

# 噴氣式發動機原理

Н. В. ИНОЗЕМЦЕВ 著

蘭寶樑、彭永齡、張仲陞 合譯  
周懋運、閻秀成、羅雪

劉世興 校訂

高等教育出版社

中等專業學校教學用書



# 噴氣式發動機原理

H. B. 伊諾捷木切夫著

閻寶楨、彭永齡、張仲陞 合譯  
周懋運、閻秀成、羅 雪  
劉世興校訂

高等教育出版社

本書係根據蘇聯陸海空軍協會出版社 (Издательство всесоюзного добровольного общества содействия армии, авиации и флоту) 出版的伊諾捷木切夫 (Н. В. Иноземцев) 著的“噴氣式發動機原理” (Основы теории реактивных двигателей) 1952 年版譯出。原書淺顯地論述有關噴氣式發動機的一些基本理論問題, 是為航空初級技術人員及對航空有興趣者編寫的讀物, 也可作為航空中等技術學校的參考書。

本書係由閻寶樑、彭永齡、張仲陞、周懋運、閻秀成、羅雪等同志翻譯。由劉世興同志校訂。

## 噴 氣 式 發 動 機 原 理

書號155(譯149)

伊 諾 捷 木 切 夫 著  
閻 寶 樑 等 譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版

北 京 琉 璃 廠 一 七 〇 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

新 華 書 店 總 經 售

京 華 印 書 局 印 刷

北 京 南 新 華 街 甲 三 七 號

開本850×1092—1/28 印張75/14 字數 158,000

一九五四年十一月北京第一版 印數 1—2,500

一九五四年十一月北京第一次印刷 定價¥ 12.000

## 序

目前我國(指蘇聯, 以下同)的噴氣式發動機在航空中已具有實用意義。其應用的範圍逐年地擴大, 將有更多的蘇聯航空工作人員從事於噴氣式發動機的工作。

噴氣式發動機既然這樣迅速地應用於航空上, 就須出版有關噴氣式發動機方面的書籍, 特別是能够闡明這方面的原理而且易於被蘇聯航空初級技術工作人員所理解的噴氣式發動機理論方面的書籍。

爲此目的, 本書擴大地敘述了著者在 1950 年向蘇聯航空協會工作人員所講授的有關噴氣式發動機方面的理論問題。

本書的目的要求著者在敘述噴氣式發動機的理論時, 儘量減少說明噴氣式發動機過程的數學式子, 而特別着重講解那些與工作過程有關的物理現象及發動機的特性。

本書共分七章。第一章是研究航空發動機的類型及其分類, 並敘述決定發動機性能的主要參數。第二章是關於火箭發動機的原理, 該章內敘述固體燃料火箭發動機及液體燃料火箭發動機工作的基本知識。第三章是敘述衝壓式空氣噴氣發動機的工作原理及特性。第四章是關於渦輪噴氣式發動機的原理。該章內敘述渦輪噴氣式發動機的工作過程, 研究壓縮機的增壓比, 及燃氣在渦輪前的溫度與推力和單位燃料消耗率的關係, 並敘述發動機的速度特性和高空特性以及渦輪噴氣式發動機的調整原理。第五章是研究渦輪螺旋槳發動機及其工作特點與性能。第六章是關於內外函渦輪噴氣式發動機的工作原理及特性。

最後第七章是敘述在各種飛行速度下燃氣渦輪發動機的單位拉力及單位燃料消耗率的比較。

本書不能儘量詳述有關噴氣式發動機理論方面的全部問題, 因爲

本書的目的僅是敘述基本的和最普通的一些有關噴氣式發動機的理論問題。

著者在編寫本書時，採用了列在本書末尾的參考書。本書主要是根據 H.B. 伊諾捷木切夫及 B.C. 朱也夫於 1949 年在國防工業出版社所出版的“航空燃氣渦輪發動機”編著而成。

