הטמפרטורה המעשית של היווצרות הקרח השתנתה עם הלחות היחסית.

בדיקות התקרחות שבוצעו במעבדה בכונס, מאייד הזרקה ומפוח מנוע, הניבו את התוצאות המעניינות הבאות:

א. השימוש בנחיר דלק במתאם בין המאייד והמנוע, מנע היווצרות קרח אם נשמרו 90°F באוגן הכניסה של המאייד.

ב. השימוש בהזרקה בתוך עין המפוח, אפשר טמפרטורת אוויר של 50°F בפני המאייד למניעת היווצרות קרח.

ג. רשת בגודל מסוים במאייד התקרחה באיטיות, ולא דרשה אלוהול להסרת הקרח, אם סופק אוויר חופשי מחומם ב 50°F או יותר.

ההמלצות הנסמכות על תוצאות אלו הינן:

א. למרות שמומלץ על אוויר בטמפרטורה של 90°F למניעת קרח, רצוי במהלך תנאי התקרחות להשתמש באוויר "חם מלא" לניקוי הקרח אשר התהווה, ולהחזיר לתפעול ב 90°F כאשר הקרח הורחק.

ב. באופן כללי, אין לחרוג מ 100°F לזמן ממושך. טמפרטורות החורגות מערך זה יכולות לגרום נזק למנוע. על מנת לווסת את אספקת החום, נדרשת בקרה משתנה מלאה לאפשר תפעול על ידי שימוש רק בחלק מקדם החום.

ג. מערכת אוויר עזר ומכשיר קדם חימום חייבים להיות מתוכננים כך שלא תתאפשר כניסת מים למערכת היניקה. הלחות היחסית של אוויר קדם חימום חייבת להיות 100% או פחות בטמפרטורות אוויר מאייד מתחת ל 100°F . הטמפרטורה חייבת להימדד בפני הכניסה למאייד.

נחוצים שסתומים במערכת היניקה להכנסת אוויר חם לקדם חימום של המאייד. שסתומים מסוג סיבובי אשר מכילים מאפייני איזון פנימי עדיפים על פני סידור דלת מדף פשוטה, כיוון שהם מועדים פחות לנזילות אוויר חם לתוך מוביל האוויר, במהלך תפעול אוויר קר. בדרך כלל הם קשיחים יותר ועמידים בפני אש חוזרת ודורשים כוחות תפעול נמוכים יותר מאשר מדף צירי. כפי שהוסבר קודם, לתפעול נאות של המאייד, חיוני לקבל לחץ אחיד וחלוקת טמפרטורה של האוויר בפני המאייד, ולקבל את כניסת האוויר בזווית הנכונה לפני המאייד. בכדי להשיג זאת, שסתום האוויר החם חייב להיות ממוקם רחוק ככל האפשר מפני המאייד; דבר זה מאפשר

למערכות החזקות לערבב את האוויר החם והקר, ומאפשר לזרימת האוויר המעורבבת להתיישר לפני ההגעה לפני המאייד. השסתום חייב להיות ממוקם לפני סיבוב מוביל האוויר, ולא בין הסיבוב והמאייד. כאשר השסתום במצב אוויר קר, צריך לאפשר עקיפה לאוויר החם, בכדי למנוע נקודות חמות כלשהן, שלא זורמות.

ניקיון אוויר

כללי – מנקי אוויר הכרחיים לתפעול בתנאי מדבר, ומומלצים לכל מטוסי האימון שפועלים באחוז גדול מזמן הטיסה שלהם בהמראות ונחיתות. מטוסים אחרים שפועלים משדות יבשים ומאובקים חייבים להיות מצוידים גם הם.

על מנת שיהיו בעלי ערך, המנקים חייבים ללכוד 100% בקירוב של הזיהום אשר, באם לא, ייאסף בסופו של דבר על ידי מערכת הסיכה של המנוע.

יצרני מטוסים משתמשים בסוגים שונים של מסנני אוויר. אמצעים אלו חוסכים בלאי במנוע על ידי הסרת האבק הדק וחלקיקי חול, הפועלים כחומר שוחק על משטחי מיסבי המנוע. יחידת הניקוי חייבת להיות מתוכננת כך שהתנגדותה לזרימת האוויר תהיה נמוכה.

מסנני אוויר מטיפוס רטוב כוללים דגם של אמבטיית שמן ודגם צמיגי-חדיר. השתמשו בדגם אמבטיית שמן בהצלחה ברכבים, מנועי גז ומתקנים קרקעיים; עקב משקלם, והעובדה שהשמן יכול להישפך במהלך תמרונים, גרסה זו אינה בשימוש במטוסים.

הדגם הצמיגי מנקה את האוויר על ידי הבאתו למגע כפוי עם דפנות המסנן המצופות שמן. יתכן שמסנן מהסוג היבש יועדף כאשר כמויות גדולות של חול ולכלוך עשויים להיכנס למוביל האוויר. במקרה זה הדגם הצמיגי עלול להיסתם במהירות במקום לנער מעליו את האבק, כפי שהדגם היבש עושה, באם מותקן כיאות. לסוג היבש יש יתרון של משקל קל ופשטות ניקוי; לסוג הרטוב יתרון מוחלט מנקודת המבט של נפח, כיוון שיתכן שישתמשו בו במהירויות גדולות יותר, במספר מקרים עד ל – 1500 סל"ד. בנוסף, מעט שמן מהסוג הרטוב נישא לפני השטח של המאייד, שם הוא מרטיב את הוונטורי ובקרת התערובת. כאשר המסנן מוסר לניקוי, או אם חודר אבק דרך הדלת העוקפת או המסנן, הוא מתיישב על החלקים הרטובים משמן, ויוצר שכבה אשר מקלקלת את פיצוי המידוד, הלחץ והטמפרטורה. בתנאי מזג אוויר קרים, השמן המוכל בסוג הרטוב ייצר צמצום משמעותי.

למרות שמנקי אוויר נדרשים כמעט לחלוטין בתפעול קרקעי, דווח על הימצאות אבק בטיסה בצפיפות שחוסמת את ראיית הטייס. בכל המקרים הללו, חייב להתאפשר תפעול מנוע בהספק גבוה, כך שתידרש יעילות וביצועים מרביים של מערכת הניקה. לתפעול במקום שרצויה נצילות מרבית בכל המצבים, מומלץ שימוש במערכת ניקה בעלת כניסה ללא אוויר מגח. מערכת כזו מכילה מנקה אוויר וממוקמת בחטיבת האביזרים, טבעת קדמית של החיפוי או במקום נוח אחר. יש להשתמש בכניסת אוויר מסונן זה רק כאשר נדרשת מניעת אבק. לכל האפשרויות האחרות, כונס אוויר מגח ללא מנקה אוויר צריך להיות זמין לביצועים מרביים, ויש לעקוף את מוביל האוויר בעל המסנן. יתר על כן, מומלץ לחבר את מנגנון שסתום מנקה האוויר למנגנון כני הנסע להבטחת פעולת מנקה האוויר כאשר כני הנסע במצב מטה.

כאשר משתמשים במנקי אוויר, יש להתייחס למצבי הקרחה שמתרחשים משכבת קרח, או מקפיאת המסנן לאחר שנספג בגשם. פתרון הגיוני הוא כנראה השימוש במוביל אוויר עזר לנשיאת יחידת הניקוי. דווח שמונע קרח בכניסה למוביל האוויר מונע הקרחת המסנן. מונע קרח זה עשוי מרשת גסה, הממוקמת במרחק קצר משפת הכניסה לכונס. דבר זה יאפשר לרשת לאסוף קרח, וגורמת לאוויר, שאיבד את חלקיקי הלחות שלו, לעבור סביב הרשת עם הקרח לתוך תא המסנן. אפשרות אחרת היא למקם את הרשת ישירות על שפת הכניסה של הכונס, וכניסת אוויר עזר נמצאת מיד לאחר מונע הקרח.

אם משתמשים בכניסות אוויר נפרדות לכניסה ראשית וכניסת עזר, יש לצייד באפשרות סגירת כניסת העזר כאשר פועלים במצבי אבק.

המיקום וההתקנה של יחידת הניקוי יכולים להיות קבועים, או כמו יחידת העזר שניתן להרכיבה רק כאשר נדרשת, או כבית קבוע עם גוף הסינון המורכב רק כאשר נדרש. הבחירה תתבסס על סוג המטוס וצורות התפעול המיועדות שלו.

המסנן האידיאלי – למסנן האידיאלי תהיינה התכונות הבאות: גודל מזערי, אשר מאפשר מהירות אוויר מותרת מירבית; עובי מזערי; יעילות ניקוי אפשרית הגבוהה ביותר; עליה מזערית בהתנגדות כאשר מתאסף אבק; ללא השפעה מפריעה על מידוד המאייד.

מערכת פליטה

כללי – פרק זה עוסק בשיקולי תכנון מערכת הפליטה הבסיסית, כאמצעי לסילוק גזי פליטה חמים מהמטוס. **שיקולי תכנון** – הנקודות הבסיסיות שיש להתחשב בהם בתכנון מערכת הפליטה מתוארות בסעיפים הבאים:

בטיחות – המערכת חייבת להגן על המנוע ומבנה המטוס מהשפעות הרסניות של הלהבה והטמפרטורות הגבוהות, ולשמור על הצוות והנוסעים מפני פחמן חד חמצני.

אמינות – המערכת חייבת להיות אמינה, ולפעול ביעילות לאורך תקופות שירות ממושכות עם אחזקה או שירות מזעריים.

לחץ חוזר – אסור שיטל לחץ חוזר בלתי חיוני על הצילינדרים; דבר זה יגרום לאובדן ישיר של הספק המנוע, ויכול לגרום להשפעות מזיקות על ביצועי השסתום והצילינדר ועל טמפרטורת הצילינדר.

משקל – המשקל של המערכת חייב להיות מזערי, בהתחשב בקשיחות והתנגדות לטמפרטורות גבוהות, שיתוך ורעידות.

נגישות – מערכת הפליטה חייבת להיות נגישה לביקורות ואחזקה, ואסור שתפריע לגישה לחלקים אחרים של המנוע.

זרימת אוויר – אסור שמערכת הפליטה תפריע לזרימה חופשית של אוויר קירור המנוע.

חומר – המצבים בהם פועלת מערכת הפליטה הם כה חמורים, כך שניתן להשתמש רק בחומרים מיוחדים לייצורה. החומר חייב לשמור על חוזק בטמפרטורות גבוהות, כך שטבעת המאסף תשמור על צורתה וקשיחותה כאשר מטפלים בגזי הפליטה בעלי טמפרטורה ממוצעת מ - 1400° עד 1800°. החומר חייב לעמוד בפני שיתוך, ולעמוד בפני שינויי טמפרטורות פתאומיים, חומרים וחוזרים.

שטח – ניסיון מעשי הראה שמערכת פליטה שמישה, עם מאפייני לחץ חוזר, תושג אם שטח החתך של טבעת המאסף תהיה לפי הנוסחה הבאה:

$$A = 0.04 XHPX \frac{n}{N}$$

כאשר:

A = שטח נטו באינטש מרובע

HP = הספק המנוע בהמראה

n = מספר הצילינדרים בקטע המחושב

N = סך כל הצילינדרים במנוע

נוסחה זו תספק שטחי מאסף פליטה אשר, באופן כללי, הוכחו כמשביעי רצון למנועי שורה אחת או כפולה, בגדלים שונים, ולסידורי מאספים שונים. הנוסחה נבעה בעיקר משיקולי לחץ חוזר; אולם יש להכיר בכך ששטח החתך אינו הגורם היחיד אשר משפיע על הלחץ החוזר של המנוע. זרימות מופרעות, וטיפול בלתי הולם בכיפופים וחתכים, יכולים לגרום לאובדנים אשר ידרשו ששטח החתך הבסיסי יגדל על מנת לשמור את הלחץ החוזר בתחום מגבלות מקובלות. השטח הנדרש למאסף הפליטה מושפע גם מסידור הצילינדר, וסדר ההצתה של הצילינדרים.

צורה – המאסף חייב להיות מעוצב כך שהוא יספק זרימה חלקה ובלתי מופרעת של גז, מפתח הצילינדר לפתח היציאה של המאסף.

שטחי מאסף חייבים לגדול בהצרה אחידה ללא שינויים פתאומיים בקטעים. שינויים כאלה אינם רצויים מנקודת המבט של המבנה והזרימה. יתכן וידרשו קטעים גליליים בחיבורים הטלסקופיים, אולם קטעים אלו יכולים להתמזג בצורה חלקה עם הצורה המוצרת הבסיסית. כל הקטעים חייבים להיות מעוגלים; זוהי הצורה היעילה ביותר משיקולי משקל וחוזק. קשה מאד להשיג חיבורים אטימים ועמידים בקטעים, חוץ מאשר מעוגלים. ניתן להשתמש בקטעים אליפטיים בפתחי היציאה ובמקום שנדרש מרווח מיוחד; אולם בכל מקרה, הציר העיקרי של האליפסה לא יהיה יותר מ - 5/3 של הציר המזערי. כל הרדיוסים של הכיפופים במערכת הפליטה חייבים להיות לפחות שלוש פעמים קוטר הצינור, בכל מקום שאפשר. הצטלבויות של צינורות ומאספים חייבות להיות משיקות ככל האפשר, עם רדיוס כיפוף גדול. רצוי מאד להגדיל בהדרגה את שטח הצינור, ככל שהוא מתקרב למאסף, במטרה להקטין את האובדנים המתרחשים בהתרחבות פתאומית מהצינור למאסף.

מיקום – הסידור והמיקום של מערכת הפליטה נקבעים על ידי פריסת פתחי הפליטה בצילינדר, והסידור הכללי של התקנת מערכת הכוח. בתכנון נורמאלי של מאסף, צינורות קצרים מופנים מכל צילינדר ישירות אחורה למאסף. המצב האופטימאלי של המאסף יכול להיקבע רק לאחר שיקול זהיר של מרווח ויחסי גומלין בין המאסף ומבנה התושבת, חיפוי, כונס המאייד, אביזרי המנוע, מובילי האוויר וכו'. המיקום הקדמי והאחורי מושפעים, ברמה מסוימת, מסוג החיבורים שמשתמשים בהם בין הצינור והמאסף ופתחי מאסף הפליטה. חיבורים גמישים בצינור דורשים בדרך כלל מרחק גדול יותר בין פתח הצילינדר והמאסף, מאשר דורשים צינורות קשיחים או אלה בעלי מחברים חלקים. אסור שהמאסף ימוקם אחורנית מדי; דבר זה נוטה להקטין את הנגישות לאביזרים, עוקות, מסננים וחיבורים שונים על החלק האחורי של המנוע. כמו כן, מיקום אחורי של

המאסף נוטה להגדיל את המשקל של מערכת הפליטה. מיקום קדמי מגדיל את העברת החום ממאסף הפליטה לחלקי המנוע (כגון צנרת יניקה ומרפקי מצתים) ועלול להפריע לזרימת אוויר הקירור של המנוע. יש לתת תשומת לב מיוחדת למיקום המאסף, כך שהוא לא יגביל את פליטת אוויר הקירור החופשי מהצילינדרים. אסור במיוחד שהמאסף ימוקם במצב, ביחס לציר תריס החיפוי, שיגביל או יחנוק את פליטת אוויר הקירור, כאשר מדפי החיפוי פתוחים. ניסיון העבר הראה שמיקום בלתי נאות של מאסף הפליטה יכול לפגוע בצורה חמורה בביצועי הקירור של ההתקנה.

בנוסף, מאסף הפליטה חייב להיות ממוקם כך שיאפשר מרווח מתאים בינו לבין החיפוי וחלקי המבנה, כגון תושבת המנוע. המאסף חייב להיבדק להפרעה אפשרית בתפעול מנגנון תריס החיפוי, או הבקורות שלו. לעתים מערכת הפליטה פועלת בטמפרטורות של 1000°F ; לפיכך, חלקים שאינם עומדים בטמפרטורות אלו חייבים להיות מוגנים להקרנת או העברת החום. חייב להיות מרווח מתאים בין מאסף הפליטה וצנרת היניקה של המנוע, מערכת ההצתה ותושבות גמישות של מתלה המנוע וחלקי גומי אחרים. כל המעטים, סוככים או כיסויים המקיפים את מאסף הפליטה חייבים להיות מאווררים היטב, וחופשיים מהצטברות אדי שמן או חומרים בלתי רצויים אחרים. באם יש נקודות מקומיות בהם מועבר חום יתר מהמאסף למנוע או חלקים אחרים, ניתן לרתך מגן קרינה למאסף. המגן חייב להיות ממוקם רבע אינץש מפני המאסף ולאפשר זרימה של אוויר בין המגן והמאסף. בכל מקום שניתן, המחברים במערכת הפליטה חייבים להיות ממוקמים כך שלא תגרם להבה ישירות על הצנרת, בקורות או מבנה עיקרי כתוצאה מנזילות.

