

Буров А.В., доктор технических наук, профессор

Независимый исследователь

Россия, г. Санкт-Петербург

ОБ ОДНОМ НОВОМ ПОКАЗАТЕЛЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАКТИВНЫХ АППАРАТОВ

Аннотация. Статья посвящена поиску новых универсальных критериев эффективности реактивных аппаратов. Рассматривается один из возможных путей отыскания такого критерия, опирающийся на сопоставление полезной и затраченной работы при разгоне аппарата в открытом пространстве. Полученный результат может быть использован для сопоставления эффективности реактивных аппаратов, в том числе на этапе их проектирования.

Ключевые слова: критерий эффективности, ракетный двигатель, реактивный аппарат, удельный импульс, скорость истечения, формула Циолковского.

The paper is devoted to the search of the new universal criteria for the jet vehicles efficiency. One of the possible ways to establish such a criterion based on the comparison of the useful and expended work required for a vehicle acceleration in the open space is considered. The result obtained can be applied for the jet vehicles efficiency comparison, at the designing stage including.

Key words: efficiency criterion, rocket engine, jet vehicle, impulse specific, exhaust velocity, Tsiolkovsky equation.

В настоящее время наиболее распространенными показателями эффективности ракетного двигателя (РД) являются следующие:

- I – удельный импульс¹;
- v – скорость истечения газов из сопла РД².

Удельный импульс I определяется как отношение тяги F РД к расходу топлива (или рабочего тела) в секунду m : $I = \frac{F}{m}$. С другой стороны, на основании законов механики $F = m \cdot v$, откуда $I = \frac{F}{m} = \frac{m \cdot v}{m} = v$. Таким образом, в системе единиц СИ I и v численно совпадают и имеют размерность $\frac{м}{с}$.

Перечисленные выше показатели эффективности относятся непосредственно к РД, но не к реактивному аппарату в целом. Было бы желательно разработать такой критерий эффективности, который позволял бы сравнивать между собой реактивные аппараты с РД любого типа (на химическом топливе, ионные, с ядерной энергетической установкой, и т.д.). Для этого надо уяснить, в чем состоит основная цель работы РД. Естественно предположить, что такой целью при полете в свободном пространстве является достижение максимальной конечной скорости реактивного аппарата при минимальных затратах запасенной на его борту энергии. Ограничимся для простоты одноступенчатыми реактивными аппаратами в свободном пространстве. Введем в этом пространстве некоторую инерциальную систему отсчета, относительно которой в начальный момент времени реактивный аппарат покоится, т.е. имеет скорость, равную нулю. В процессе работы РД аппарат разгоняется до некоторой скорости u , измеряемой относительно выбранной системы отсчета. Скорость истечения газов (рабочего тела) v будем измерять относительно движущегося аппарата.

Пусть

- M_0 – масса аппарата после израсходования топлива (рабочего тела);
- M – масса израсходованного топлива (рабочего тела);
- u – конечная скорость аппарата после израсходования топлива (рабочего тела).

¹ Ягодников Д. А., Ирьянов Н. Я. Ракетные двигательные установки. Термины и определения. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. С. 13.

² Там же. С. 18.

Под полезной работой РД будем понимать сообщение реактивному аппарату кинетической энергии $E^+ = \frac{M_0 \cdot u^2}{2}$. Под затраченной работой будем понимать

энергию, которая ушла на ускорение газов (рабочего тела) до скорости истечения v :

$$E^- = \frac{M \cdot v^2}{2}.$$

Абсолютным коэффициентом эффективности реактивного аппарата с данным РД предлагается считать отношение полезной работы к затраченной: $K_A = \frac{E^+}{E^-}$.

При движении в свободном пространстве конечная скорость u одноступенчатого реактивного аппарата определяется формулой Циолковского³, которая в современных обозначениях может быть записана в следующей форме:

$u = I \cdot \ln\left(\frac{M + M_0}{M_0}\right)$. В силу установленного выше численного равенства I и v , формулу

Циолковского можно записать в виде: $u = v \cdot \ln(\mu + 1)$, где $\mu = \frac{M}{M_0}$. Тогда выражение

для абсолютного коэффициента эффективности принимает вид:

$$K_A = \frac{E^+}{E^-} = \frac{2 \cdot M_0 \cdot v^2 \cdot \ln^2(\mu + 1)}{2 \cdot M \cdot v^2} = \frac{\ln^2(\mu + 1)}{\mu} = K_A(\mu).$$

Последнее выражение указывает на то, что в рамках наших рассуждений абсолютный коэффициент эффективности не зависит от конструкции реактивного аппарата, от используемого РД, а определяется только соотношением между израсходованной массой топлива (рабочего тела) и конечной массой аппарата. Это позволяет рассматривать K_A в качестве достаточно универсального, предельно достижимого критерия эффективности реактивного аппарата.

При неограниченном увеличении или уменьшении аргумента функция $K_A(\mu)$ стремится к нулю. Действительно, используя правило Лопиталья⁴, получим:

³ Циолковский К. Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами. Калуга: Б. и., 1926. С. 38.