B.C. 朱也夫同志在校閱本書草稿時，提供了許多寶貴的意見，著者謹向他致深深的謝意。

# 目 錄

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 序 .....                        | 1   |
| 緒 論 .....                      | 1   |
| 第一章 現代航空發動機的類型及決定其性質的參數 .....  | 15  |
| § 1. 航空發動機的分類 .....            | 15  |
| § 2. 噴氣式發動機的推力 .....           | 20  |
| § 3. 發動機的基本參數 .....            | 27  |
| 第二章 火箭發動機 .....                | 37  |
| § 4. 固體燃料火箭發動機 .....           | 37  |
| § 5. 液體燃料火箭發動機(ЖРД) .....      | 50  |
| 第三章 衝壓式空氣噴氣發動機(ПБПД) .....     | 63  |
| § 6. 衝壓式發動機的構造及其工作過程 .....     | 63  |
| § 7. 衝壓式發動機的動力壓縮過程及其損失 .....   | 67  |
| § 8. 衝壓式發動機的特性 .....           | 77  |
| 第四章 渦輪噴氣式發動機(ТРД) .....        | 89  |
| § 9. 渦輪噴氣式發動機的構造及其工作原理 .....   | 89  |
| § 10. 渦輪噴氣式發動機的工作過程 .....      | 92  |
| § 11. 渦輪噴氣式發動機的性能及其特性的評定 ..... | 122 |
| § 12. 渦輪噴氣式發動機的調節原理 .....      | 147 |
| § 13. 渦輪噴氣式發動機推力的增大 .....      | 159 |
| 第五章 渦輪螺旋槳發動機(ТВД) .....        | 164 |
| § 14. 渦輪螺旋槳發動機的構造及其工作過程 .....  | 164 |
| § 15. 渦輪螺旋槳發動機的性能及其特性的評定 ..... | 169 |
| 第六章 內外函渦輪噴氣式發動機(ДТРД) .....    | 182 |
| § 16. 內外函發動機的特點及其工作原理 .....    | 182 |

---

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| § 17. 內外函發動機的特性 .....        | 184 |
| 第七章 各種燃氣渦輪發動機單位參數的相互比較 ..... | 192 |
| 參考書目 .....                   | 197 |

# 噴氣式發動機原理

## 緒 論

噴氣式發動機的理論目前已成爲一門獨立的科學，是有系統地敘述蘇聯科學家們及專家們所研究的噴氣式發動機原理、特性及其調整。這些噴氣式發動機是包括下面所要研究的火箭發動機、衝壓式空氣噴氣發動機及燃氣渦輪發動機。

在敘述噴氣式發動機原理之前，我們先談談噴氣式發動機應用於航空中的原因，以及這些發動機的原理和構造的發展史。

在二次大戰以前，航空發動機的主要類型是活塞式汽油發動機。在航空中雖也用過壓燃式的活塞發動機，但並未普遍使用。

在二次大戰時期及戰後的幾年內，航空的蓬勃發展引起製造噴氣式發動機，並顯著地增加了飛機的飛行速度。

活塞式發動機螺旋槳動力裝置不能滿足高速飛機的全部要求，因而在高速航空中，以噴氣式發動機代替了活塞式發動機。

噴氣式發動機在航空上的應用引起了航空的技術革命，給航空的發展開闢了新的紀元。

由於噴氣式發動機的應用顯著地增加了飛行速度。如在1934年裝有活塞式發動機的紀錄機的最大速度是709公里/小時，1939年是755公里/小時，但到1945年裝有噴氣式發動機的飛機即已經創造了976公里/小時的速度紀錄，而在1948年達到1079公里/小時，這就是由於採用了噴氣式發動機而使飛行速度增加了324公里/小時。所以，第一在航空上利用噴氣式發動機就使飛行速度增加到40%以上。

噴氣式發動機迅速地得到廣泛的應用，目前已成為高速航空中航空發動機的主要類型。

在高速航空中，使用活塞式發動機的困難，而噴氣式發動機却如此迅速地發展及應用於航空中的主要原因是什麼呢？

爲了回答這個問題我們回想一下，按裝在普通飛機上（非噴氣式的）的活塞式發動機的功率是不受飛行速度的影響，也就是說，在所有的飛行速度下的功率是大致不變的。如果飛行速度在 800 公里/小時以下，認為螺旋槳的效率大致不變的話，則它的推進功率也是一個不受飛行速度影響的常數，可用下面公式求出：