פתחים – בטיחות צריכה להיות השיקול העיקרי כאשר בוחרים את פתחי מערכת הפליטה. אסור שלהבה מפתח הפליטה תפגע במשטחי המטוס, או תעלה את טמפרטורת חלקי המבנה לרמה חריגה. פתח הפליטה חייב להיות מופנה תמיד הרחק מאזורים במטוס שיש בהם שמן ודלק, או נזלים מתלקחים אחרים. מקומות אלו כוללים פתחי ניקוזים, פתחי אוורור, פתחי הורקה, צנרת נשמים ושסתומי משאבה. אסור לשחרר את גזי הפליטה לפני המאיד, מקרן השמן או פתחי אוויר. יש לוודא שחד תחמוצת הפחמן לא יחדור לתא הטייס. דבר זה יכול להיגרם לא רק ממיקום פתחי היציאה של מערכת הפליטה, אלא גם מהמצאות פתחים או נקודות נזילה בגוף או משטחי הכנפיים, אשר ממוקמים בצורה כזו שיגרמו לזרימה של גזי פליטה לתוך המטוס.

בנוסף לשיקולי התכנון הבסיסיים המוזכרים למעלה, רצוי שפתח מערכת הפליטה ימוקם במצב שיפחית, ככל האפשר, הבזק ורעש מפתח היציאה. אסור ששדה הראיה של הטייס יופרע מזוהר הבזק להבת הפליטה, ומסיבות פסיכולוגיות, רצוי שהלהבה תוסתר מראיית הנוסעים. באופן כללי, סידור שמרחיק את פתח הפליטה מקו הראיה משפיע באופן סביר על הפחתת הרעש. פותחו אמצעים שונים במיוחד להשקטת רעש הפליטה; אולם הם לא נחשבו כקבילים עקב משקלם, הסיבוכיות שלהם או לחץ חוזר עודף.

מתלה – קיימות שתי שיטות נפוצות למתלה מאסף הפליטה. ניתן לחברו למנוע, או ניתן לתומכו ממבנה המטוס.

כאשר המאסף מחובר למנוע, המשקל נישא בעיקרו על אוגן פתח יציאת הפליטה על הצילינדר, עם תמיכת עזר בנקודות אחרות על המנוע, כגון רגליות בית הנדנדים או תומכי מתלה המנוע, כפי שנדרש. עם מתלה מסוג זה, מאסף הפליטה עוקב אחרי תנועת המנוע. המבנה יכול להיות קל ופשוט, עם דרישות מזעריות כתלות בגמישות הנקודות והחיבורים. סוג זה של מאסף הוכיח עצמו לשביעות רצון במנועים בעלי הספק בינוני, ולמערכות פליטה קלות משקל. למנועים גדולים יותר, ולמצבי פעולה חמורים יותר, משקל המאסף יכול לחרוג ולכפות עומסים גבוהים על חיבורי פתח הפליטה. דבר זה נכון במיוחד לתכנונים המשלבים צינורות הגבר, דוודים או מחליפי חום אחרים במערכת האיסוף.

כסידור תחליפי, ניתן לתמוך את המאסף ממתלה המנוע, או מבנה אחר של המטוס, ולחבר אותו למנוע באמצעות ארובות גמישות. משקל המאסף, לפיכך, מוסר מהמנוע, והטבעת עצמה אינה נתונה לרעידות המנוע. החיבורים הגמישים בארובות הפליטה חייבים להרשות התפשטות טרמית, ותנועה יחסית בין המנוע ומבנה המטוס, אליו הוא מחובר. דגם זה של מאסף כבד יותר, באופן כללי, מאשר דגם פשוט יותר, המותקן ישירות על המנוע ודורש יותר מקום. הוא קשה ויקר יותר לייצור ואחזקה, אולם בעל יתרונות ברורים של הקלת משקל המאסף מהמנוע. קבלת סידור זה תלויה בעיקר בתכנון המפורט של המחברים הגמישים, ויכולתם לעמוד בפעולה ללא כיפופים או נזילות, או דרישות אחזקה מיותרות.

חיבורי צילינדר – דווחו קשיים בשמירת מניעה של דליפות גז במצמדי האוגן עם אטמי נחושת ואסבסט. ביצועים טובים יותר הושגו, במספר מקרים, על ידי חיבור ללא האטם, ובמקרים אחרים, על ידי החלפת אטם הנחושת ובקרה על הפיתול בהידוק אומי האוגן.

מחברים – המחברים במערכת הפליטה נדרשים לאפשר התקנה והסרה של המאסף, לאפשר התפשטות טרמית, ולספק תנועה יחסית בין המאסף והמנוע.

לתפעול בטוח, ברור שכל המחברים חייבים לשמור על אטימה יעילה כנגד נזילות גז ולהבה במהלך חיי ההתקנה.

למטרות שירות, אחזקה וביקורת, רצוי שחלק גדול מהמאסף ניתן יהיה להסרה במקטעים, כך שאפשר יהיה להוציא חלק אחד ללא הפרעה לשאר ההתקנה. כמו כן, נוח לספק חיבורי ארובה אשר מאפשרים הסרה של הצילינדר ללא הצורך להסיר את המאסף. מחברים קשיחים, או חיבורים, למטרות הרכבה חייבים בעדיפות לא להיות מסוג טלסקופי, אשר דורש תנועה צרית של קטע אחד ביחס לאחר על מנת לנתקו. לפרוק קל, רצוי שהמקטעים יחוברו בזוויות מתאימות לציר הצינור. לצורך הבטיחות, רצוי, או נדרש לעיתים תכופות, להוסיף "אטם אש" או מקטע טלסקופי. יש להכניסם בחיבור הקשיח למניעת נזילת להבה או חריגה של מקטעי המאסף, במקרה של כשלון האיטום הראשי (תפס או אוגן).

מאספי פליטה פועלים תחת טווח רחב של טמפרטורות; לפיכך, יש צורך לספק מספר מתאים של מחברים, בכדי לאפשר התפשטות טרמית. יכולים להיווצר עומסים גבוהים מאד במקום בו התפשטות טרמית מוגבלת, יש להימנע מעומסים בלתי נחוצים אלו. במנועים בהם המאסף נתמך מראש הצילינדר, הטבעת בין כל צילינדר חייבת לכלול מחבר התפשטות. באופן כללי, כל מקטע חייב להיות מוחזק בקשיחות בנקודה אחת בלבד, וחופשי להתפשטות צרית בנקודות התמיכה האחרות. מחברי החלקה טלסקופיים יאפשרו התפשטות טרמית זו, ובאותו הזמן יספקו תמיכה וריסון בכיוונים אחרים. המחברים חייבים להיות מהודקים מספיק, בכדי למנוע נזילה של גז פליטה, אולם לאפשר פעולת החלקה. יש להתחשב בעקומת הטמפרטורה בקטעי המחברים, ולתוצאה של התפשטות שונה, שעלולה לגרום להתפסות המחבר כאשר מתחמם, באם מרווחי מצב קר קטנים מדי. בתכנונים העכשוויים הוכח, שמרווח בקוטר של 0.003 עד 0.006 לאינטש קוטר צינור הינו משביע רצון.

במאסף המותקן על מבנה המטוס, נדרש שהארובות בינו ובין הצילינדרים יספקו חיבור גמיש, אשר יאפשר תנועה יחסית בין המאסף והמנוע. הדרישות לחופש מוחלט בחיבורים אלו מחייב מכלול הכולל שני מחברים כדוריים, וחיבור החלקה. למנוע התלוי בצורה אלסטית, המחברים חייבים לאפשר הסטה משיקית עקב תגובת הפיתול, ולתנועה האנכית והרוחבית של המנוע. הכיוון והמשרעת של תנועות אלו נוצרים בתכנון מערכת מתלי המנוע, ויש להחליט לגביהם לכל דגם ייחודי של מנוע שאליו מערכת הפליטה מיושמת. מחבר ארובה גמיש לחלוטין הינו מתקן חדש יחסית, אשר מפותח ומשופר בעקביות.

יישומים מיוחדים

חימום קדם מאייד – מערכת הפליטה משמשת כמקור חום להגדלת טמפרטורת אוויר היניקה של המאייד, למניעת היווצרות קרח. קיימות שלוש שיטות עיקריות לפיהן החום מועבר מגזי הפליטה. הן מזהות כביט מאסף, מעטה וצינור הגבר.

דגם בית המאסף של מערכת חימום קדם, באופן כללי, זהו סידור מאד רצוי לכלים חקלאיים. סידור זה מספק מקור לחימום קדם של המאייד ומבצע תפקידים שימושיים אחרים ומנצל את פני החיפוי הקיים.

מחמם קדם מדגם מעטה הינו למעשה מאסף בעל דפנות כפולות. גזי הפליטה נישאים דרך המאסף הפנימי, שהינו בעל תכנון רגיל ועטוף לחלוטין על ידי מעטה. המעטה נפרד מהמאסף על ידי מרווח שבין 5/8" לאינטש, והאוויר למאייד זורם דרך המעבר הטבעי בין צינור המאסף והמעטה. השטח של מקטע טבעי זה חייב לגדול לקראת נקודת הפריקה של האוויר המחומם למאייד, במטרה לאפשר לנפח המתווסף של האוויר המחומם להיאסף מההסתעפויות צנרת הפליטה. החיפוי נתמך על ידי המאסף עצמו בעזרת מרווחונים או גשרים, ומוחזק במקומו על ידי תפסים או אוגנים מוברגים. חייבת להיות אפשרות של תנועה יחסית בין מקטע החיפוי ובין טבעת המאסף. חייב להיות מרווח רגיל של 1/4" או יותר בין המעטה וחלקי המנוע הסמוכים, חיפוי ומבנה בכדי למנוע קשיים מכאניים ושמירת אפיציות ייצור. המעטים יוצרו הן מסגסוגות אלומיניום קלות והן מפלדת אל חלד. דגם פלדת אל חלד כבד יחסית, אולם עמיד יותר בטמפרטורות גבוהות ורעידות חמורות. דגם המעטה של מחמם הקדם יספק חימום מוקדם ברמה גבוהה. חסרונם בקושי ליצור, להתקין ולתחזק. ביקורת למאסף מחייבת הסרת המעטה. דגם זה של מערכת קדם חימום מותאם בצורה הטובה ביותר להתקנות אשר אינן כוללות חיפוי בין חטיבת הכוח של המנוע וחטיבת האביזרים.

במערכת קדם חימום צינור הגבר, אוויר המאייד מובל דרך צינור שעובר דרך מרכז המאסף. צינור זה חייב להיות מפלדת אל חלד קשה, ולעיתים עשוי גומות (dimpled), בכדי לקדם העברת חום בין הגזים החמים ואוויר היניקה. מחברים לא מאושרים במקטע הצינור בתוך המאסף, ויש להתקין מחבר החלקה להידוק בנקודות בהם הצינור נכנס ועוזב את טבעת המאסף. טבעת המאסף חייבת לגדול בצורה ניכרת בקוטר, בכדי לייצר את אותו שטח החתך בזרימת גז הפליטה כמו זה שבטבעת בלתי מופרעת, ויש לאפשר תוספת שטח לפיצוי החסימה, ותופעות הפרעה, של צינור ההגבר על זרימת הגז. צינור ההגבר כבד, והיצור וההרכבה של טבעת המאסף מסובכים, בעקבות הימצאות הצינור הפנימי. בדיקות ואחזקה קשים לביצוע.

מחממי תא – ניתן להשתמש בגזי הפליטה גם לחימום אוויר התא. יש להפגין זהירות יתרה בתכנון מחממי אוויר התא, למניעת דליפות חד תחמוצת הפחמן לתוך מערכת האוורור. מערכת האוורור חייבת להיות בעלת שסתום שסיגור בצורה מוחלטת זרימה של אוויר ממחמם התא. ניתן למנוע סכנה של זיהום הגז על ידי שימוש

במערכת חימום בלתי ישירה בעזרת דוד חימום או מחליף חום במערכת הפליטה, ומקרן להעברת חום לאוויר האוויר. מערכות כאלו כבדות מאד והדוד, עקב התנאים החמורים בהם פועל, מיצר בעיה חמורה של שירות ואחזקה. כמו כן, קשה לספק פני שטח מתאימים בדוד לקבלת כמות מספיקה של העברת חום של גז הפליטה, ללא הפרעה לזרימה, ולפיכך יצירת לחץ חוזר עודף במנוע.

מניעת הקרחה בכנף – יש הרבה חום זמין בגז הפליטה למניעת היווצרות קרח על פני הכנף. הבעיה הברורה הינה להעביר את החום מהגזים החמים למשטחי הכנף בצורה יעילה, וללא תוספת משקל עודף למטוס. הנטייה הנוכחית הינה לספק לכנף את האוויר החם ממחלפי החום במערכת הפליטה.

מדחסי גידוש – דרישות התכנון הבסיסי למערכת פליטה, שבשימוש מדחסי גידוש, דומות, באופן כללי, לאלו של מערכות שטיפת גזי פליטה. חומרת מצבי הטמפרטורה והלחץ במערכת טורבו, שבהם מערכת הפליטה פועלת, גדולה, כך שעובי החומר חייב לגדול. נדרשת זהירות יתרה בתכנון מחברים, וחבורים, למניעת דליפת גז. יש לזכור שיש לחץ הפרשי גדול בין גז הפליטה והאטמוספירה הסביבתית בתפעול בגובה רב, ולחץ הפליטה נשמר בערכים של גובה פני הים. כל דליפה במערכת הפליטה, מכישלון זעיר או סדק, יכולה לגרום נזק חמור למשטחי המבנה הסמוכים, עקב תופעה של לפיד בלהבות הדולפות. נתוני בטיחות מצביעים שרצוי מאד להכניס את כל מערכת המאסף למעטפת פלדת אל חלד. יש לספק מרווח מתאים בין המעטה והמאסף, בכדי לאפשר זרימה של אוויר קירור.

חייב להיות מספר מתאים של תומכים ומחברי התפשטות בכל מערכת הפליטה, בכדי להבטיח את הצנרת כיאות, ובכל זאת לאפשר התפשטות טרמית. יש לספק חיבורים גמישים ומחברי ניתוק מהיר, במנוע ובקצוות הטורבו של מערכת המאסף, בכדי לאפשר התאמה והסרה פשוטה.

באופן כללי, מאספי פליטה, שבשימוש התקנות מדחסי גידוש, יכולים להיות בעלי שטח חתך קטן יותר מאשר אלו שבמערכת שטיפת גזי פליטה.

סילוני פליטה – חלק נכבד מהאנרגיה הזמינה בבעירת הדלק במנוע מטוס, מבוזבזת באופן סדיר עם שחרור גזי הפליטה. אנרגיה זו מופיעה כמהירות, חום ולחץ. סילוני פליטה מציעים אמצעים פשוטים יחסית לשימוש בחלק מאנרגיה זו, אשר בדרך כלל מבוזבזת. בצורה הפשוטה ביותר, סילון הפליטה מנסה לשמר את אנרגיית המהירות בגז הפליטה המשוחרר, על ידי אספקת מעבר חלק, ובלתי מופרע, מפתח הפליטה לנחיר יציאה המכוון למורד הזרימה, כך שתגובת הסילון תיתן דחף קדמי למטוס. תגובת הסילון יכולה לגדול על ידי כיווץ ארובות היציאה, כך שיבנה לחץ בארובה שיהפוך למהירות דרך נחיר הסילון.

המידה אליה ניתן לכווץ את פתח היציאה של הארובה מוגבלת על ידי התופעה הנגדית של לחץ חוזר בביצועי הצילינדר. באופן כללי, פתחי יציאה יחידניים של הארובה יעילים יותר מאשר נחירי יציאה בטבעת המאסף, עקב אובדני האנרגיה הנכפים בהתפשטות פתאומית של הארובות הבודדות לתוך טבעת המאסף. לא ניתן לתת קריטריון פשוט לתכנון של ארובות נחיר; הדחף המירבי אשר ניתן ליצר משילוב מנוע נחיר-מדחף הינו פונקציה מורכבת של מהירות המטוס וגובה, יעילות המדחף ורגישות צילינדר המנוע ללחץ חוזר. ניתן להשתמש בנחיר הפליטה כמכשיר שאיבה להגברת זרימה של אוויר קירור המנוע.

אביזרים

כללי – אביזרים באופן כללי, ואלו הנדונים כאן במיוחד, מתחלקים לשלוש קבוצות:

1. אביזרי מנוע המתייחסים ישירות לתפעול ובקרה של מנועים ומדחפים, כגון: מקבעי סל"ד, משאבות דלק ומתנעים.
 2. אביזרי מערכת מטוס המספקים מקור כוח לתפעול מערכות המטוס, כגון: מחוללי מתח ישר וחילופין, משאבות אוויר ומשאבות הידראוליות.
 3. אביזרי מכשור המהווים אמצעים ליצירת חיווי למצבי תפעול, כגון: מדי חום חשמליים, משדרי סל"ד ומכשירי מדידת לחץ.
- מנועים, באופן כללי, מצוידים בהנעה ותושבות לאביזרים המוזכרים למעלה, בהתאם לתקנים. האביזרים, מכל מקום, אינם מסופקים כציד מנוע תקני.
- הבחירה באביזר מתאים תלויה בדרישות המנוע ובמערכות המטוס, ולפיכך, היחידה חייבת להיבחר לביצוע תפקיד מוגדר במטוס. הבחירה באביזר המורכב במנוע מושפעת ישירות על ידי הגורמים הבאים:
1. התאמת האביזר למתלה וההנעה המסופקת מהמנוע.
 2. יכולת האביזר לעמוד בדרישות הנכפות על ידי דרישות מערכת המטוס. יש להתחשב בדרישות תפעול מסוימות כגון:
 - a. סיבולת ואמינות האביזר.
 - b. תגובת האביזר לתפעולים במצבים אטמוספריים וטווחי טמפרטורות להן המטוס יהיה חשוף.
 - c. התאמת האביזר לסוג התפעול לו המטוס מיועד.