⁴ Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: В 3 т. Т. 1. М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1962. С. 315.

$$\lim_{\mu \rightarrow +0} \frac{\ln^2(\mu+1)}{\mu} = \lim_{\mu \rightarrow +0} \frac{2 \cdot \ln(\mu+1)}{\mu+1} = \lim_{\mu \rightarrow +0} \frac{2}{\mu+1} = 0.$$

$$\lim_{\mu \rightarrow +\infty} \frac{\ln^2(\mu+1)}{\mu} = \lim_{\mu \rightarrow +\infty} \frac{2 \cdot \ln(\mu+1)}{\mu+1} = \lim_{\mu \rightarrow +\infty} \frac{2}{\mu+1} = 0.$$

Примерный график функции $K_A(\mu)$ представлен сплошной линией на Рис. 1, где по оси X отложены значения μ , а по оси Y – значения абсолютного коэффициента эффективности $K_A(\mu)$. Как видно из графика, функция $K_A(\mu)$ имеет единственный максимум: при $\mu \approx 4$ $\max K_A(\mu) \approx 0.6476$.

Обозначив $\alpha = \frac{1}{\max K_A(\mu)}$, можно ввести нормированный абсолютный коэффициент

эффективности $\hat{K}_A(\mu) = \alpha \cdot K_A(\mu)$, который изменяется от нуля до единицы.

Примерный график функции $\hat{K}_A(\mu)$ представлен на Рис. 1 пунктирной линией.

В силу своей универсальности оба предлагаемых критерия могут оказаться полезными при оценке эффективности реактивного аппарата на всех стадиях его разработки.

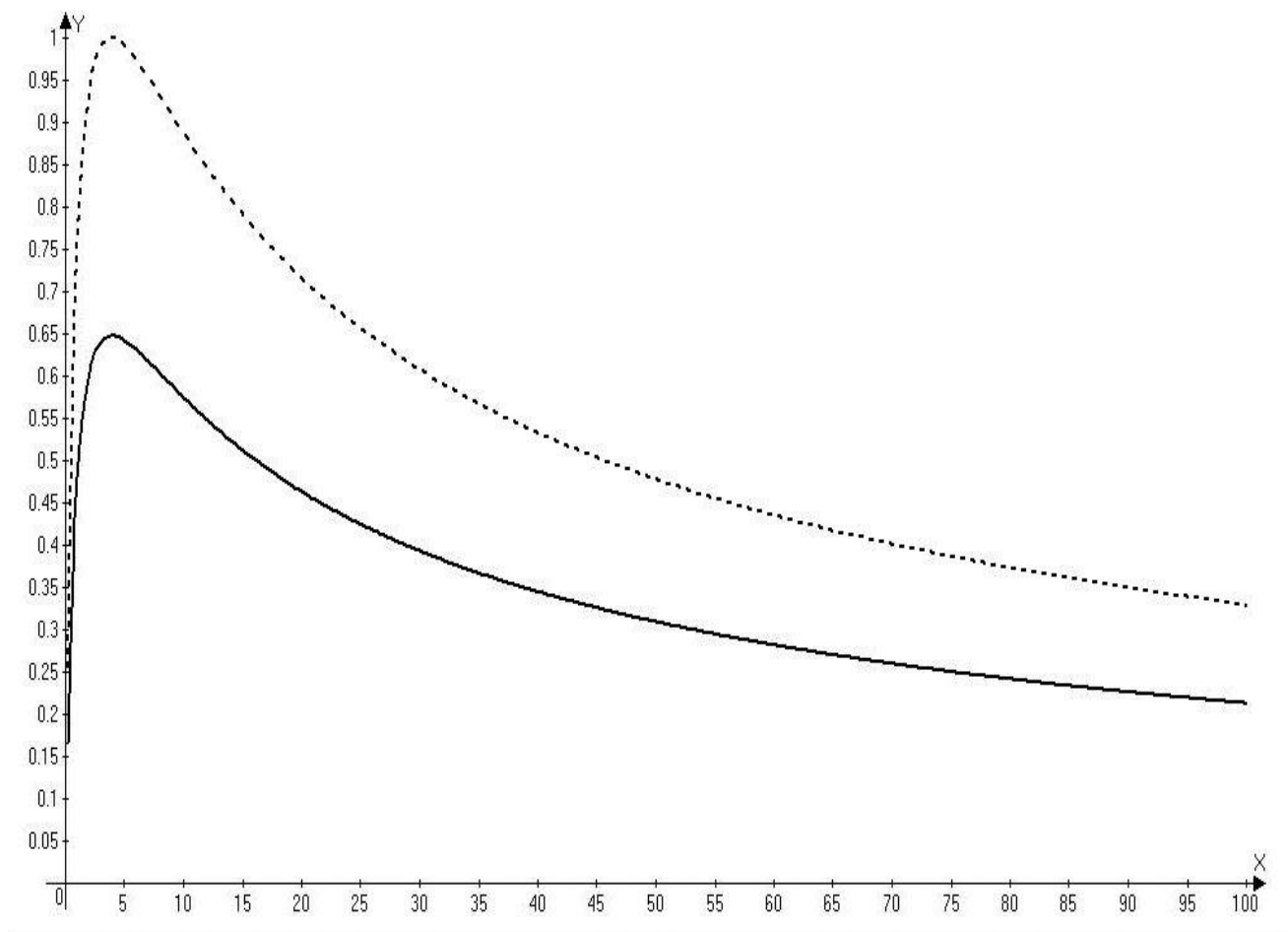


Рис. 1

Использованные источники:

1. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: В 3 т. Т. 1. М.: Гос. Изд-во физико-математической литературы, 1962. 608 с.
2. Циолковский К. Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами. Калуга : Б. и., 1926. 128 с.
3. Ягодников Д. А., Ирьянов Н. Я. Ракетные двигательные установки. Термины и определения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 84 с.