$$N_T = N_e \cdot \eta_B = \frac{R \cdot V}{75},$$

式內  $N_T$ ——推進功率，以馬力計；

$N_e$ ——活塞式發動機的有效功率，以馬力計；

$\eta_B$ ——螺旋槳的效率；

$R$ ——拉力，以公斤計；

$V$ ——飛行速度，以公尺/秒計。

在這種情況下，活塞式發動機螺旋槳動力裝置的拉力是隨着飛行速度的增加而降低的。如圖 1 和圖 2 所示。

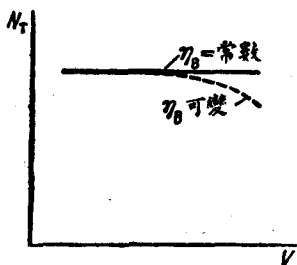


圖 1. 螺旋槳動力裝置的推進功率隨飛行速度變化的情況。

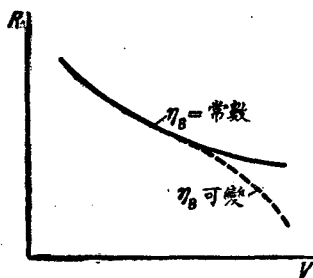


圖 2. 螺旋槳動力裝置的推力隨飛行速度變化的情況。

當螺旋槳的效率隨飛行速度的增加而降低時，推進功率也要跟着降低，所以拉力隨速度增加而降低的情形是很顯著的（如圖 1 和圖 2 的虛線部分所示）。

另一方面，大家都知道：飛機飛行時空氣的阻力是隨着飛行速度的增加而增大的，爲了克服這種阻力，在高速飛行時發動機應發出大的推力，因而也就應當有大的功率。

例如，爲了能在 1000 公里/小時飛行速度下獲得 3000 公斤的拉力（此數字接近於近代高速噴氣式飛機的數據），活塞式發動機應發出的功率爲：

$$N_e = \frac{R \cdot V}{75 \eta_B} = \frac{3000 \cdot 1000 \cdot 1000}{75 \cdot 0.75 \cdot 3600} = 15000 \text{ 馬力。}$$

但是，活塞式發動機要得到這樣大的功率就要製造得既重又大，甚至不能把它安裝在飛機上。

這就是裝有活塞式發動機的飛機過渡到高速度飛行時所遭遇到的主要困難。

但是，這種困難在應用噴氣式發動機時即可迎刃而解，因其產生推力的原理與活塞式發動機螺旋槳動力裝置不同。

我們先研究一下裝有活塞式發動機的飛機的拉力是怎樣產生的。

活塞式發動機使螺旋槳旋轉，螺旋槳槳葉以一定的力量將大量空氣向後排擠。

根據作用與反作用相等的定律，其反作用力將推動飛機前進。

這樣說來，飛機是由於螺旋槳排擠大量空氣的反作用力而運動的，所以這反作用力稱爲拉力。

活塞式發動機螺旋槳動力裝置的重要特徵是：飛機的動力裝置是由熱力機和推進器兩部分組成，前者是供給飛機飛行時所必需功的活塞式發動機，後者即依靠發動機的功率來產生拉力的螺旋槳。

由於在上述的動力裝置中，空氣不是被發動機本身所排擠，而是被

特殊的推進器所排擠，也就是說，使飛機運動的反作用力不是直接加在發動機上，而是加於推進器上，類似這種的航空動力裝置稱為“間接反作用式”的發動機。

噴氣式發動機與活塞式發動機螺旋槳動力裝置不同，它是“直接反作用式”的航空發動機。

在噴氣式發動機中，大量的燃氣都是直接被發動機所排出，因此反作用力是直接加在發動機上。所以噴氣式發動機就是直接反作用式的發動機，它不需要特殊的推進器。在這種情況下，發動機和推進器根本是一個東西。

衝壓式空氣噴氣發動機是噴氣式發動機中最簡單的一種。圖 3 是次音速的衝壓式空氣噴氣發動機的略圖。

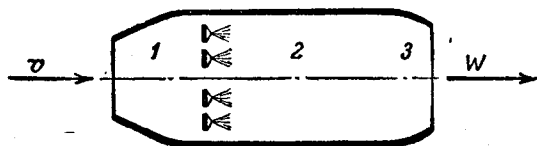


圖 3. 衝壓式空氣噴氣發動機的略圖：

1—衝壓管； 2—燃燒室； 3—尾噴管。

發動機本身是一個薄壁的金屬圓筒，其前部有一個擴散的進氣道——衝壓管，後部有一個收斂的尾噴管。

圓筒中部是燃燒室，在燃燒室內由噴油嘴供給燃料進行燃燒。

當飛行時，空氣從進氣口進入發動機，同時由於空氣的停滯，也就是由於發動機進口處空氣速度的降低，而增高了空氣的壓力。很明顯地，飛行的速度愈大，發動機中的空氣壓力就愈高。