- d. ביצועי האביזר בתנאי חירום.
e. עמידות האביזר ביחס לאפשרות של טיפול או תפעול בלתי מתאים על ידי הצוות.

אביזרי מנוע

מתנעים – מתנעי מנועים הם מנגנונים מתכננים שונים אשר מספקים את האנרגיה החיצונית, הדרושה לסיבוב המנוע לנקודה בה מערכות הדלק וההצתה מסוגלות לתפקד ביעילות בפעולת מנוע עצמאית. כאשר בוחרים מתנע, הגורמים הבאים חייבים להילקח בחשבון:

- מגבלות המומנט, הצורה וגודל התושבת.
- סוג הלסת, כיוון הסיבוב, יחס תמסורת לגל הארכובה, מגבלת פיתול סטטי, גודל וצורת התושבת הזמינה במנוע ושנדרשים על ידי האביזר.
- מעטפת המרווח של האביזר ביחס להפרעות, גישה להתקנה, בדיקות, תחזוקה, הסרה, חיבורים נדרשים.
- דרישות פיתול סיבוב המתנע.
- זמינות מערכת הספק חשמלית, כאשר נדרש למתנע. האפיונים הבאים נדרשים ממערכת החשמל ויש לתחשב בהם: מתח ישר או חילופין, הארקה, בידוד.

משאבות דלק – משאבות דלק מספקות זרימה מתמשכת של דלק תחת לחץ למאייד. כאשר בוחרים משאבת דלק יש לקחת בחשבון את הגורמים הבאים:

- גודל, צורה ומגבלות מומנט של התושבת הזמינה במנוע וזו הנדרשת על ידי האביזר.
- סוג ההנעה, כיוון הסיבוב, טווח ויחס מהירות הנעה, פיתול מתמשך וסטטי בתושבת האביזר והזמין במנוע.
- קיום ציר גזירה מתאים בציר תמסורת האביזר, להגנה על המנוע מפני עומס חריג.
- מעטפת המרווח של האביזר ביחס להפרעות, גישה להתקנה, בדיקות, תחזוקה, הסרה, חיבורים נדרשים.
- מומלץ שקיבולת המשאבה תהיה לפחות פעמיים מדרישות מרביות בגובה פני הים.

מקבע סל"ד – מקבעי סל"ד הם מנגנונים אשר מבקרים את פסיעת להבי המדחף בצורה אוטומטית, במטרה לשמור על מהירות מנוע נבחרת. המקבעים נשלטים, הן ידנית והן חשמלית, מתא הטייס; הם משתמשים בשמן או בחשמל בכדי לבקר את התמסורת למדחפים.

שני סוגי מקבעים מבוססים על עקרון משקלות תנופה מסתובבות. סוג אחד מבקר את זרימת השמן תחת לחץ לבוכנה בטבור המדחף, אשר מפעילה תמסורת מונחית זיז לסיבוב להבי המדחף. השני מבקר את השמן תחת לחץ למגעים מופעלים הידראולית, אשר מבקרים זרם חשמלי המזין את מנוע שינוי פסיעת המדחף בטבור המדחף.

כאשר בוחרים מקבע סל"ד, הגורמים הבאים צריכים להילקח בחשבון:

- מגבלות מומנט, צורה וגודל ואספקת שמן זמינה לתושבת המנוע והנדרשים על ידי האביזר.
- סוג ההנעה, כיוון הסיבוב, יחס וטווח המהירות, פיתול סטטי ומתמשך הזמינים במנוע והנדרשים על ידי האביזר.
- קיום ציר גזירה באביזר להגן על המנוע מעומס חריג.
- המלצות יצרני המדחף לשימוש בסוג מקבע מסוים.
- מעטפת מרווח ההתקנה חייבת להיות מתואמת בין יצרני המנוע, המטוס, המנוע והמקבע.

אביזרי מערכות מטוס

מחוללי זרם – מחוללי זרם מהווים מקור לאספקת הספק חשמלי להפעלת מערכות שירות מסוימות של המטוס כגון רדיו, תאורה, מנועים מפעילים, ממסרים ומכשירי מנוע וטיסה.

כאשר בוחרים מחוללים, הגורמים הבאים חייבים להילקח בחשבון:

- מגבלות פיתול, צורה וגודל של התושבות הזמינות על המנוע ואלו הנדרשים על ידי האביזר.
- סוג ההנעה, כיוון הסיבוב, יחס וטווח המהירות, הפיתול הסטטי והמתמשך הזמינים בתושבת המנוע והנדרשים על ידי האביזר.
- קיום ציר גזירה בציר האביזר להגן על המנוע מפני עומס חריג.
- מעטפת המרווח של האביזר ביחס להפרעה, גישה להתקנה, בדיקה, אחזקה, הסרה וחיבורים נדרשים.
- המתח וסוג המערכת החשמלית.

משאבות אוויר – משאבות אוויר מספקות זרימה מתמשכת של אוויר לתפעול מכשירי טיסה, טייס אוטומטי ופעילות מונע הקרחה. משאבות בשימוש במטוס מייצרות זרימת אוויר באמצעות שבשבות, אשר מחליקות על גבי רוטור הממוקם בקדח גלילי בגוף המשאבה.

בכדי לספק לחץ אוויר שלילי לג'ירו של המכשיר ושל מערכת טייס אוטומטי, שסתום ויסות יניקה, המסוגל לשמור יניקה קבועה שנקבעת מראש, משולב בקו הכניסה למשאבה. בפתח כניסת האוויר חייב להיות מותקן מסנן להקטנת האפשרות לכניסת חלקיקים זרים. כמו כן משולב שסתום כיוון אחד בקו היניקה, למניעת אפשרות לזרימה חוזרת של אוויר, וכניסת שמן למכשירים המונעים אוויר.

לאספקת לחץ אוויר חיובי למגפי מונע הקרחה, משולב בקו היציאה מהמשאבה וסת לחץ המסוגל לשמור לחץ קבוע שנקבע מראש. בדרך כלל נכלל שסתום לחץ או ביטחון במערכת לחץ האוויר, לשחרור המערכת מכל אפשרות של עליית לחץ חריג. יש להתקין מפריד שמן בקו יציאת האוויר מהמשאבה, ליתר דיוק בכדי למנוע משמן לחדור למגפי מונע ההקרחה, אולם גם להקטין את הנטייה של האוויר הנפרק והשמן לזהם את המטוס. קו יציאת הלחץ מהמפריד מחובר ליחידות הדורשות לחץ אוויר חיובי, או לאוויר החיצוני. קו פריקת השמן מחובר חזרה לתיבת האביזרים של המנוע.

יש לקחת בחשבון את הגורמים הבאים בעת בחירת משאבת אוויר:

- מגבלות פיתול, צורה וגודל של התושבות הזמינות על המנוע ואלו הנדרשים על ידי האביזר.
- סוג ההנעה, כיוון הסיבוב, יחס וטווח המהירות, הפיתול הסטטי והמתמשך הזמינים בתושבת המנוע והנדרשים על ידי האביזר.
- קיום ציר גזירה בציר האביזר להגן על המנוע מפני עומס חריג.
- מעטפת המרווח של האביזר ביחס להפרעה, גישה להתקנה, בדיקה, אחזקה, הסרה וחיבורים נדרשים.
- קיום פתח אספקת שמן בתושבת המנוע.

משאבות הידראוליות – משאבות הידראוליות מהוות מקור הספק הידראולי לתפעול רכיבי מטוס שונים, כגון: מעצורי גלגלים, מעצורי צלילה, מדפי כנף, מדפי מעטה מנוע, כני נסע מתקפלים, יחידות סרוו טייס אוטומטי, מדחס תא ופריטים שונים אחרים.

קיימים שני סוגים של משאבות הידראוליות, גלגלי שיניים ובוכנה, שניהם מספקים נוזל. יש גם דגמים של בוכנה השומרים לחץ הידראולי בתחום לחץ נבחר מראש, על ידי תגובה לשינויים בזרימת נוזל. הראשונים ידועים כספקים קבועים והאחרונים כספקים משתנים.

משאבות מטיפוס גלגלי שיניים הן משאבות ספיקה קבועה, המספקות זרימת נוזל באמצעות גלגלי שיניים המסתובבים בשילוב. כשהשיניים נפרדות בצד אחד, חלל השן מתמלא בנוזל מפתח הכניסה. הנוזל נישא סביב פנים גוף המשאבה על ידי שן הגלגל, נדחק כאשר השיניים משתלבות, ונדחף החוצה דרך פתח היציאה. ישנם שני סוגים של משאבות בוכנה לספיקה קבועה, השונים בשיטת הנעת הבוכנות. בסוג אחד, הבוכנות מופעלות על ידי לוח נע. בסוג האחר, הבוכנות והצילינדר מסתובבים סביב ציר, הנמצא בזווית לציר הנעת המשאבה.

מערכות הידראוליות, המעסיקות משאבות ספיקה קבועה, דורשות שילוב של שסתומי וסת לחץ, לשמירת לחצים שנקבעו מראש בכל המערכות, ושסתומי הקלה, כהגנה נגד לחצים חורגים, שעלולים לנבוע מתופעות תרמיות, או סיבות אחרות.

משאבות הידראוליות לספיקה קבועה פותחו בתגובה לדרישה, שגדלה, לפשטות של מערכות הידראוליות מורכבות. מערכות שהעסיקו משאבות ספיקה משתנה אינן דורשות הכללה של וסת לחץ או שסתום הקלה כיחידות נפרדות, כיוון שהתפקוד של יחידות אלו משולב במשאבות.

פתחי ניקוז אטם התמסורת של משאבה הידראולית נמצא בקרבת אוגן מרכב גוף המשאבה. לאחר התקנת המשאבה, החלק התחתון שלה חייב להיות מחובר לצינור שמופנה החוצה, הצריך להיות ממוקם על מעטפת בית המנוע, רחוק ככל האפשר מפתחי הפליטה של המנוע. כאשר בוחרים משאבה הידראולית, יש להתחשב בגורמים הבאים:

- מגבלות פיתול, צורה גודל והתקני סיכה (באם נדרש על ידי משאבות מסוימות) של התושבות הזמינות על המנוע ואלו הנדרשים על ידי האביזר.
- סוג ההנעה, כיוון הסיבוב, יחס וטווח המהירות, הפיתול הסטטי והמתמשך הזמינים בתושבת המנוע והנדרשים על ידי האביזר.
- קיום ציר גזירה בציר האביזר להגן על המנוע מפני עומס חריג.
- מעטפת המרווח של האביזר ביחס להפרעה, גישה להתקנה, בדיקה, אחזקה, הסרה וחיבורים נדרשים.

אביזרי מכשור

מדי חום חשמליים – קיימים שני סוגים בשימוש כללי של מדי חום חשמליים למדידת חום ראש ובסיס הצילינדר. הם ידועים כזוג תרמו-אלקטרי, או יותר נפוץ, צמד תרמו-אלקטרי ומנורת התנגדות. שני סוגים אלו חייבים להיות בשימוש ביחד עם מכשיר מדידה, אשר ביסודו הוא גליונומטר.

מד חום זוג תרמי – כאשר צמדים תרמיים משולבים במעגל סגור, בעל טמפרטורות שונות בצמדים מנוגדים, נוצר כוח אלקטרו-מניע קטן, הגורם לזרם לזרום מהצומת החמה לקרה וחזרה. הכוח האלקטרו-מניע נמדד על סקאלת המכשיר במעלות. משתמשים במילי-וולטמטר כמכשיר חייווי. נדרשת התנגדות קבועה מראש במעגל ליצירת יחס בין הטמפרטורה, שאמורה להימדד, והמתח המתפתח על ידי הפרשי הטמפרטורות בין הצמדים. ערך המתח יציג את הטמפרטורה בצומת החמה של הצמד התרמי. משתמשים בשלושה סוגים של צמדים תרמיים: אטם מצת, כידון (למדידת טמפרטורת ראש צילינדר), ומסמרה עיוורת, למדידת טמפרטורות בסיס צילינדר.

כאשר בוחרים צמד תרמי, יש להתחשב בגורמים הבאים:

a. טווח הטמפרטורה הנדרש לכיסוי על ידי הצמד התרמי.

b. פרטי אמצעי ההתקנה הזמינים, ואלו הנדרשים על ידי הצמד התרמי.

מד חום התנגדות – קיימים שני סוגים של מדי חום התנגדות למדידת טמפרטורה. שניהם משתמשים בעיקרון שההתנגדות של חוט משתנה, בעקביות, עם הטמפרטורה של המדיום הסביבתי. בשני הסוגים האלמנט הרגיש הוא סליל מחוט עדין בתיבה מתאימה.

בהתאם למטרה שאליה היחידה נועדה, אורך פנים המנורה והסליל ישתנו. אם משתמשים בסליל קטן בקצה המנורה, תימדד הטמפרטורה בסביבה המיידית המקיפה את קצה המנורה. אם הסליל נמשך לכל אורך המנורה, תימדד הטמפרטורה הסביבתית הממוצעת, המקיפה את המנורה. לפיכך, מומלץ לעקוב אחרי המלצות היצרן ביחס להתקנת המנורות.

משדרי מד סל"ד – משדרי מד סל"ד הם מנגנונים שתוכננו לשדר את מספר סיבובי המנוע לדקה למחשבים. בתא. קיימים שלושה סוגי משדרים: מכאני, חשמלי AC וחשמלי DC.

כאשר בוחרים משדר מד סל"ד, יש להתחשב בגורמים הבאים:

a. מגבלות פיתול, צורה וגודל של התושבות הזמינות על המנוע ואלו הנדרשים על ידי האביזר.

b. סוג ההנעה, כיוון הסיבוב, יחס וטווח המהירות, הפיתול הסטטי והמתמשך הזמינים בתושבת המנוע והנדרשים על ידי האביזר.

c. קיום ציר גזירה בציר האביזר להגן על המנוע מפני עומס חריג.

d. מעטפת המרווח של האביזר ביחס להפרעה, גישה להתקנה, בדיקה, אחזקה, הסרה וחיבורים נדרשים.

מדידות לחץ – עד כה חייווי לחץ סעפת, דלק ושמן הוצגו על מכשירים בתא, שחוברו ישירות למנוע בעזרת צנרת. שיטה זו משביעת רצון בשימוש נרחב במקומות בהם המנוע קרוב יחסית לתא. במקומות בהם המנוע ממוקם רחוק בצורה ניכרת מהתא, במיוחד במטוסים גדולים רבי מנועים, מדידת לחץ מתבצעת על ידי שימוש במשדרים חשמליים. משדרים אלו מותקנים בבית המנוע, ומחוברים למנוע בעזרת צנרת. המשדרים הופכים את הלחצים לאנרגיה חשמלית המוצגת על ידי מחשבים מתאימים, המכילים ליחידות הלחץ הנדרשות.

סיכום

לסיכום, נראה שהבעיות של התקנות מערכת כוח הן עצומות ומאד מורכבות. דיון זה נגע רק במספר קטן של בעיות עיקריות. הוא לא עסק בבעיות של התקנות מנועים מורכבים יותר. רק על ידי שיתוף פעולה הדוק בין מתכנני מנוע ומטוס, בעיות אלו יפתרו בצורה מוצלחת.

כללי

הספק להנעת המטוס דרך האוויר מסופק על ידי המנוע, הספק הבלימה שלו הופך לדחף על ידי המדחף. המדחף יכול להיות מתואר כפרופיל מפותל. בכדי לנתח את אלמנט הלהב, כל להב מחולקת למקטעים של ששה אינטש, וכל מקטע נקבע בזווית המתאימה לזרימת האוויר היחסית (ציור 37). המקטעים בקרבת קצה המדחף נעים במהירות גבוהה יותר מאשר אלו הקרובים לטבור; כתוצאה מכך, זוויות הלהב קטנות ככל שמתקרבים לקצה. במדחפי עץ המקטעים בין 12 ל - 18 אינטש מהטבור עבים יותר בכדי לספק חוזק למדחף; הם מעבירים דחף נמוך, או בכלל לא.

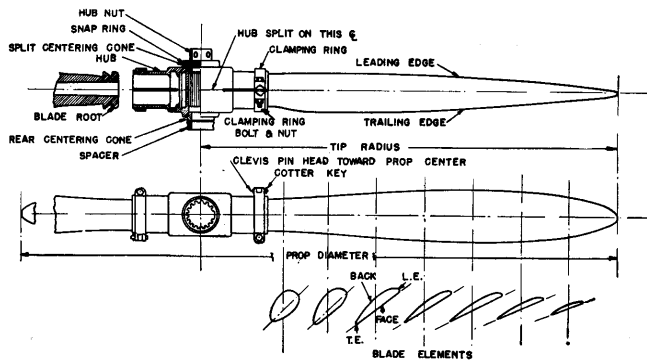


Figure 37.—Propeller parts and nomenclature.

ללהבי מדחף מתכת מודרני יש שרוולים, או מקטעי פרופיל, הנמשכים קרוב לטבור. באופן כללי, כל מקטע מתוכנן ונקבע בזווית להשגת נצילותו המרבית, כאשר המדחף מופעל במהירות סיבובית וקדמית נתונה.

הזווית בה כל מקטע פוגש את האוויר, במהלך הטיסה, נמוכה בהרבה מאשר זווית הלהב המעשית של כל מקטע. זאת כיוון שהמדחף נע קדימה, בעוד הוא מסתובב (ציור 38). מקטע G, אשר נמצא במרחק R מהטבור, נע בסיבוב אחד מרחק של $2\pi R$, וב N סיבובים הוא נע מרחק של $2\pi RN$. מרחק זה

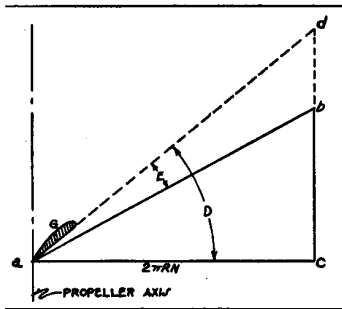


Figure 38.—Blade angle and angle of attack in normal flight.

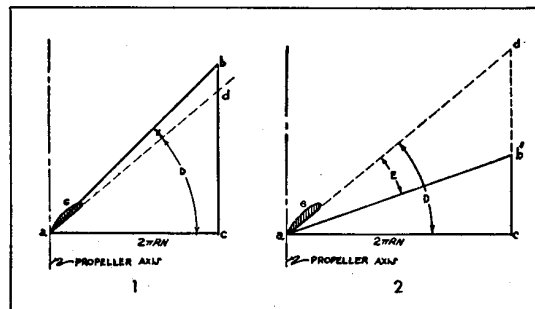


Figure 39.—Blade angle and angle of attack in a dive and in a steep climb.

מתואר בצורה גראפית על ידי הקו ac. בעוד המדחף מסתובב N פעמים, הוא נע גם קדימה למרחק המיוצג על ידי bc. זווית הלהב של מקטע זה היא זווית D, בעוד הזווית שבה המקטע פוגש את האוויר (זווית ההתקפה שלו) מיוצג על ידי הזווית E. בתנאי טיסה רגילים, זווית זו הינה בערך 2° . בצלילה חזקה, המטוס יכול להשיג מהירות גדולה יותר

מאשר המדחף מתוכנן לספק, עקב ההאצה על ידי כוח הכובד. כאשר זה מתרחש, המדחף מאט את המטוס ומושג המצב המתואר בציור 39 (1). כאשר מצב זה שורר, זווית ההתקפה E של מקטע המדחף G קטנה מאפס, ולא מיוצר דחף.

המצב המנוגד קיים כאשר המהירות הקדמית מופחתת, בעוד שמהירות הסיבוב נשארת קבועה, כמו בנסיקה תלולה. במצב זה זווית ההתקפה יכולה לגדול, עד אשר נצילות המדחף הופכת לנמוכה מאד, כמודגם בציור 39 (2).

מדחפי פסיעה קבועה מתוכננים לנצילות מרבית במהירות קדמית וסיבובית אחת. במלים אחרות, הם מתוכננים להתאים למצב מהירות מטוס ומנוע קבועים מראש, וכל שינוי באחד מהם גורם להקטנת נצילות המדחף. כיוון שהופעת מדחף פסיעה משתנה, שבו זווית הלהב יכולה להיקבע, או להשתנות למצבים חדשים, אוטומטית, הקטנת נצילות זו הופחתה.

הגדרות – מספר מונחי מדחף עיקריים שבשימוש פרק זה מתוארים להלן:

זווית הלהב – הזווית בין מיתר המקטע של להב המדחף, ומישור הניצב לציר הסיבוב. (זוויות הלהב של מדחפי פסיעה משתנה או מתכווננים, לשילוב מטוסים ומנועים שונים, מוגדרות במפרטי המטוס. שינוי של מעלה אחת בזווית הלהב ישפיע על סל"ד המנוע בין 70 ל - 100 סל"ד; במנועים בעלי תמסורת, דבר זה ישתנה עם יחס התמסורת)

גב הלהב – הצד העקום של להב המדחף, דומה למשטח העליון של מקטע פרופיל.

פני הלהב – הצד השטוח של הלהב המדחף, דומה למשטח התחתון של מקטע הפרופיל.

שורש הלהב – חלק הלהב הממוקם בטבור.

פסיעה אפקטיבית – המרחק המעשי שלהב מדחף נע קדימה בסיבוב אחד באוויר. (למרות שניתן להגדיר זאת ברגל, בדרך כלל זה מחושב באחוזים)

הנצה – המושג הנצה מתייחס לפעולה של סיבוב הלהב המדחף, מעבר לזווית הגבוהה ביותר הדרושה לטיסה רגילה, למצב המקביל בקירוב לקו הטיסה, אשר מונע "טחנת רוח" (windmilling) במהלך טיסה עם מנוע לא פועל.

זווית להב שלילית – פעולה זו מאפשרת ללהב לקבל זווית שלילית, ובכך ליצר כוח דחף המנוגד לכיוון הרגיל של תנועת המטוס. דחף שלילי זה הינו כוח בלימה יעיל ביותר, ומקטין את מרחק ריצת הנחיתה של המטוס.

פסיעה גיאומטרית – זהו המרחק בו הלהב מדחף עשויה הייתה לנוע קדימה בתווך מוצק, בסיבוב אחד. ניתן לחשוב על ידי הכפלת המשיק של זווית הלהב ב- $2\pi r$, מהווה את רדיוס הקטע של הלהב שבו הוא מחושב.

החלקה – זהו ההפרש בין הפסיעה האפקטיבית והפסיעה הגיאומטרית, ומבוטאת בדרך כלל באחוזים.

מסלול – זהו היחס בין נקודות דומות על להבי המדחף, בדרך כלל לאורך קו המרכז של הלהב, לניצב למישור של ציר הסיבוב.

דגמים – קיימים ארבעה דגמים כלליים של מדחפים: פסיעה קבועה, פסיעה מתכווננת, פסיעה משתנה, פסיעה משתנה אוטומטית.

דגם פסיעה קבועה מיוצר כיחידה אחת, ולא ניתן לכוון את הפסיעה. הוא יכול להיות מעץ או מתכת, וכיום השימוש בו מוגבל למנועים בעלי הספק נמוך יחסית.

דגם פסיעה מתכווננת יש לו בדרך כלל טבור מפוצל, אשר מאפשר כוון של הלהבים על הקרקע. המדחף מוסר מהמנוע כאשר כוון זה מתבצע. ניתן להשתמש בשנים או יותר להבים. הם עשויים בדרך כלל או מעץ או ממתכת, אולם יכולים להיות מחומרים אחרים.

דגם פסיעה משתנה מאפשר כוון של זווית הלהב במהלך פעולת המנוע באוויר או על הקרקע. ניתן להשתמש בשניים או יותר להבים. מנגנון בקרת זווית הלהב יכול להיות מכאני, הידראולי או חשמלי.

דגם פסיעה משתנה אוטומטית מקבל את ההספק לשינוי זווית הלהב מהשילוב הבא:

a. דחף (כוחות אווירודינמיים);

b. נטייה לפסיעה נמוכה של הלהבים וכוח משקולות הלהב, או

c. פיתול המנוע $i - b$ למעלה.

בטיסה, המדחף מכוון עצמו אוטומטית לזווית הלהב הנדרשת להספק שנקבע, וגובה המטוס.

רעידות ועומסים – שלושה סוגים כלליים של עומסים נוצרים במדחף: כיפוף, מתיחה ופיתול.

כוחות הכיפוף הנגרמים על ידי כוחות הדחף, שנוטים לכופף את הלהב קדימה, הם המוכרים ביותר. עומסי כיפוף אחרים נגרמים על ידי גרר האוויר על הלהב, והם זניחים.

כוחות המתיחה נגרמים על ידי הכוח הצנטריפוגאלי.

כוחות הפיתול הינם עקב הכוחות אשר נוטים לפתל את הלהב.

התעייפות עקב רעידות הינה הסיבה הנפוצה ביותר לכישלון מדחף. רעידות יכולות להיגרם על ידי זרימה בלתי סדירה של אוויר, כמון זה שיגרם על ידי מקרן נוזל קירור, הממוקם קרוב מדי למישור סיבוב המדחף. פעימות הספק המנוע הם הסיבה העיקרית לרעידות מדחף. רעידות, באם נמשכות בתדירות טבעית של המדחף, יגרמו לכישלון המדחף לאחר מספר שעות. לכל מנוע טווח קריטי של פעולה לכל סוג מדחף שאליו הוא משולב. יש להימנע מפעולת מנוע מתמשכת בטווח קריטי זה. איזון דינאמי של גלי הארכובה ומצמדי הנעה גמישים, בין המנוע והמדחף, הקטינו בצורה משמעותית את רעידות המדחף, ובהמשך כישלון עקב התעייפות.

היתרונות של מדחף פסיעה משתנה – מטרות מדחף פסיעה משתנה הן: ראשית, לאפשר למנוע לפתח את מלוא הספקו; שנית, לאפשר פעולת להבי המדחף בזווית מדחף היעילה ביותר; ושלישית, לאפשר כוון מחדש של זווית הלהב לצורך תנאי הספק ספציפי וגבהים שונים. סיכום התועלת של מדחף פסיעה משתנה: יתרון תמידי בביצוע בר השגה בכל מצב טיסה, למעט זה שאליו זווית הלהב שנקבעה אינה משתנה.

מדחף פסיעה משתנה חיוני כאשר נדרשת היעילות הגבוהה ביותר של המנוע והמטוס. שימוש במטוסים גדולים הינו בעל ערך גבוה, כיוון שהמרחק הנדרש להמראות מתקצר; דבר זה הוא נכס חיוני כאשר אורך המסלול מוגבל והשדה בגובה מעל פני הים. היתרונות בטיפוס ושיט ניכרים.

מדחפים מתכווננים על הקרקע מתוכננים ונקבעים כך שהמנוע מסתובב במהירותו הרשומה בערך בטיסה ישירה ואופקית. במקום שהמדחף מתוכנן, ובשימוש בדרך זו, המאפיינים שלו הם כאלו, שהוא מאפשר למנוע בערך 80% מהסל"ד הסדיר שלו – ובעקבות כך, כ- 80% מתפוקת ההספק הסדיר – במהלך ההמראה.

לפיכך, מנוע המדורג כרגיל ב- 1000 כוח סוס יפתח רק כ- 800 כוח סוס בזמן ההמראה. במהלך טיפוס, מדחף זה יביא את המנוע לבערך 85 עד 90 אחוז ממהירותו המוגדרת, עם תפוקת הספק של המנוע בסביבות

900. אובדן זה של הספק המנוע נמנע על ידי השימוש במדחף פסיעה משתנה, כיוון שהלהבים יכולים להתכוון לפסיעה נמוכה ככל שנדרש, בכדי לאפשר למנוע לפתח את הספקו המוגדר המלא. באופן כללי, לכל מנוע יש מהירות בטוחה מרבית לשיט, ולחץ סעפת בטוח למהירות סיבוב זו. בגבהים, המדחף יאפשר למנוע להסתובב בסל"ד גבוה יותר מאשר בגבהים נמוכים, הסיבה היא צפיפות אוויר נמוכה, המאפשרת התנגדות נמוכה יותר לסיבוב הלהבים. במדחף פסיעה משתנה, הפסיעה יכולה להיות מווסתת לזווית גבוהה יותר, כפיצוי על הבדל צפיפות האוויר. דגמים אחדים של מדחפי פסיעה משתנה משלבים תכונת הנצה. במצב הנצה, הם פועלים כמעצורים לסיבוב המנוע, ובאותו הזמן מקטינים את הגרר האפשרי על המטוס. היכולת לעצור את סיבוב המנוע, במקרה של כשלון מנוע במטוס רב מנועי, הינו הנכס הגדול של תכונת הנצה, מנקודת מבט של הבטיחות. בנוסף, טיסות מבחן של מטוסים רבי מנועים בעלי מדחפים שיכולים להיות מונצים, הראו שיפור ניכר בכל המופעים של ביצוע חד מנועי. מספר דגמים של מדחפי פסיעה משתנה, כתוצאה מהתפתחות התכנון לאחרונה, יכולים לאפשר מצב זווית שלילית של הלהבים. דבר זה מאפשר את הייצור של כוח עצירה גדול להקטנת ריצת הנחיתה. בסופו של דבר, ניתן להשתמש בזווית שלילית של המדחפים במהלך הטיסה, כאמצעי לקיצור ריצת הנחיתה. דחף שלילי מקטין את בלאי המעצור, ולמעשה ניתן לעצור את המטוס על ידי שימוש במדחפים אלו.

מדחף פסיעה קבועה

כללי ותיאור – מרבית המדחפים שבשימוש על מטוסים קלים הינם מדגם פסיעה קבועה ומחטיבה אחת. הערת המתרגם: המשך הפרק דן במדחפי עץ שכמעט ואינם בשימוש היום, לפיכך הפרק הושמט. המעוניין יוכל לקרוא את החומר המקורי בספר.

מדחף מתכוון על הקרקע

כללי – המדחף המתכוון על הקרקע הינו מדחף פסיעה קבועה, וכמו ששמו מרמז, ניתן לכוונו רק בעודו על הקרקע. המדחף מכיל שניים או יותר להבים וטבור. הואיל וזווית הלהב אינה נשלטת, היא נקבעת בזמן ההרכבה לזווית היעילה ביותר לכל מצבי השירות. זווית זו נקבעת על ידי טיסות מבחן ומוגדרת על ידי מפרטי המטוס.

מדחף מתכוון על הקרקע עם להבי סגסוגת אלומיניום – הלהבים עשויים מסגסוגת אלומיניום ומתכנון קונבנציונאלי. הכתפיים מעובדות על קנה הלהב כאמצעי חיבור בטוח לטבור, לצורך עמידה בכוחות הצנטריפוגליים על הלהבים. חור קונצנטרי קדוח בקצה שורש הלהב כסיוע באיזון המדחף. הטבור עשוי מפלדת כרום ונדיום, מצופה בקאדמיום. הוא מעובד בחצאים, עם מגרעת למיקום כתפי הלהב. הלהבים מוחזקים בטבור על ידי כתפי הלהב, היושבים במגרעת הטבור, האחיזה מסתייעת על ידי החיכוך של שני החצאים המוחזקים ביחד על ידי תפס טבעתי, הממוקם בכל קצה של הטבור. לעתים משתמשים במרווחון מאחורי הקונוס האחורי בכדי למקם כיאות את המדחף על הציר, ולמנוע הפרעה לחיפוי המנוע. אום התפיסה, קונוס קדמי, טבעת לחיצה וקונוס אחורי מהווים חלקים סטנדרטיים.

מדחף שני מצבים Hamilton Standard

עיקרון פעולה – קו לחץ שמן מחובר מאספקת לחץ ראשית במנוע לשסתום שלושה מצבים, ומשם דרך טבעת מאסף, לתוך חלקו הפנימי בקצה הקדמי של גל הארכובה, והחוצה לתוך צילינדר מפעיל פסיעה. שסתום שלושת המצבים מסודר כך, שסיבוב של קנה השסתום מחבר את קו השמן המוביל למדחף, עם אספקת הלחץ או ניקוז ישירות לתוך בית גל הארכובה. כאשר שסתום שמן זה מכוון למצב אספקת שמן, השמן זורם דרך טבעת המאסף לתוך גל הארכובה והחוצה לתוך הצילינדר, וגורם לצילינדר לזוז קדימה על הבוכנה. בעוד הצילינדר נע קדימה, ציר מיסב המשקולות, המחובר לבסיס הצילינדר, נע בחריץ הזיז של תושבת המשקולות. תושבת זו מחוברת לתותב הלהב באמצעות פינים. כאשר ציר המיסב נע במעלה הזיז, הוא גורם לתושבת להסתובב. סיבוב זה של התושבת מועבר ללהב, מסובב אותו למצב סל"ד גבוה (פסיעה עדינה). כאשר שסתום שלושת המצבים מסתובב למצב חדל, לחץ השמן בראש הצילינדר משתחרר. על זרוע של כל תושבת להב יש משקולת. הכוח הצנטריפוגלי המיוצר על ידי משקולות אלו מסובב את התושבות, ומסובב את הלהב למצב סל"ד נמוך (פסיעה גסה). מרבית המנועים המאוחרים, בעלי הספק גבוה, משלבים בתוכם את השסתום כציוד תקני. הפעולה של בקרות ההידראוליקה והמשקולות היא כזו שכוח עודף זמין לתנועה לתוך סל"ד גבוה (פסיעה עדינה) כאשר הסיבובים הם מתחת לערך הנורמאלי, וכוחות בקרה עודפים זמינים לסל"ד נמוך (פסיעה גסה) כאשר הסיבובים הם מעל הערך הנורמאלי.

סיכה – לפני שמכלול המדחף מורכב על המנוע, או אם המדחף מורכב ומאוחד, ממלאים את מפלג הטבור בשמן ומצפים ביסודיות את מיסבי ציר המשקולות בגריז.

בקרת המדחף – מנועים מותאמים למדחף שני מצבים על ידי הארכת מערכת לחץ שמן המנוע דרך גל הארכובה, או ציר המדחף, לאפשר פעולה של מנגנון המדחף. לחץ זה נשלט על ידי שסתום שלושת המצבים, הממוקם במרבית המקרים על חרטום המנוע. שסתום זה מופעל מהתא על ידי מוט סחב-דחף, או בקרה מסוג דומה. הבקרה הינה כבל וגלגלת, או סידור של מוט פיתול, תלוי בסוג המטוס עליו תורכב. מעצורים מתאימים בתא מונעים מאמצים בלתי רצויים על יחידת שסתום הבקרה. מהלך מוט הבקרה על שסתום שלושת המצבים מוגבל על ידי בליטות על חפי בסיס השסתום. בפעולה, בקרת התא מוזזת קדימה (אם מותקנת אופקית, או למטה, אם מורכבת אנכית) לפתיחה של שסתום שלושת המצבים, ומאפשרת לשמן לזרום לתוך צילינדר המדחף, ולאליץ את המדחף למצב פסיעה עדינה (סל"ד גבוה). תנועה של הבקרה למצב אחורי תזיז את השסתום למצב ניקוז, ותאפשר לשמן לזרום חזרה לבית גל הארכובה, ולשחרר את המדחף למצב פסיעה גסה (סל"ד נמוך).