在燃燒室內燃料向流入的空氣噴射，經過燃燒後所形成的高溫燃氣由發動機的尾噴管排於大氣中。因為由尾噴管排出的燃氣溫度比進入發動機的空氣溫度高得多，所以從發動機中所排出的燃氣速度  $w$  比進入發動機的空氣速度  $V$  大。

這樣一來，當空氣流經發動機的時候速度就增大了，因而產生了排出大量氣體（燃氣）的反作用，並形成推動發動機前進的反作用力。

由以上的敘述可以看出：反作用力是直接加在發動機上，此發動機也就是造成飛機運動所需用功的熱力機，同時又是產生推力的推進器。

這種發動機是“直接反作用式”發動機，又稱為噴氣式發動機。

因為在上面所研究的噴氣式發動機內，隨着飛行速度的增加，流經發動機的空氣量也隨着增加，也就是增加了被發動機所排出的空氣量。所以這種發動機的反作用力（推力）是隨着飛行速度的增加而增大的，因此發動機的推進功率也隨着飛行速度的增加而增大。如圖 4 和圖 5 所示。

如果研究一下其他類型的噴氣式發動機，例如研究火箭發動機及渦輪噴氣式發動機的工作的話，那麼以後便可看出：這些發動機的推力不像活塞式發動機螺旋槳動力裝置那樣隨着飛行速度的增加而減小。

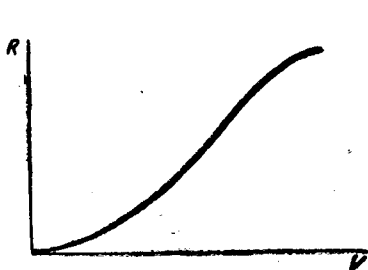


圖 4. 衝壓式空氣噴氣發動機的推力隨飛行速度變化的情況。

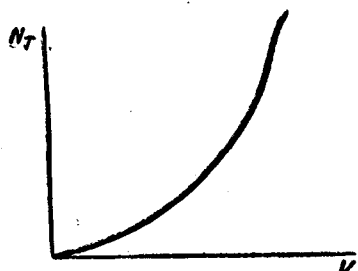


圖 5. 衝壓式空氣噴氣發動機的推進功率隨飛行速度變化的情況。

這就是噴氣式發動機與活塞式發動機螺旋槳動力裝置的主要區別。上述噴氣式發動機的特點，再加上其構造簡單，重量及尺寸較小，使其適合於高速飛行條件下的工作。

目前噴氣式發動機的主要缺點是燃料消耗率較大，也就是說它的經濟性比活塞式發動機差。

但是，應該注意到的：噴氣式發動機逐年都在改善着，它的經濟性也正在不斷地提高。此外，噴氣式發動機的經濟性是隨着飛行速度的增加而增高。因此可意料到不久的將來，噴氣式發動機在經濟性方面即可與活塞式發動機螺旋槳動力裝置相比擬，甚至要超過它。

目前噴氣式發動機，特別是渦輪噴氣式發動機，在航空上已得到廣泛的應用，成為現代高速飛機的航空發動機的主要類型。將來隨着飛行速度的增高，噴氣式發動機在航空上將起着更大的作用。

在我國（蘇聯）噴氣式發動機已得到巨大的發展。

我國的科學家、設計師、飛行員及工廠的工作者們在密切合作之下，正在努力地發展着航空噴氣式發動機的技術。他們創造着新的航空技術，鞏固着我國的國防力量，將蘇聯的科學和技術上的新成就用於國民經濟的各部門。將科學和技術用來服務於蘇聯共產黨領導下建設共產主義社會的蘇聯人民。

在社會主義社會的蘇聯，由於科學家們與工業部門的工作人員有了緊密合作，理論就能與實際相結合，蘇聯科學家及科學研究機關在理論上的探討與實驗工作，也就是為了解決工廠工作人員面前存在的實際問題。

俄羅斯的科學家們、專家們及發明家們對於發展噴氣式發動機及火箭發動機的技術方面起了卓越的作用，他們奠定了反作用運動的理論基礎，並首先研究出各種噴氣式發動機的構造，他們在這方面的工作大大地超過了國外的科學和技術。