תפעול – להלן הוראות תפעול כלליות:

הביצוע נקבע על ידי צפייה בשינוי הפסיעה במהלך תהליכי ההרצה. שינוי פסיעה חייב להיבחן על ידי צפייה במהלך הצילינדר על חזית המדחף או על ידי צפייה בשינוי הסל"ד על מד הסל"ד. בהקשר זה, יש לזכור שהלחץ ההידראולי משנה את זוויות הלהב מסל"ד נמוך (פסיעה גסה) לסל"ד גבוה (פסיעה עדינה), בעוד הכוח הצנטריפוגלי, שפועל על המשקולות, משנה את זוויות הלהב מסל"ד גבוה לנמוך. לפיכך, השינוי מסל"ד גבוה לנמוך מושג מהר יותר בסל"ד מנוע גבוה, עקב הכוח הצנטריפוגלי הגדול יותר שנוצר. בניגוד לכך, שינוי מסל"ד נמוך (פסיעה גסה) לסל"ד גבוה (פסיעה עדינה) מהיר יותר במהירויות מנוע קטנות יותר, כאשר הכוחות הצנטריפוגליים בעלי ערך נמוך יותר.

לפני התנעת מנוע המצויד במדחף פסיעה משתנה המילטון סטנדרד דו מצבי, הבקרה ממוקמת במצב סל"ד מופחת בכדי למנוע אפשרות חוסר שמן במיסבי המוט הראשי.

לאחר ההתנעה, יש להריץ את המנוע בערך דקה במצב סל"ד מופחת, לאחר מכן יש לשנות את המדחף למצב סל"ד גבוה (פסיעה גסה), ולשמור על מצב זה במהלך חימום המנוע. כאשר המדחף במצב סל"ד גבוה, בדוק את סל"ד המנוע במצבת מלאה.

למצב המראה וטיפול, בקרת המדחף ממוקמת במצב סל"ד גבוה (פסיעה עדינה) עד אשר מגיעים לגובה הטיסה המתוכנן. משתמשים במצבת בכדי למנוע מהירות יתר של המנוע. כיוון שהנצילות המירבית הינה חיונית בטיפול לאחר ההמראה, אין לשנות את המדחף למצב סל"ד נמוך (פסיעה גסה) עד אשר מגיעים לגובה של 1,000 רגל לפחות, אלא אם גובה הטיסה המתוכנן נמוך מכך. כאשר שיעור הטיפול נמוך מהרגיל, תזזות המצבת תהיה עדינה בכדי למנוע סל"ד עודף.

בקרת המדחף ממוקמת בסל"ד נמוך (פסיעה גסה) למצב של טיסה ישרה ורגילה.

במהלך גלישה ונחיתה, בקרת המדחף תמוקם במצב סל"ד גבוה (פסיעה עדינה), לשימוש היעיל ביותר במקרה שנדרשת הליכה סביב.

למניעת חשיפה ושיתוך בוכנת המדחף, כאשר המנוע לא פועל, צילינדר המדחף ימשך על ידי העברת מצב הבקרה לסל"ד נמוך לפני כיבוי המנוע. לבדיקת צילינדר המדחף לפגיעות ובלאי, מכבים את המנוע במצב בקרת המדחף בסל"ד גבוה (פסיעה עדינה).

מדחף פסיעה משתנה Hamilton Standard

עיקרון פעולה – במדחף פסיעה משתנה של המילטון סטנדרד, משתמשים באותו עיקרון הידראולי של פעולת מדחף שני מצבים, למעט תוספת הפעולה של מכלול קפיץ מחזיר. מכלול הקפיץ, המורכב בתוך בוכנת המדחף, מתכווץ כאשר המדחף מועבר לפסיעה עדינה (סל"ד גבוה), ובכך מסייע לכוח הפעולה של המשקולות בהחזרת המדחף לפסיעה גסה (סל"ד נמוך). כוח הקפיץ גדול ביותר בפסיעה נמוכה מרבית, ופוחת ככל שהפסיעה משתנה לגסה. כשני שליש של המהלך מפסיעה עדינה מלאה (סל"ד גבוה) לפסיעה גסה מרבית (סל"ד נמוך), אין השפעה לכוח הקפיץ, והמשקולות הן שמספקות את כוח התפעול במלואו.

עקב הגדלת המהלך הזוויתי של המשקולות, והשיפוע של זיזי המשקולות, פעולת ההחזרה של הקפיץ נדרש ב 20° מדחף. בפסיעה עדינה, המשקולות קרובות לציר הסיבוב של הטבור מאשר במצב של פסיעה עדינה במדחף שני מצבים (טווח פסיעה של עשר מעלות). כתוצאה מכך, לאותו הסל"ד, הכוח הצנטריפוגלי על משקולות 20° נמוך יותר. נדרשות משקולות כבדות יותר, או כוח תפעול נוסף, בכדי להשיג שינוי הפסיעה. עדיף להשתמש בכוח נוסף של מכלול הקפיץ המחזיר מאשר להוסיף משקולות. עקב דרישות התכנון של טווח מדחף 20° פסיעה, לחץ שמן המנוע הרגיל אינו מספיק להזיז את הלהבים למצב פסיעה עדינה, ונדרשת משאבת הגבר.

משאבת הגבר זו מוכללת במקבע הסל"ד. המשאבה מקבלת שמן ממערכת הסיכה של המנוע, ומעלה את הלחץ שלה עד ל – PSI 180-200. שסתום הקלה מובנה מווסת את הלחץ, ומחזיר את השמן למשאבה, למעט זה שנדרש להזיז את פסיעת המדחף, ופיצוי על נזילות. כמות קטנה בלבד של שמן נשאבת מהמנוע, לאור העובדה שהדרישה מהמדחף היא רק במעבר לפסיעה עדינה. מקבע הסל"ד מחליף את שסתום שלושת המצבים. הוא מווסת את הזרימה של השמן אל ומהצילינדר של המדחף, ובצורה אוטומטית משנה את הפסיעה לשמירת סל"ד קבוע.

הטייס יכול לקבוע את בקרת מהירות הסיבוב לכל סל"ד בתחום טווח התפעול. מקבע הסל"ד מזיז את פסיעת המדחף, כנדרש, לשמירת סל"ד זה. בתנאים אלו, הטייס אינו שולט בפסיעה ישירות.

בקרת מדחף - מקבע הסל"ד הינו מכשיר אוטומטי, אשר משתמשים בו ביחד עם המדחף, לשמירת סל"ד קבוע של המנוע, בכל מהירות שנבחרת על ידי הטייס. דבר זה נעשה על ידי שינוי זוויות הלהבים למצב החדש, מצב המטוס ומצב המצערת. הבקרה מאפשרת קביעה עצמאית של הספק המנוע ומהירותו. האמצעים שהיא משתמשת בהם, עם מדחף מסוים, מאפשרים למנוע לפתח כל הספק נבחר, בכל מהירות נבחרת. יתר על כן, ההספק הנבחר, והמהירות, נשמרים בכל מצבי הטיסה, עד אשר הטייס משנה את בקרת המקבע לסל"ד תפעול חדש. המגבלות היחידות בבקרה זו נכפות על ידי טווח המקבע, והמעצורים המכאניים, במשקולות המדחף. במצבי דרישה לזווית להבים קטנה או גדולה יותר, שאפשריים במגבלת המדחף עצמו, המקבע, למרות שמנסה להחזיק את הסל"ד קבוע, אינו מסוגל לשנותם, כיוון שהלהבים מנועים מזווית גבוהה או נמוכה, על ידי עוצרי המשקולות. במצבים אלו, המדחף יפעל כמדחף פסיעה קבועה, והמצערת ולחץ הסעפת ישלטו בסל"ד.

המקבע הינו יחידה עצמאית אשר תפקידה היחיד הוא לווסת את זרימת השמן אל ומהמדחף. לאור העובדה שמשרעת זוויות הלהבים לדגם זה של מדחף מבוקר תלויה במצב הצילינדר, אשר בתורו תלוי בנפח השמן בצילינדר, נראה שהמנגנון אשר מאפשר בצורה אוטומטית את זרימת השמן בלחץ לצילינדר המדחף, וניקוז השמן מהצילינדר במחזור מהיר, יאפשר ללהבים לקבל מספר בלתי מוגבל של מצבי זווית.

ההספק משתנה עם הסל"ד ולחץ הסעפת. הסל"ד מבוקר על ידי המקבע, בתחום המגבלות שהוזכר למעלה; לחץ הסעפת מבוקר על ידי המצערת.

כיוון שהמקבע שולט על סל"ד המנוע, השימוש בטווח גדול יותר, בין מגבלות הזוויות המזעריות והמרביות של להבי המדחף, אפשרי; עקב כך, ניתן להשיג הספק גדול יותר להמראה והספק להנמכה. במדחף שני מצבים, זווית הלהב המזערית חייבת להיות גדולה מספיק למניעת מהירות יתר של המנוע במהלך ההמראה והטיפוס; זווית הלהב המירבית חייבת להיות כזו שתאפשר שיט במצבים ייחודיים של סל"ד ולחץ סעפת בגובה. הגורמים המגבילים את טווח זווית הלהב למדחף מהירות קבועה הם: במקרה של כשלון המנגנון, הזווית המזערית חייבת להיות גדולה מספיק לאפשר המשך טיסה, ללא מהירות יתר של המנוע; הזווית המירבית חייבת להיות קטנה מספיק לאפשר טיסה ללא הגדלת לחץ הסעפת, מעבר למגבלות יצרן המנוע. זווית הלהב הנמוכה ביותר מאפשרת מאפייני המראה טובים יותר, כיוון שהיא מרשה לפתח הספק מנוע מלא, מספיק מוקדם בהמראה. זווית הלהב המירבית מאפשרת הקטנת הספק בהנמכה, ללא מהירות יתר של המנוע.

המקבע הינו מכלול עצמאי, מורכב על אחד מתושבות חטיבת אביזרי המנוע או על תושבת מיוחדת בחרטום המנוע. הנעת היחידה על ידי המנוע נעשית ביחס תמסורת מתאים, בכדי לוודא שטווח הפעולה חופף את טווח סל"ד המנוע. משאבת הגבר גלגלי שיניים מוכללת ביחידה. המשאבה לוקחת שמן ממערכת סיכת המנוע, ומגדילה את הלחץ שלו ל – PSI 180-200. לחץ השמן מווסת על ידי שסתום הקלה, שדרכו השמן, שאינו נדרש למעשה לשינוי זווית המדחף, מוחזר לקו הכניסה של המשאבה. כמות קטנה בלבד של שמן נשאבת ממערכת המנוע, הואיל והמדחף דורש שמן רק כאשר הוא עובר לזווית נמוכה יותר, או עקב נזילות. פעולת הבקרה מושגת על ידי כוחות flyball הפועל כנגד קפיץ. מידוד השמן אל ומצילינדר המדחף מותנה ברמת האיזון הקיימת בין כוחות אלו.

שמן מנוע נכנס ליחידת המקבע דרך בסיסה, ומובל לצד הלחץ הנמוך של משאבת ההגבר. כאשר השמן עובר דרך המשאבה, הלחץ עולה ל – PSI 180-200. מצד הלחץ הגבוה של המשאבה, השמן מובל דרך שסתום ההקלה לתוך ציר ההנעה החלול, בפתחים הממוקמים בקטע העליון של הציר. באם לחץ שמן זה יורשה להמשיך דרך פתחי הציר ולמדחף, או שהוא יוחזר דרך שסתום ההקלה למשאבת השמן, תלוי במצב שסתום הניהוג ביחס לפתחים. המצב של שסתום הניהוג תלוי ביחס בין הכוח הצנטריפוגלי המיוצר על ידי ה – flyball לכוח הפועל על ידי כיווץ הקפיץ. במצב טיסה יציב תיאורטי, שני כוחות אלו מתאזנים ושסתום הניהוג מכסה את פתחי המדחף בציר ההנעה. המצב המאוזן הזה יופרע על ידי שינוי מצב המצערת, אם הגובה או מצב המטוס משתנים, או אם הטייס רוצה מהירות מנוע שונה ומשנה את מיקום ידית בקרת הפסיעה בתא. כל אי איזון בכוחות של ה – flyball והקפיץ, יאפשרו לאחד מהכוחות לגבור על השני. דבר זה יגרום לשסתום הניהוג

לפתוח את פתחי המדחף בציר ההנעה, או למצב שיאפשר לשמן בלחץ גבוה בציר לזרום לצילינדר המדחף, או למצב אשר יאפשר לשמן בצילינדר המדחף לחזור לעוקת המנוע.

תפעול – לפני התנעת מנוע המצויד במדחף פסיעה משתנה, בקרת המדחף תמוקם במצב פסיעה גסה. לאחר ההתנעה, המנוע יורץ לפחות דקה אחת במצב זה. (הערת המתרגם: במטוסים בעלי פסיעה משתנה בימנו אנו, ההתנעה וההסעה לעמדת ההמראה מתבצעים בפסיעה עדינה מירבית, העברה למשך זמן קצר לפסיעה גסה מתבצעת במסגרת בדיקות המנוע לפני ההמראה).

בקרת המדחף תועבר למצב פסיעה עדינה לחימום. החימום חייב להתבצע בסל"ד נדרש ובטמפרטורה מוגדרת כפי שמצוין בהוראות התפעול לדגם המנוע.

בקרת המדחף בתא תמוקם בפסיעה עדינה להמראה וטיפוס. ככל שהמטוס מגביר מהירות מאפס למהירות הטיסה, סל"ד המנוע יגדל, עד שיגיע למגבלת הסל"ד הגבוהה. מנקודה זו והלאה, הסל"ד יהיה קבוע על ידי פעולת הבקרה של היחידה. מיד לאחר ההמראה, יש להקטין את לחץ הסעפת והסל"ד. התהליך הלוגי הינו להקטין את לחץ הסעפת תחילה ולאחר מכן את הסל"ד. כל תנועות המצערת ובקרת המדחף בתא יעשו באיטיות.

כאשר הסל"ד הובא למצבו הרצוי לטיסה ישרה ואופקית רגילה, הוא יוחזק קבוע על ידי המקבע. כל שינוי בסל"ד השיט או לחץ הסעפת, נעשים תחילה על ידי ויסות של בקרת המדחף לערך החדש, ולאחר מכן לחץ הסעפת. דבר זה נכון במיוחד במטוס רב מנועי. כאשר המדחפים הובאו לסינכרוניזציה, ניתן לשנות את לחץ הסעפת ללא גרימת שינוי בסל"ד.

באם המקבע פועל בצורה משביעת רצון, הוא יאפשר הקטנת ההספק ללא מהירות יתר של המנוע. היחידה מפצה על הגדלת מהירות האוויר, בהנמכה, על ידי הגדלת זוויות הלהב של המדחף. אם ההנמכה מהירה מדי, או נעשית מגובה רב, מגבלת זווית הלהב אינה מספיקה בכדי לשמור על סל"ד קבוע. כאשר זה קורה, הסל"ד מגיב לכל שינוי במצב המצערת.

בגישה לנחיתה, כאשר לחץ הסעפת ומהירות האוויר קטנים, הסל"ד נשמר קבוע על ידי המקבע, והמדחף נע לזווית להב עדינה. כאשר מצבי לחץ סעפת ומהירות אוויר דורשים זווית להב שווה למעצורי זווית מזערית במשקולות, הלהבים יגיעו לעוצרי הזווית המזערית בכדי לשמור על סל"ד קבוע, פעולת המקבע לא תוכל לגרום להקטנת הזווית.

יש טייסים שחושבים שיהיה זה מומלץ לקבוע את בקרת המקבע לסל"ד מירבי, במהלך הגישה לנחיתה, על מנת לקבל הספק מלא זמין למקרה חרום. אם בקרת המקבע תוצב לסל"ד גבוה זה מוקדם בגישה, כאשר הלהבים טרם הגיעו לעוצרי זווית מזערית, הסל"ד יגדל מעבר למגבלות הבטיחות. אם בקרת המקבע אינה מווסתת לסל"ד ההמראה, עד לכמעט סיום הגישה, הלהבים יגיעו לעוצרי הזווית המזערית, ויהיה שינוי קטן בלבד, אם בכלל, בסל"ד. במקרה חירום, ניתן להזיז גם את המצערת וגם את בקרת המדחף למצבי המראה. מרבית הטייסים מעדיפים להרגיש את המטוס מגיב מיידית, כאשר הם מאיצים את המצערת במהלך הגישה לנחיתה. ניתן להשיג זאת על ידי ביצוע הגישה בהספק נמוך, ובקרת המקבע קרוב לסל"ד השיט.