在 19 世紀中葉，俄羅斯科學砲兵學校最偉大的代表人物 E. II. 康士坦丁諾夫的著作對於火箭技術的發展有着重大的意義。

康士坦丁諾夫除了研究軍用火箭實際應用之外，他還深刻地研究了火箭問題的理論，並將這一理論大大地向前推進一步。

康士坦丁諾夫的著作“關於軍用火箭”在俄羅斯及國外都得到很大的聲望，在很長的時期內成為火箭問題理論方面的主要著作。

偉大的俄羅斯科學家 H. E. 儒可夫斯基的著作奠定了噴氣式發動機的理論基礎。

H. E. 儒可夫斯基在 1882 年發表一篇“關於流體流入及流出的反作用”論文裏曾首先列出由運動物體內噴出流體的反作用力的公式。

以後，又在“關於流體流入與流出的反作用”(1886 年)和“利用噴水反作用力行船的理論”(1908 年)兩篇論文裏，H. E. 儒可夫斯基對於流體運動所產生的反作用力作了精密的研究，並且開始用公式計算水流的效率。

所以 H. E. 儒可夫斯基是第一個發明噴氣式發動機的基本理論問題，無疑地他也是噴氣式發動機理論的創始人。

著名的俄羅斯力學教授 И. B. 米什車耳斯基在 1897 年即從事火箭飛行重要理論的研究。

И. B. 米什車耳斯基首先確定燃氣的噴射速度、空氣的阻力、地心引力和燃料的貯量對於火箭的飛行速度和航程在理論上的關係。米什車耳斯基關於運動的反作用方法的著作在現在仍被認為世界文獻中優秀著作之一。

關於反作用運動理論的建立和火箭器械的發明，俄羅斯的科學家 and 發明家 К. Д. 契阿爾可夫斯基的功績是很大的，他是火箭飛行理論的創始人。在 1892 年契阿爾可夫斯基完成了在這方面的第一批著作。契阿爾可夫斯基在 1903 年所發表的“用噴氣機探索空間的研究”的論文是世界上第一篇關於用火箭式飛艇作宇宙飛行的科學著作。

契阿爾可夫斯基首先提出火箭飛行的科學理論，並論證了應用火箭器械作為行星間交通的可能性；他第一個研究使用液體燃料及液體氧作為混合燃料的液體燃料火箭發動機的設計，並指出相類似的噴氣式發動機在高空飛行時的優越性。

契阿爾可夫斯基在火箭飛行方面的著作達到了深奧的研究，並奠定了關於反作用運動的新科學的基礎。契阿爾可夫斯基的論文成為經

典的著作，並得到世界的聲望。

斯大林同志對於契阿爾可夫斯基在火箭技術方面的科學功績予以很高的評價。

斯大林同志稱契阿爾可夫斯基為“卓越的科學活動家”。

契阿爾可夫斯基不僅研究了與宇宙飛行有關的一些遙遠未來的問題，而且研究了目前航空發展中的一些問題。他曾作過這樣一句預言：“在螺旋槳飛機世紀之後，接之而來的應該是噴氣式飛機的世紀”。我們現在已經證實了卓越的俄羅斯科學家這一預言的正確性，但在當時講這一預言的時候，並未有一架噴氣式飛機飛向天空，並且當時在許多國家裏對於製造噴氣式飛機的概念，認為是一種烏托邦的想法。

在蘇聯政權的年代裏，給科學家們創造了一切有利於科學及實際工作的全部必要條件，契阿爾可夫斯基在火箭技術方面富有成果的事業才得到發展。這一時期內契阿爾可夫斯基創造了反作用運動方面的卓越著作，這些著作如：“噴氣式飛機”（1930年），“火箭飛機”（1930年）“半反作用式同溫層飛機”（1932年），“反作用運動”（1932年）及其他。契阿爾可夫斯基成為蘇聯火箭理論的權威者，成為大批蘇聯科學家們的思想鼓舞者，這些蘇聯科學家們是以自己的工作來保證蘇聯科學在火箭技術的發展上起着主導的作用。

蘇聯科學家並榮獲斯大林獎金的蘇聯科學院通訊院士 B. C. 斯鐵赤金教授對於空氣噴氣式發動機的理論有很大的貢獻。在 1929 年他所發表的“空氣噴氣式發動機的理論”一書是世界文獻中第一部有關這方面的科學著作，奠定了創造空氣噴氣式發動機的理論及其計算的基礎。其後，有關空氣噴氣式發動機理論方面的一切著作，也都是發揮着 B. C. 斯鐵赤金所提出的基本法則。所以 B. C. 斯鐵赤金堪稱為空氣噴氣式發動機近代理論的創始人。