למרות שהמקבע מגיב במהירות לכל שינוי בקביעת המצערת, האצה פתאומית וחריפה תגרום למהירות יתר רגעית של המנוע, עד אשר הלהבים יווסתו לספיגת תוספת ההספק. אם יתרחש מצב חירום הדורש הספק מלא במהלך הגישה, הקידום הפתאומי של המצערת תגרום מהירות יתר רגעית של המנוע, מעבר לסל"ד שאליו ווסת המקבע. הגדלת מהירות מנוע זמנית זו מהווה רזרבת הספק לחירום.

על מנת למנוע חשיפה של בוכנת המדחף לשיתוך בזמן שהמדחף אינו פועל, בקרת המדחף תועבר לפסיעה גסה לפני כיבוי המנוע.

כללי

התקדמות מהירה בשיפור הדלקים, הגדיל בצורה ניכרת את ההספק של מנועי מטוסים. הבעיה של שימוש בהספק זה, לאורך תקופת זמן, ברמה גבוהה של אמינות, מוטלת על המתפעל. המתפעל חייב להיות בעל ידע מעמיק בתפעול של בקורות המנועים השונות, וחייב להיות מסוגל לתרגם את החיווי של מכשירי המנוע. תפעול מנועים מגודשים בגבהים נמוכים ללא גרימת נזק חמור למנוע, עקב דטונציה וחימום יתר, הופכת את הבעיה לקשה יותר.

הגורם החשוב ביותר שיש לזכור כאשר מתפעלים מנועי מטוס, הינו שאסור להרשות להם לחרוג מטמפרטורות הבטיחות המרביות. טמפרטורות אלו, כפי שמצוינות על ידי המכשירים בתא הטייס, נתונות לבקרה על ידי מנופי המצערת, תערובת, מקרן או תריסי חיפוי ובקרת חימום אוויר מאייד.

השיקול בחשיבות שמירת טמפרטורות מנוע מתאימות, על ידי השימוש בבקורות השונות, מהווה תשומת לב מרכזית בין מספר גורמים אחרים, המשפיעים על טמפרטורות המנוע. גורמים אחרים אלו הם תנאים אטמוספריים, סוג הדלק, סוג השמן, ובמנועים מקוררי נוזלים, אספקת נוזל הקירור.

גורמי טמפרטורת תפעול בטוחה במנועים מקוררי אוויר – טמפרטורות פעולה של מנוע מקורר אוויר מוצגות על ידי מד טמפרטורת ראש צילינדר או בסיס צילינדר, מד טמפרטורת שמן ומד טמפרטורת אוויר מאייד. כל החיוויים נפרדים; אולם, יש קשר ביניהם, והם משפיעים זה על זה ברמה זו או אחרת תחת מצבים שונים. היות וחיווי טמפרטורת ראש או בסיס הצילינדר הוא הקריטי ביותר והמהיר ביותר, הוא נלקח כקריטריון. גורמים חשובים שיש לקחתם בשיקול מתוארים בסעיפים הבאים.

הטמפרטורות האטמוספיריות השוררות משפיעות ישירות על טמפרטורות המנוע; לפיכך, טמפרטורות התפעול הנורמאליות בקיץ גבוהות יותר מאשר בחורף.

מצב בקרת המצערת, כפי שמוצג על ידי מד לחץ הסעפת ומד הסל"ד של המנוע, משפיע על שיעור ייצור החום, עקב רמת המהירות של אירועי השריפה. לפיכך, קידום המצערת מגדיל את טמפרטורות המנוע.

בקרת התערובת, למעט השימוש עקב שינוי הגובה, מחלישה את עוצמת התערובת כאשר מועברת למצב תערובת ענייה. השפעתה על טמפרטורת המנוע ניתנת להיקבע, במידה מסוימת, על ידי השפעתה על סל"ד המנוע, כפי שמוצג על ידי מד הסל"ד, במקרה של מדחף פסיעה קבועה. טמפרטורות מנוע גדלות כאשר מצב המצערת נשאר ללא שינוי וידית התערובת מוזזת למצב שגורם להספק וסל"ד מרביים. דבר זה נגרם עקב הגדלת מהירות אירועי השריפה, אשר בתורם מגדילים את שיעור החום המופק. בקידום נוסף של ידית התערובת ממצב סל"ד מירבי לכיוון מצב תערובת ענייה, מורגשת הגדלה בהפסד סל"ד או הספק. הדבר נגרם כיוון שתערובת ענייה מאיטה את שיעור השריפה, המלווה באובדן חום גבוה לצילינדרים, ומגדילה את טמפרטורות המנוע. מנועים המצוידים במדחפים אוטומטיים, מחייבים שימוש במכשיר אבחון דלק למיקום נכון של ידית התערובת.

השימוש בדלק נחות מוביל בדרך כלל לדטונציה, הקטנה בשיעור השריפה, וכו', הגורמים להגדלת טמפרטורות המנוע.

בקרת תריסי מקרן השמן משנה את שיעור הזרימה של מעבר האוויר דרך אזור ליבת המקרן. לפיכך, זרימת האוויר המבוקרת משפיעה על טמפרטורת השמן, כפי שמוצג על ידי מד טמפרטורת השמן. סגירת התריס מגדילה את טמפרטורת השמן, אשר נוטה להגדיל את טמפרטורת פעולת המנוע. עליית טמפרטורת השמן, עקב אספקה בלתי מתאימה של שמן נוטה גם היא להגדיל את טמפרטורות המנוע.

למרות שהשימוש הנחוץ בחימום אוויר המאייד מסייע לאידי התערובת, ולמניעת היווצרות קרח במאייד במצבים אטמוספריים מסוימים, יש להבין שהשימוש נוטה גם להגדיל את טמפרטורות המנוע.

גורמי טמפרטורת תפעול בטוחה במנועים מקוררי נוזל – טמפרטורות פעולה של מנוע מקורר נוזל מוצגות על ידי מד טמפרטורת נוזל הקירור ומד טמפרטורת השמן. כפי שנאמר קודם ביחס למנועים מקוררי אוויר, לחיוויים אלו יש קשר, למרות שהם נפרדים. מד טמפרטורת נוזל הקירור הינו הקריטי ביותר ובעל החיווי המהיר ביותר לטמפרטורות המנוע, ומסיבה זו הוא נלקח כקריטריון. כמו במקרה של מנועים מקוררי אוויר, השימוש בדלק נחות, טמפרטורות אטמוספיריות גבוהות, תערובות עניות, לחצי סעפת גבוהים וסל"ד גבוה, נוטים להגדיל את טמפרטורות הפעולה של המנוע.

כאשר בקרת מדחם הגידוש מופעלת, תפעול נאות של הווסת האוטומטי של המדחם ימנע לחצי סעפת חריגים, בתפעול למצערת מלאה; כאשר נתקלים בקשיים של חימום יתר, יש לנתק ידנית את פעולת מדחם הגידוש.

תריסי מקרן נוזל הקירור ומקרן השמן משנים את שיעור הזרימה של האוויר דרך המקרנים; לפיכך, סגירת התריסים מגדילה את טמפרטורות נוזל הקירור והשמן, אשר נוטים להגדיל את טמפרטורות המנוע. אספקה לקויה של נוזל קירור או שמן נוטים גם הם להגדיל את טמפרטורות הפעולה.

השפעות יחסיות של הבקרות – ניתן לקבל את התפיסה הכללית של ההשפעות היחסיות של הבקרות השונות על טמפרטורות המנוע על ידי לימוד הטבלה הבאה, המבוססת על ההנחה שהמנוע מתופעל בטווח שבין הספק שיוט נמוך להספק מלא.

בקרה	מ -	ל -
תערובת	עשירה	ענייה
סל"ד ומצערות	נמוך	גבוה
חימום אוויר מאייד	קר	חם
חיפוי או תריס מקרן נוזל קירור	פתוח	סגור
טמפרטורות אטמוספריות	קר	חם
תריס מקרן שמן	פתוח	סגור

לבקרת התערובת יש את ההשפעה הגדולה ביותר, ולבקרת תריס מקרן השמן את הנמוכה ביותר, על טמפרטורות הפעולה של המנוע, בהנחה שכל שאר התנאים הם נורמאליים. הזזת מנוף המצערות משנה את מהירות המנוע, הספק המנוע וצריכת הדלק, כפי שמצוין על מד הסל"ד, מחוון לחץ סעפת ומחוון כמות דלק.

חיווי סל"ד המנוע יכול להשתנות על ידי שימוש במדחף פסיעה משתנה; לפיכך, חיווי מד לחץ הסעפת הוא הגורם אשר קובע את מיקום המצערות, בתנאי שלא חורגים מהסל"ד המותר האפשרי. אם מבצעים טיפוס חד מגבהים נמוכים, מכל סיבה שהיא, כאשר המדחף במצב פסיעה גסה, ניתן לתפעל את המנוע במהירות מנוע בטוחה אולם עם לחץ סעפת לא בטוח, שיגרום לטמפרטורות פעולה גבוהות ומסוכנות. מצד שני, ניתן לתפעל מהירות מנוע מעל המותר המירבי, אולם עם לחץ סעפת בטוח, במהלך ההנמכה מגבהים גבוהים. מצב זה של תפעול המנוע מאפשר טמפרטורות פעולה נמוכות של המנוע. קיימת סכנה אפשרית לעומס מסוכן על גל הארכובה והטלטלים, ויש להימנע ממצב זה, למעט בחירום.

הואיל ומחוון לחץ הסעפת מציין את התפתחות ההספק של המנוע, או השיעור שבו מופק החום בצילינדרים, ברור שחיווי לחץ הסעפת חייב לקטון כאשר המנוע מחומם יתר. מבצעים זאת על ידי החזרת מנוף המצערות לאחור.

כמות הדלק הנצרכת על ידי המנוע משתנה עם ההספק. לדוגמה, כמות הדלק הנצרכת בהספק מלא הינה פעמיים וחצי הכמות הנצרכת במחצית ההספק. בהספק מלא יש להשתמש בתערובת עשירה למניעת חימום יתר של המנוע; בהספק מופחת ניתן להשתמש בתערובת ענייה ולחסוך דלק. בכדי לבצע תמרונים מסוימים, יתכן ויידרש לפתוח ולסגור את המצערות במהירות. האצה והאטה פתאומיים מקטינים את חיי ואמינות המנוע, ויש לזכור עובדה זו.

בקרת תערובת – בכדי לאפשר שינויים בדלק, תנאים אטמוספריים ומשתני תפעול אחרים, המאייד מכונן לאספקת תערובת עשירה יותר מזו הדרושה להספק מלא. שימוש מושכל של בקרת התערובת חשוב ביותר לשמירת תפעול בטוח וחסכוני של המנוע. אין להשתמש בבקרת התערובת ללא הבנה מלאה של השפעותיה על תפעול המנוע, והידע של התנאים הכלליים שבהם פועל המנוע, במיוחד מאפייני הדלק שבשימוש. ניתן להרוס מנוע בכמה דקות על ידי שימוש בלתי מתאים בבקרת התערובת. תערובת ענייה מדי תגרום לחימום יתר של המנוע, שיגרום לתפיסת טבעות הבוכנה ולשריפת הבוכנות והשסתומים.

הזזת ידית בקרת התערובת, ממצב עשיר מלא למצב עני יותר, תעלה את סל"ד המנוע. הנקודה בה סל"ד מירבי זה מובחן לראשונה מכונה "הספק מיטבי עשיר". המשך העברת הידית למצב עני תשמור את הסל"ד בערכו המירבי בתנועה ניכרת של הידית, עד אשר הזזה נוספת של הידית תגרום לאובדן סל"ד. הנקודה בה הסל"ד מתחיל לקטון שוב, מערך הסל"ד המירבי, מכונה "הספק מיטבי עני". למצב ידיות מצערות ותערובת נתון, התערובת תהפוך לעשירה עם הגובה. ולהפך, בהנמכה התערובת הופכת לענייה, באם אין שינוי במצב ידיות התערובת והמצערות. לפיכך, בקרת התערובת חייבת להשתנות לכל 1,000 רגל שינוי בגובה.

להמראה, טיפוס או נחיתה, בגובה פני הים או בקרבתו, בקרת התערובת חייבת להיות במצב עשיר מלא. בשדות גבוהים, בקרת התערובת חייבת להיות ממוקמת קרוב למצב עשיר מלא, ככל האפשר, והעברה לתערובת ענייה תעשה רק להשגת פעולה חלקה של המנוע. בלחצי סעפת גבוהים, בקרת התערובת חייבת להיקבע בעשיר מלא, למרות שבגבהים חריגים מותר לגרום לתערובת ענייה רק עבור הפעלה חלקה של המנוע. מתחת לבערך 80% של סל"ד המנוע, מותר ומומלץ בדרך כלל להשתמש בבקרת התערובת כמכשיר חיסכון. ניתן ליצור תערובת ענייה למצב "הספק מיטבי עני" או נמוך מכך, מותנה בסוג המנוע. יש לתת תשומת לב גדולה כאשר משתמשים בבקרת התערובת כמכשיר חיסכון בדלק, כיוון שתערובות עניות נוטות להגדיל את טמפרטורות הפעולה של המנוע.

עם הופעת מחווי יחס דלק-אוויר בתא הטייס, השימוש הנאות בבקרת התערובת הפך לפשוט מאד. מכשיר זה ביטל את הצורך בניחושים לקבלת תערובות רצויות לכל מצב פעולה של המנוע. יש בקרות תערובת אוטומטיות שונות, אשר מבטלות את השימוש בבקרה ידנית, למעט כמכשיר רשות בהחלט המתפעל או בחירום.

במנועים המצוידים במדחף פסיעה משתנה, ברור שמכלול המדחף חייב להיות במצב קבוע בכדי לווסת את בקרת התערובת כאשר אין מחווי יחס דלק-אוויר.

התקררות – מצבי התקררות הינם מקור קבוע לדאגות בתפעול מטוס. היווצרות קרח על מבנה המטוס גלוי לעינו של המתפעל, המשתמש באמצעים זמינים להסרתו או למניעתו. במערכת הכוח היווצרות קרח הינה סוג שונה לחלוטין, ונחשבת למסוכנת יותר מזה הנוצר על מבנה המטוס. סוג זה של היווצרות קרח מצמצם את מעברי הדלק והאוויר של המאייד, והוא מסוכן יותר כיוון שאינו נראה, שכיח ויכול להתרחש בכל זמן של השנה. הוא גורם לאובדן הספק, ואם לא מוסר, כשלון מנוע. מצבי התקררות קיצוניים יכולים לגרום לחוסר אפשרות בתפעול המצנרת. חשוב שהמתפעל יזהה התקררות מאייד, וימנע אותה מיידית על ידי מספר אמצעים. מניעת היווצרות הקרחה בשלביה המוקדמים חיונית, כיוון שסביר להניח שכשלון מנוע יופיע לאחר אובדן חמור של הספק.

בדרך כלל ניתן לזהות היווצרות קרח על ידי אובדן הדרגתי של סל"ד ולחץ סעפת, ללא שינוי במצב המצנרת או טיסה. הזמן המסוכן ביותר להתקררות מאייד מתרחשת כנראה במהלך המראה, או בזמן טיסה בגבהים נמוכים, כאשר גורם הזמן מונע ניסיון להסרה. לרוע המזל, התקררות פתאומית בהמראה יכולה לגרום לכישלון מנוע; לפיכך, יש לנקוט באמצעי זהירות למניעת היווצרותה. למתפעל יש אמצעי בקרה לעמידה בכל מצב בו התקררות מאייד מתפתחת. הבנה מקיפה של היווצרות קרח, וישום מעשי של ידע זה, חיוניים, אם מנוע אמור להיות מתופעל כאשר קיימים מצבי התקררות מאייד.

כאשר דלק נינק מנחירי המאייד, נוצרת התאיידות עם נפילת טמפרטורה של 20°F עד 60°F . נפילת הטמפרטורה הינה תוצאה של נפילת לחץ וחום ההתאיידות (החום החיוני לשינוי הדלק מנוזל לאדים). החום הדרוש לשינוי זה נלקח בהכרח מהאוויר הנכנס. הוכח, שבאם החום הנספג בהתאיידות מקטין את הטמפרטורה של האוויר והדלק מתחת ל 32°F , ייווצר קרח, כאשר קיימים אדי מים. דבר זה יכול להתרחש כאשר הטמפרטורה האטמוספירית הינה 85°F עם לחות בצורת אדים או נוזל. הלחות קופאת על דפנות מערכת היניקה, צוואר הוונטורי ושסתומי הפרפר. התקררות יכולה להתרחש בימים בהירים, כאשר הטמפרטורה האטמוספירית הינה בין 30° ל 75°F , אם הלחות היחסית גבוהה מאד. עננים רוויים תמיד באדי מים, ולפיכך הם מקור מצוין להתקררות מאייד, כאשר הטמפרטורה הינה מתחת ל 85°F . כאשר הטמפרטורה האטמוספירית מתחת ל 20°F , הסבירות להתקררות תהיה קלה, עקב הכמות הקטנה של אדי מים הקיימים בטמפרטורה כזו.

מחממי אוויר מאייד מותקנים בסעפות אוויר המנוע כאמצעים לשמירת האוויר הנכנס בטמפרטורה גבוהה מספיק בכדי למנוע נפילת טמפרטורה מתחת ל 32°F במאייד ובסעפת היניקה, כאשר קיימים אדי מים. ברור שאמצעים כאלו ימנעו או יקטינו את היווצרות הקרח. מחממי אוויר המאייד נשלטים על ידי מתפעל המנוע, אשר חייב להשתמש בבקרת החום בצורה מושכלת למניעת היווצרות הקרח, ובאותו הזמן למנוע חום אוויר מאייד גבוה, אשר עלול לגרום לדטונציה כאשר התפעול קרוב למגבלות ההספק של המנוע.