蘇聯科學家 B. B. 烏瓦羅夫教授關於高溫燃氣渦輪的研究，渦輪葉片的計算及其形狀和冷卻問題的著作，對於現代空氣噴氣式發動機最

重要部分的航空燃氣渦輪的理論和計算方面有重大的意義。

蘇聯科學機關及卓越的蘇聯航空設計師們，如斯大林獎金榮獲者科學院士 A. A. 米古林，蘇聯科學院通訊院士 B. И. 克里莫夫，A. M. 留里克及其他等人的著作，對於現代航空發動機理論的發展具有特別重要的意義，現在他們的著作確定了航空發動機今後發展的前途。

在創造各種航空噴氣式發動機的結構略圖方面的主導地位應歸功於俄羅斯的科學家們和專家們。

目前有着實用意義的噴氣式發動機包括有固體燃料火箭發動機、液體燃料火箭發動機和空氣噴氣式發動機——即衝壓式、脈動式及燃氣渦輪發動機。燃氣渦輪發動機又可分為渦輪噴氣式發動機、渦輪螺旋槳發動機及內外函發動機。

以上所列舉的大部分噴氣式發動機的原理圖，都是由俄羅斯科學家們和專家們所提供和研究出來的，因此也就是俄羅斯人發明的。

很早以前人們就知道了火藥火箭的作用原理；在彼得大帝時，俄羅斯的技師們所研究出來的火藥火箭曾作為戰鬥的武器。

但是，利用火藥火箭作為航空發動機，用來產生飛行器的推力的原理，是在 19 世紀才第一次被研究出來的。

在研究這一問題中的優先權屬於俄羅斯的科學，這個優先權的獲得是與革命者——民意黨人 H. И. 克依巴勒契赤的名字分不開的，他在 1881 年因參與謀殺亞歷山大二世而被沙皇政府判處死刑。

他在牢獄中擬定了帶有火箭發動機的飛行器的設計，此設計應認為是世界上第一個可操縱的反作用飛行器。

克依巴勒契赤提議以火箭發動機作為飛行器的動力裝置，在此火箭發動機中，按作者的意見，應當採用壓縮成許多柱形棋子狀的慢性燃燒的火藥作為燃料。發動機內火藥燃燒時所形成的燃氣流的反作用力使飛行器飛行。

克依巴勒契赤被處死之後，他的設計曾在沙皇警察局的檔案保管

室內存放三十六年之久，在十月社會主義革命後才被發表出來。

克依巴勒契赤的思想在現代的火藥火箭發動機中得到了真正的實現。

但是，火藥火箭發動機未能作為主要的航空發動機，這是由於火藥火箭發動機的工作受到火藥燃燒時間很大限制的緣故。此外，這種發動機推力的調整是極其困難的。

不過目前火藥火箭在砲兵中已廣泛地被採用為反作用式的砲彈。在航空中火藥火箭發動機用作為起動裝置來幫助飛機及飛行器的起飛。

液體燃料火箭發動機同樣也是俄羅斯所發明的。

液體燃料火箭發動機也是根據固體燃料火箭發動機的同樣原理來工作的。

其中的區別只是在液體燃料火箭發動機中燃燒的燃料不是本身含有燃燒時所必需的氧的那種固體燃料(火藥)，而是液體燃料和液體氧化劑的混合物，此種混合物是用油泵或用壓縮的氣體不斷地將其輸向燃燒室。

因此，液體燃料火箭發動機的工作時間不像火藥火箭發動機那樣受到嚴格的限制，而是由飛機上的燃料和氧化劑的儲藏量來決定的。

此外，液體燃料火箭發動機能進行多次的起動，並能用變更混合物的消耗率的方式來調整推力。

在1903年契阿爾可夫斯基首先研究出液體燃料火箭發動機的設計。

契阿爾可夫斯基的發動機包括有現代液體燃料火箭發動機的全部主要部分：混合燃料壓力輸送機構，可冷卻的燃燒室，擴散的尾噴管。它是現代液體燃料火箭發動機的原型。

許多種類型的空氣噴氣式發動機都是屬於俄羅斯所發明的。創造空氣噴氣式發動機使飛行器飛行的概念，首先是在俄羅斯提出的。