מחממי אוויר מאייד רגישים מאד בהעלאת טמפרטורת אוויר המאייד. בטיסה ישרה, במצב מצנרת ללא שינוי, הזזת ידית בקרת חום המאייד מצוינת כמעט מיידית על מד לחץ הסעפת. אם נוצר קרח במאייד, ובקרת החום מוזזת למצב חימום, מד לחץ הסעפת יראה הגדלה בלחץ הסעפת, כיוון שהקרח הוסר. אם אין קרח, וידית החימום מוזזת למצב חם, מד לחץ הסעפת יראה אובדן לחץ סעפת, כיוון שהחום הבלתי נחוץ הנוסף לאוויר הנכנס הוריד את תפוקת ההספק.

מספר התקנות מצוידות רק במד חום טמפרטורת אוויר מאייד, בעוד אחרים יכולים להיות מצוידים במד חום תערובת. מכשירים אלו מפשטים מאד את קביעת בקרת חימום האוויר לתפעול נאות. במנועים המצוידים במד חום טמפרטורת האוויר, בקרת המחמם חייבת להיות מווסתת לשמירת טמפרטורה של 85°F עד 95°F . כאשר משתמשים במד חום תערובת, בקרת המחמם חייבת להיות מווסתת לשמירת טמפרטורה של 35°F עד 40°F .

במנועים מקוררי נוזלים לא משתמשים במחמם אוויר מאייד, כיוון שנוזל הקירור זורם דרך הסעפות, ומספק חום, בחלקו למניעת היווצרות הקרחה. במנועים בהם מותקן מדחס גידוש, החום מהאוויר הדחוס מסייע במניעת כניסת אוויר קר מדי לתוך המאייד. למרות עזרי מניעת הקרחה שנמנו למעלה, יש אפשרות שמחממי אוויר למאייד מבוקרים ידנית יכללו במנועים מקוררי אוויר עקב קשיי התקררות שנתקלים בהם.

בהמשך לנזכר למעלה, ההמלצות הבאות תסייענה למתפעל המנוע במצבים המובילים להיווצרות קרח במאייד:

1. השתמש בלפחות 75% הספק לשמירת מספיק חום מאייד. דבר זה מושג ב – 92% של סל"ד מצערת מלאה.
 2. חפש גובה רצוי.
 3. אם נוצר קרח, מקם את מחמם אוויר המאייד (אם בשימוש) לחימום, עד אשר הקרח הוסר, ולאחר מכן המשך חימום מספיק למניעת היווצרות קרח נוספת.
 4. שמור את בקרת התערובת במצב עשיר למצב הספק מיטבי.
 5. במנועים מקוררי אוויר, שמור על טמפרטורת צילינדר נורמאלית מירבית.
 6. במנועים מקוררי נוזלים, שמור את הנוזל בטמפרטורות נורמאליות מרביות והימנע, אם אפשר, תפעול במצבי התקרחות חמורים.
 7. אם מתרחשת הקרחה (הסימפטומים לכך הם אובדן הספק חמור בתערובת הספק מיטבי או היתקעות המצערת), יש להעביר את התערובת לענייה, לפתוח את המצערת ולספק חימום מלא לאוויר הנכנס. במקרים אחדים, תערובת ענייה עד להתרחשות אש חוזרת תשחרר את הקרח במאייד ותגרום לניקוי מעברי הכניסה. זהו תהליך מסוכן ואין להשתמש בו למעט במקרי חירום.
 8. במנועים מגודשים, שמור את מרחס הגידוש במצב פעל.
- למאיידים, בהם משתמשים בכניסת אוויר מגח, יש נטייה לתערובת עשירה כאשר מחמם אוויר המאייד בפעולה. באופן טבעי, תצרוכת הדלק תגדל כשהשפעת המגח הופסקה. כאשר שסתום המחמם במצב חימום מלא, תופעת המגח מוסרת כמעט לחלוטין, והאוויר נכנס בכוח הכבידה. הפעלת מחמם אוויר המאייד במצבים אלו מחייבת תפעול סימולטני של בקרת התערובת, אם רוצים לשמור על יחס אוויר-דלק.
- מערכת דלק ותצרוכת דלק** – כישלונות מערכת דלק ונחיתות אונס במהלך פעולת מטוס יתרחשו, ללא ספק, באם לצוות האוויר לא יהיה ידע בפעולת מערכת הדלק. פעולה נכונה של בקרת הדלק הינה בעלת חשיבות עליונה. תצרוכת דלק של מנועים שונים, והבדלים בפעולת סוגים שונים של מערכות דלק, דורשים היכרות מעמיקה עם כל סוג של מטוס. דיאגרמות מערכת הדלק זמינות לכל סוג מטוס, וחייבות להילמד ביסודיות. הרעיון הכללי של כמות הדלק הנצרכת במצבי מצערת שונים הוצג למעלה. עובדות נוספות מתוארות להלן. המידע החשוב אשר חייב להיות למפעיל, בקשר למערכת הדלק, לפני ניסיון להפעיל כל מטוס הינו כדלקמן:
- a. כמות הדלק הנצרכת על ידי המנוע לשעה בסל"ד שונה, במיוחד שיט ומצערת מלאה.
 - b. קיבולת כל מיכל דלק במטוס.
 - c. מיקום כל שסתום דלק בתא הטייס והתפקוד שלו ביחס לפעולת המנוע.
 - d. מיקום מחווי הדלק.
 - e. אמצעי זהירות מיוחדים.
- אספקת דלק רזרבי במטוס מתבצעת על ידי צינור זקוף במיכל הראשי, או על ידי שימוש במיכלים רזרביים או מיכלי עזר; תפקודם חייב להיבדק ביחד עם תפקוד כל מצבי ברזי הדלק האחרים. ההמראה חייבת להתבצע תמיד כאשר ברז הדלק על מצב רזרבי (הערות המתרגם: תהליך זה לא מקובל אצלנו) כאשר אספקת הדלק הרזרבי מתבצעת על ידי השימוש בצינור זקוף במיכל הראשי, ונדרש להמריא עם כמות דלק מופחתת; כלומר, אם כמות הדלק במיכל מתקרב למצב רזרבי, או אם יש אי ודאות לגבי כמות הדלק. בנחיתה, אם גובה הדלק מתקרב לגובה הרזרבה, השסתום חייב להיות ממוקם על רזרבי. אספקת הדלק הרזרבי במיכל הראשי מספיקה בדרך כלל לפעולת מנוע במצערת מלאה ל – 20 דקות; יש להשיג מידע לגבי נקודה זו לסוג המטוס לפני הטיסה.
- אין לאפשר לאף מיכל להתייבש לחלוטין בשום מצב, במיוחד במקרה שהמטוס מצויד במערכת הזנה בכובד. במערכת בלחץ, השינוי ממיכל אחד לשני חייב להיעשות בחיווי הראשון של אובדן לחץ דלק או ריטוט מחוג המכשיר. שינוי זה של החלפת מקור הדלק חייב להיעשות כדלקמן:
- בעוד המנוע פועל, שמור את המטוס בטיסה ישרה, מצב המצערת ללא שינוי, התערובת עשירה, והחלף את ברז הדלק למצב הרצוי. אם יש סימן להקטנת הלחץ לאחר השינוי במיכל, יש להפעיל את המשאבה באיטיות, בשום מצב אין לאפשר ללחץ הדלק לחרוג מהתחום המוגדר בסוג המאייד שבשימוש.
- אם המנוע נעצר עקב חוסר דלק, התהליך הכללי זהה לזה שצוין למעלה, עם תוספת של הורדת אף לשמירת מהירות טיסה, אשר חייבת להיות בהדרגתיות ככל האפשר, עד אשר מגיעים למצב דאיה. בשום מצב לאחר החלפת מיכל הדלק אין להוריד אף בפראות כאשר משתמשים במשאבת היד. (למיטב ידיעתי כל המטוסים היום מצוידים במשאבת דלק חשמלית).
- מטוסים דו מנועיים, המצוידים במערכות הזנת דלק צולבת, חייבים להיות מתופעלים כאשר ההזנה הצולבת במצב חדל בעת ההתנעה. בטיסה, ההזנה הצולבת חייבת להיות במצב פעל, לעיתים יש להעבירה למצב חדל רגעית בזמנים מסוימים במהלך הטיסה לבדיקת תפקוד נאות של כל משאבת דלק מנוע בודדת. במקרה של אש, יש לעצור אספקת דלק, ההזנה הצולבת חייבת להיות מועברת לחדל.

התנעה

הבעיה של התנעת מנועי מטוסים אינה קשה, למעט במזג אוויר קר, בתנאי שעוקבים אחרי התהליכים הנאותים במיקום הבקורות ובשימוש בתיחול ובמתנע.

מנועים בעלי מאיידים מטיפוס מצוף – בהתנעת מנוע מטוס המצויד במאייד מטיפוס מצוף, בקרת התערובת צריכה להיות במצב עשיר והמצערת במצב סיבובי סרק. סובב את ברז הדלק לפעל. שאיבת דלק בעזרת המצערת, במאיידים המצוידים במשאבות האצה, כסיוע להתנעה, מהווה סכנת אש, ויש להימנע מכך. פעל כדלהלן:

1. במטוסים המצוידים במדפי חיפוי מנוע, מקם את בקרת המדף למצב פתוח מלא, למעט במזג אוויר קר מאד.
2. ודא שבקרת חימום המאייד במצב קר, אחרת אש חוזרת אפשרית במהלך ההתנעה תגרום לנזק בשסתום בקרת החימום.
3. אם המנוע קר, הפעל תיחול של ארבע עד שש פעימות של משאבת התיחול. מספר הפעימות הנדרש תלוי באורך קו התיחול והטמפרטורה של המנוע. פעולה נכונה של התיחול דורשת שהטובלן ימשך החוצה באיטיות, בכדי לוודא שהדלק נכנס במלואו למשאבה, ואז דחוף במהירות בכדי לפרק את הדלק בצילינדרים. הטובלן חייב להיות במצב חדל לאחר התיחול. כאשר מניעים מנוע חם, אין זה מומלץ להשתמש בתיחול, ויתכן ויהיה צורך לפתוח את המצערת, לפחות שליש ממהלכה. תיחול יתר יכול לגרום לאובדן דחיסה, וחשיפת חלקים לבלאי מיותר, עקב סיכה לא נאותה. ככלל, מנועים בעלי צילינדרים בעלי קוטר גדול דורשים יותר תיחול מאשר אלו בעלי קוטר קטן יותר.
4. יש להניע את המנוע מיד לאחר התיחול.

חימום מנוע

הנחיות ביחס לתהליכי חימום מנוע יכולים להשתנות במידת מה בהתאם לסוגי המנועים השונים; את הפירוט יש להשיג מספרי התפעול הייעודיים. מספר חוקים כלליים ישימים לכל סוגי המנועים ומוצגים להלן. במהלך זמן החימום, אסור לאפשר לסל"ד המנוע לחרוג מחצי הסל"ד המירבי המותר על הקרקע עד לאחר קבלת לפחות שני שליש, ללא ריטוטים, של לחץ שמן מנוע למלוא ההספק לסוג המנוע המסוים, ומחווין טמפרטורת השמן מציין עליה ברורה של טמפרטורת השמן, דבר המראה זרימה נאותה של השמן. כאשר משיגים תנאים אלו, ניתן להעלות את סל"ד המנוע לבדיקת תפקודו התקין בסל"ד גבוה יותר, למעט הסל"ד הקרקעי המירבי המותר על הקרקע, שלא יחרוג מ- 20 עד 30 שניות. במספר מקרים, ניתן לראות ריטוט מהיר של לחץ השמן על המחווין בטווח רחב במהלך ההתנעה והחימום. ריטוטים אלו יירגעו בהדרגה ככל שהשמן מתחמם, עד אשר המחוג מתייצב. לעתים מרכיבים צמצם בקו הלחץ למחווין. דבר זה מאפשר קריאה מדויקת ומהירה של לחץ השמן. בכדי לוודא סיכה נאותה מיד לאחר ההתנעה של מנוע מצויד במדחף פסיעה משתנה, אין לשנות את בקרת המדחף למצב פסיעה עדינה עד אשר מקבלים לחץ שמן יציב. לאחר התנעה קרה, דבר זה דורש כשלושים שניות של תפעול מנוע בסל"ד סרק.

בדיקת מנוע

באופן כללי, בדיקת המנוע מורכבת מבדיקת פעולה תקינה של מערכת הכוח וצידוד העזר (כולל צידוד נלווה) בשמיעה, בדיקת ראייה, וחיווי של כל מכשירי המנוע, בקורות, מפסקים וכו', לאחר החימום. בדיקות ראייה לאספקה תקינה של דלק, שמן ונוזל קירור, ולאבטחה נאותה של החיפוי, מכסי דלק, תנועה חופשית של בקורות וכו', צריכים להיעשות לפני בדיקת המנוע.

בעוד המנוע פועל, תקלות של מערכת הכוח והצידוד הנלווה מתגלות על ידי חיוויים בלתי רגילים של המכשירים והבקורות המותקנים בתא. לאחר שהמנוע הותנע וחומם כראוי, נבדקים מספר פריטים. פריטים אלו ותהליכי הבדיקה המתייחסים לכל אחד מהם מתוארים בסעיפים הבאים.

הצתה – בעת שהמנוע פועל בסל"ד סרק, סובב את המפסק רגעית למצב חדל. אם המנוע אינו מפסיק את ההצתה לחלוטין, יש תקלה במפסק או בחיבורי ההארכה שלו. לבדיקה זו המנוע אינו חייב להיות חם, והמשך שבו שני המפסקים הם במצב חדל להיות קצר.

כל אימת שמנוע המטוס פועל רק על מגנטו אחד, כמו בבדיקת הצתה לאחר ההתנעה, המצערת חייבת להיות ממוקמת בלחץ סעפת של שיוט בכדי למנוע דטונציה כאשר רק מצת אחד פועל. אם המטוס אינו מצויד במחווני לחץ סעפת, או כאשר לא ידוע לחץ סעפת לשיוט, הבדיקה שלמעלה תבוצע ב- 85% מהסל"ד כאשר

המצערת פתוחה. הבדיקה מתייחסת למטוס בעל מדחפי פסיעה קבועה ומשתנה. במטוס המצויד במדחף פסיעה משתנה כל הבדיקות צריכות להתבצע בסל"ד גבוה של מצב המראה. צפוי שהמנוע יאבד בין 40 ל – 100 סל"ד כאשר פועל על מגנטו אחד בלבד.

מד זרם – כאשר המפסק הראשי סגור והמנוע פועל במהירות היוצרת חיווי מתח של 14.25 וולט, מחוון מד הזרם חייב לציין את הטעינה ואסור שירטט יתר על המידה.

מד מתח – כאשר המפסק הראשי במצב **חדל** וסל"ד המנוע בערך 1,500 סל"ד, מד המתח חייב להראות 14.25 וולט. אסור שהמחווג ירטט יתר על המידה. חיווי מתח נמוך, וכמו כן חיווי אי טעינה על מד הזרם, מראים תקלה משמעותית במחולל או במערכת הבקרה. מתח מחולל חריג יגרום לנזק משמעותי לכל הציוד החשמלי, במיוחד ציוד רדיו; לפיכך, חיוני במיוחד שווסת המתח יווסת לספק מתח של 14.25 וולט.

מחווני לחץ דלק – מחווני לחץ דלק חייבים לציין את הלחץ הספציפי. אסור שהמחווג ירטט יתר על המידה. יש לזכור שלמיקום מיכלי הדלק יש השפעה על חיווי לחצי הדלק.

מחווני לחץ שמן – מחוון לחץ שמן חייב לציין לחצים בין לחץ שמן מזערי ומירבי המוגדרים למנוע המסוים. המחווג חייב לציין לחץ יציב בסל"ד קבוע ואסור שירטט יתר על המידה.

מד כמות דלק – יש לבדוק את המיכלים לתכולתם, ומחווני הכמות לפעולה נאותה.

מדי חום – מדי החום של נוזל הקירור והשמן חייבים לציין עליה בטמפרטורה, החל מהזמן שהמנוע הותנע. אסור שהמחווגים ירטטו.

מד סל"ד – חיווי מד סל"ד, עם או בלי לחץ סעפת, יכול להיבדק על בסיס הניסיון לאותו סוג מנוע, כאשר פועל בתנאים רגילים. אסור שהמחווגים יראו ריטוט מהיר או רחב.

ברזי דלק – אסור שברזי הדלק יסתובבו בקושי. מחוג הברז חייב להתאים לכיתוב על החוגה, כאשר מרגישים את הקליק כשהברז מגיע למצבו הנכון.

מדחפי פסיעה משתנה – פעולת מדחף פסיעה משתנה יכול להיבדק על ידי צפייה במד הסל"ד, כאשר מפעילים את בקרת המדחף.

המראה וטיפוס

ההמראה והטיפוס מאפשרים למטוס לעזוב את הקרקע ולטפס. בכדי להשיג את מירב היעילות של המדחף ומערכת הכוח, מדחפי פסיעה משתנה חייבים להיות מווסתים למצבם הנדרש בצורה אוטומטית, או על ידי העברת הבקר למצב המראה וטיפוס (פסיעה עדינה). במנועים מגודשים, כחוק כללי, למצב המראה וטיפוס מותר לחץ סעפת גבוה יותר מאשר לטיסה מתחת לגבהים מסוימים. אין להשתמש בלחצי סעפת גבוהים אלו לכל המראה או טיפוס, כיוון שהם כופים עומסים גבוהים וחריגים מאד על המנוע; ניתן להשתמש בהם במקרי חירום, כגון המראה ממסלול קצר עם מטען כבד וכו'. בשום מקרה אין לחרוג מסל"ד מירבי בהמראה או טיפוס.

מנוע מטוס נתון בדרך כלל לטמפרטורות הפעולה הגבוהות ביותר במהלך בדיקות מנוע, המראה וטיפוס. טמפרטורות גבוהות חריגות ניתנות לשליטה ברמה גבוהה על ידי בחינה של מכשירי המנוע, ושימוש באמצעים הזמינים לבקרה, כגון פתיחת מדפי החיפוי ותריסי המקרן, מצב קר של אוויר המאייד ומצב תערובת עשירה של בקרת התערובת.

שיוט

מנוע מטוס פועל במשך מרבית חייו בתוך מגבלות מסוימות המצוינות על ידי מגבלת סל"ד שיוט ביחס לתפוקת ההספק. פעולת השיוט ניתנת לחלוקה לשלושה שלבים: שיוט נמוך, שיוט רצוי ושיוט מירבי. כל שלב של פעולת השיוט תידון בנפרד. מדחפים רבי מצבים, או שני מצבים, נמצאים בשיוט בפסיעה גסה או סל"ד נמוך, להשגת יעילות מירבית של המדחף ומערכת הכוח. יש למקם את המצערת למצב שתספק לחץ סעפת רצוי, כאשר מקבע הסל"ד מווסת לסל"ד הרצוי.

שיוט מהירות נמוכה הינו מצב פעולת המנוע המוגדר כמהירות המנוע המותרת שתאפשר מהירות מטוס סבירה בצריכת דלק מזערית לשעה. באופן כללי, שיוט מהירות נמוכה, המחושב כאחוז סל"ד ממצערת מלאה, הינו בסביבות 65 עד 70 אחוז מסל"ד מצערת מלאה. בתוך מגבלות אלו, המנוע פועל ב – 22 עד 25 אינטש של לחץ סעפת ובקרת התערובת במצב ענייה להספק מיטבי, או ענייה אם ניתן, למנוע הספציפי. שיוט מהירות נמוכה מומלץ לטווחים ארוכים וכמות דלק נתונה. השימוש בשיוט מהירות נמוכה יכול להיפגע על ידי מזג אוויר קר או בגבהים בהם יש התאידות דלק גרועה, אפילו אם משתמשים במחמם מאייד. כאשר קיימים מצבי הקרחת מאייד, שיוט מהירות נמוכה יכול לא לספק מספיק חום לאוויר המאייד למניעת או הסרת היווצרות קרח במאייד.

שיוט רצוי הוא מצב פעולת מנוע, שיכול להיות מוגדר כמהירות המנוע המאפשרת שימוש בהספק אמין של המנוע לביצוע יעיל של המטוס ביחד עם צריכת דלק חסכונית לשעת פעולה של המנוע. שיוט רצוי הינו במידת מה בתחום של 70 עד 80 אחוז מסל"ד מצערת מלאה. במגבלות הנ"ל, מנועים מגודשים פועלים בדרך כלל בין 26 ל – 28 אינטש לחץ סעפת, ובקרת התערובת ממוקמת בטוח הספק מיטבי או הספק עשיר מיטבי. שיוט רצוי מומלץ כאשר נדרשים ביצועי מנוע טובים עם צריכת דלק נמוכה. שיוט רצוי מחייב תשומת לב הגדולה ביותר של המתפעלים, כיוון שהוא בדרך כלל המהירות שבה המנוע יפעל במהלך מרבית חיי הפעולה שלו. שימוש מושכל בבקרת התערובת ותפעול נכון של מחמם אוויר המאייד, תריסי המקרן ומדפי החיפוי, יסייעו רבות בהשגת המטרה של שיוט רצוי, שהם אמינות מנוע, ביצועים טובים ותצרוכת דלק חסכונית.

שיוט מהירות גבוהה הוא מצב פעולת המנוע אשר יכול להיות מוגדר כמהירות המנוע המאפשרת שימוש בהספק גבוה ואמין, הנותן ביצועי מטוס מרביים וממושכים עם צריכת דלק סבירה לשעה של פעולת מנוע. שיוט מהירות גבוהה הוא במידת מה בתחום של 80 עד 87.5 אחוז מסל"ד מצערת מלאה. בתחום המגבלות הנ"ל, מנוע מגודש פועל בדרך כלל ב – 29 עד 31 אינטש לחץ סעפת, עם בקרת תערובת ממוקמת במצב של חצי הטווח בין עשירה מיטבית ועשירה מלאה. אם רצויים ביצועי מנוע גבוהים, ללא התחשבות מיוחדת בצריכת הדלק, שיוט מהירות גבוהה מומלץ. במצבי התקרחות מאייד חמורים, שיוט מהירות גבוהה רצוי לאספקת חום למחמם אוויר המאייד, המספיק להסרת או מניעת היווצרות קרח.

מותר מירבי

תפעול מותר מירבי (או מתמשך) הוא המצב של פעולת המנוע אשר יכולה להיות מוגדרת כמהירות המנוע המאפשרת את השימוש בהספק המלא של המנוע המסוים לשימוש מתמשך. באופן רגיל יש להימנע ממצב פעולה זה. יש להשתמש בו רק כהספק שמור לחירום. באופן כללי, תפעול מותר מירבי הינו מצב המצערת הנותן 87.5 עד 100 אחוז סל"ד של מצערת מלאה, תלוי במנוע. בתוך מגבלות אלו, מנוע מגודש פועל באופן רגיל מעל 31 אינטש לחץ סעפת, ומוגבל בהתאם לכל מנוע. בקרת התערובת חייבת להיות ממוקמת במצב עשיר מלא בכל הגבהים, מתחת לגובה הקריטי של המנוע. יש להעביר לתערובת ענייה רק למצב פעולה חלקה מעל הגובה הקריטי, כלומר רק כבקרת גובה.

ניתן לצפות לצריכת דלק חריגה כאשר פועלים במצבים אלו. בשום מקרה אין לחרוג מסל"ד מותר מירבי ולחץ סעפת. במהלך מצב זה של פעולת המנוע, טמפרטורות גבוהות של המנוע הינן נורמאליות; חייבים להקטין את מהירות המנוע וההספק, כאשר מתקרבים או מגיעים למגבלות מותר מירבי.

גובה רב

מטוסים מודרניים מצוידים בדרך כלל במערכות כוח מגודשות. משתמשים במדחס גידוש חיצוני או פנימי, ובמספר מקרים משתמשים בשניהם. המידע הבא מתייחס לתפעול בגובה רב.

הקונספציה של רמת הגידוש, במנועים המשלבים דגמים פנימיים, ניתנת להשגה ביחס לשיעור הגובה של המנוע. ככל ששיעור הגובה גבוה יותר, כך גבוהה רמת הגידוש. מתייחסים לשיעור הגובה כגובה הקריטי של מדחס גידוש המנוע. לכל מנוע מגבלות תפעול מסוימות, אשר יש להקפיד עליהם בכדי לוודא פעולה בטוחה. אין לחרוג ממגבלת מצב המצערת, או לחץ הסעפת, מתחת לגובה קריטי זה. מעל הגובה הקריטי, יש לבחון את מגבלת המצערת או לחץ הסעפת; פעולה במצערת מלאה מותרת בדרך כלל, בתנאי שטמפרטורות המנוע המרביות והסל"ד המירבי אינם חורגים. מעל הגובה הקריטי, בקרת התערובת חייבת להיות במצב פעולה שיחליק כל נטייה לפעולה גסה עקב תערובת עשירה מדי, כלומר שימוש כבקרת גובה, ובתנאים מסוימים כמכשיר חסכון. מעל הגובה הקריטי של המנוע, יש לקדם את המצערת לכיוון פתיחה מלא לשמירת לחצי סעפת עד אשר תקרת המטוס מושגת.

מנועים המצוידים בשיעורי גידוש נבחרים חייבים להיות מתופעלים בהתאם להנחיות שמפורסמות למנוע המסוים. הבחירה של שיעור הגידוש מבוקרת על ידי לחץ הסעפת הרצוי; כלומר, יש להשתמש בשיעור מפוח נמוך, כל עוד לחץ הסעפת הנדרש יכול להישמר, למרות שהמצערת קרובה למצב מלא.

במנועים המשלבים מדחס גידוש חיצוני, הווסת האוטומטי מווסת לשמירת 31 אינטש בקירוב של לחץ סעפת במצערת מלאה, מגובה פני הים עד ל – 23,000 רגל בקירוב. מעל לחצי סעפת לשיוט או מהירות, בקרת התערובת חייבת להיות במצב עשיר מלא. מתחת או בלחץ סעפת לשיוט או מהירות, בקרת התערובת חייבת להיות ממוקמת במצב הספק מיטבי עני או במצב הספק מיטבי עשיר, כמוגדר לסוג המנוע המסוים. מעל הגובה הקריטי של מדחס הגידוש (23,000 רגל), יש להשתמש בבקרת התערובת כבקרת גובה.

עקב הטמפרטורות הנמוכות במיוחד, השוררות בגובה סביב 25,000 רגל או מעלה, יכולים להתעורר מספר קשיים בשמירת טמפרטורות השמן, אלא אם ינקטו צעדים מוקדמים לטיסה בגובה רב. אם מצפים לטיסה בגובה רב, מומלץ שקווי השמן החיצוניים יכוסו בבידוד מתאים. בדרך כלל אין מצבי התקרחות מאייד מעל גובה

15,000 רגל, עקב אי המצאות לחות בגבהים כאלו; במצבים מסוימים, השימוש במחמם אוויר המאייד בגובה רב יסיע לאידידו הדלק.

נחיתה

פעולת נחיתה כוללת את הפעולה של המנוע כהכנה לנחיתה ולאחר הנחיתה. במנועים המשלבים מדחפים בעלי פסיעה משתנה, הנחיתה תהיה במדחפים בפסיעה עדינה, או מצב סל"ד גבוה, בכדי להיות מוכנים להמראה מיידי.

בקרת התערובת חייבת להיות ממוקמת תמיד במצב עשיר מלא לפני הנחיתה, במיוחד כאשר מתחילים את ההנמכה מגובה רב.

לפני נחיתה, אחרי שיט ממושך בגובה רב, סל"ד המנוע וההספק חייבים להיות מוקטנים באיטיות, עם ההנמכה ההדרגתית של המטוס. הקטנה פתאומית של מהירות המנוע, והנמכה מהירה, נוטים לגרום לקירור מהיר של חלקי מנוע מסוימים ולכישלון מצתים ודאי. כמו כן מומלץ שמחמם אוויר המאייד יהיה בשימוש בגלישה הארוכה בהספק נמוך, כאשר קיימים מצבי התקררות. בגלישה ממושכת מהגובה במצרת סגורה, מומלץ לפתוח את המצרת מדי פעם, בכדי לנקות את הצילינדרים מגזי הפליטה אשר מצטברים בתאי השריפה, ולהסיר את השמן המצטבר על אלקטרודות המצתים.

בהנמכה מגובה רב, יש לתת תשומת לב מיוחדת למד לחץ סעפת, למרות שמהירות המנוע מוקטנת בהדרגה, כיוון שחייבים להימנע מלחץ סעפת חריג עם סל"ד נמוך.

מטוסים בעלי אספקת דלק רזרבית, על ידי שימוש במוט זקוף במיכל הראשי, חייבים לנחות עם ברז דלק במצב רזרבי כל אימת שכמות הדלק מתקרבת לגובה הרזרבי. אמצעי זהירות זה מבטיח אספקה של דלק למשאבת הדלק במקרה שתידרש המראה מיידי.

לאחר נחיתה, תהליכי פעולת המנוע תלויים במשתנים מסוימים כדלהלן:

- a. מטוס בעל מנועים עם הספק גבוה הנוחת ביום חם, או כאשר טמפרטורות המנוע והשמן הם מעל לרגיל, יש להסיעו במהירות לנקודת החנייה ולכבות מנוע במהירות. במקרה ונדרשת המראה מיידי לאחר נחיתה בתנאים אלו, יש להימנע מתפעול מנוע ממושך על הקרקע. בכדי לסייע בשמירת טמפרטורות נורמאליות, מדפי החיפוי ותריסי מקרן שמן חייבים להיות פתוחים; בקרת התערובת חייבת להיות במצב עשיר מלא, וחימום המאייד חייב להיות במצב קר.
- b. במזג אוויר קר, כאשר טמפרטורות המנוע והשמן הם מתחת לרגיל, מותר תפעול מנוע ממושך על הקרקע, בתנאי שנשמרות טמפרטורות מנוע רגילות ומהירות המנוע מועלית לפרקים לניקוי הצילינדרים מהצטברות גזי פליטה ושמן.

עצירה

משתמשים במספר שיטות לכיבוי מנועי מטוס. יש לעקוב אחר ההנחיות המיוחדות למנוע המסוים. התהליך הכללי המתואר להלן מתייחס לכיבוי כל מנועי מטוסים, והוא יפחית את הזמן הנדרש לכיבוי, יקטין את האש החוזרת וימנע חימום יתר של מנועים מקוררי אוויר.

התהליך הבא מתייחס למטוסים בעלי מעצורים ומערכת דלק מוזנת בלחץ, מנועים בעלי ביצועים נמוכים שאינם רגישים להצתה מאוחרת כאשר מעבירים את מפסק ההצתה לחלל, ומנועים שאינם מצוידים בהתקן חדל במאייד או מזרקי דלק:

- a. הצב את בקרת התערובת לעשירה.
- b. סגור את ברז הדלק.
- c. הזז את המצרת למצב סרק למספר דקות, כאשר מדפי החיפוי ותריסי המקרנים פתוחים לחלוטין, עד אשר לחץ הדלק ירד לאפס.
- d. פתח את המצרת לאט עד אשר המנוע מגדיל מהירות בערך 200 סל"ד ואז סגור מפסק הצתה. כאשר מפסק ההצתה בחלל, דחוף את המצרת באיטיות לפתיחה מלאה.
- e. עם עצירת המנוע, העבר את ברז הדלק למצב ON והפעל את משאבת הדלק עד אשר חייוי לחץ על מד לחץ הדלק מוודא שקווי הדלק והמאייד מלאים בדלק.
- f. השאר את המצרת במצב פתוח לאחר כיבוי המנוע; דבר זה יפחית את הסבירות להתנעה מקרית, כאשר המנוע חם.

במטוסים בעלי אספקת דלק בכובד (ללא מד לחץ), מותר לעצור את המנוע על ידי סגירת מפסק ההצתה לאחר מספר דקות של פעולת המנוע בסרק.

באם מנוע בעל ביצועים גבוהים רגיש להצתה מאוחרת, כאשר מכבים אותו על ידי מפסק ההצתה, מותר להפעיל את המנוע בערך 200 סל"ד מעל מהירות הסרק הרגילה עד אשר אספקת הדלק נגמרת, כאשר ברז

הדלק סגור לפני כיבוי מפסק ההצתה. במנועים אלו, יתכן ויידרשו סיבובי סרק גבוהים יותר מהרגיל למניעת התחממות המנוע וכישלון המצתים. מומלץ שמשך הפעולה בסרק יהיה קצר ככול האפשר.

מנועים המצוידים במאיידים בעלי יכולת ניתוק (idle cut-off) יכובו על ידי שימוש בניתוק, כאשר ברז הדלק פתוח. מנועים כאלו המצוידים במאיידים אחרים מאשר לחץ גבוה, יכובו על ידי הפעלת המנוע בערך 200 סל"ד מעל מהירות הסרק הרגילה ואז משיכת ידית התערובת למצב תערובת ענייה. דבר זה מפעיל את שסתום הניתוק, וגורם למנוע להיכבות בבת אחת. במנועים המצוידים במאיידים בעלי לחץ גבוה, יש להזיז את המצערת למצב פתוח בזמן שידית התערובת מוזזת למצב ענייה, או ניתוק, בכדי להסיר את כמות הדלק להאצה ממערכת היניקה. בכל מקרה, מפסק ההצתה יועבר למצב חדל לאחר שהמנוע נעצר. כיוון שהמאייד אינו מנוקז, ידית התערובת חייב להישאר במצב ענייה, או ניתוק, כאמצעי זהירות למניעת התנעה מקרית.

מנוע המצויד במזרקי דלק יתופעל למשך זמן קצר בסיבובי סרק לקירור המנוע. לאחר מכן יש למשוך ידית התערובת לתערובת ענייה ללא תזוזת ידית המצערת. אין לנתק את ההצתה עד אשר המנוע נעצר. ברז הדלק לא ייסגר אף פעם, למעט בחירום. דבר זה ישמור על הקווים, מהמזרק לנחירים, מלאים בדלק וימנע התנעות סרק.

מדחפי פסיעה משתנה יושארו בפסיעה גסה לפני כיבוי המנוע.

יש לבחון בזהירות את טמפרטורות המנוע במהלך כיבוי המנוע, ויש לנקוט כל אמצעי זהירות למניעת חריגת טמפרטורות מהמגבלות המוגדרות.