EXCERPT · 1926 EDITION OF THE 1903 PAPER

Исследование мировых пространств

реактивными приборами

Konstantin Tsiolkovsky

Kaluga, 1926, pages 36 to 43: the motion of the rocket in empty space, free from gravity

Ц

Движение ракеты от взрывания в пустоте и в среде свободной от тяжести. Хотя и не выгодно давать отбросу относительную скорость, большую или меньшую абсолютной скорости снаряда, но при употреблении взрывчатых веществ относительная их скорость, по неволе, постоянна. Чем она, вообще, больше, тем большую скорость получает аппарат. Если так, то сначала скорость частиц отброса больше скорости ракеты и использование очень мало, затем обе скорости равны, использование полное. Далее, скорость отброса меньше и использование уклоняется от полного. Короче, использование энергии или переход ее в движение ракеты начинается с нуля, постепенно возрастает, доходит до 100%, затем непрерывно уменьшается, спускаясь в пределе до нуля.

При взрывании мы имеем две потери. Прежде всего не вся энергия тепла превращается в движение отброса. Но чем длиннее труба и чем газообразнее продукты отброса, тем эта потеря меньше. В пределе она нуль. На практике использование не должно быть меньше 75%. Вторая потеря зависит от того, что отброс имеет одну и ту же относительную наибольшую скорость, не равную ускоряющемуся движению снаряда. Как увидим, эта потеря, при космических скоростях, составляет не менее 35%, а использование — не более 65%. В среде тяготения, в которой мы живем на Земле, оно меньше. Если принять вторичное использование в 50%, то ракета превращает в свое движение около 37% (0,75×0,5) всей потенциальной энергии взрывчатых веществ.

Имеем в пустоте и в среде свободной от тяжести

$$32\ldots\ \text{Ско}\,.\,d\text{Мо} + \text{Мр}\,.\,d\text{Скр} = 0.$$

Но (Мр) состоит из постоянной массы (М_1) (т.-е. из снаряда, людей, запасов и разных принадлежностей) и переменной массы взрывчатых веществ, которые, сгорая, выбрасываются из ракеты. Значит, Мр=Мр_1+Мо. Теперь, вместо 32, получим:

$$33\ldots\ \text{Ско}\,.\,d\text{Мо} + (\text{Мр}_1 + \text{Мо})\,.\,d\text{Скр} = 0$$

$$\text{Отсюда}\ \ 34\ldots\ -\text{Ско}\,.\,\frac{d\text{Мо}}{\text{Мр}_1 + \text{Мо}} = d\text{Скр}.$$

Интегрируя, найдем:

$$35\ldots\ \text{Скр} = -\text{Ско}\,.\,\text{Le}(\text{Мр}_1 + \text{Мо}) + \text{Пост}.$$

(Le) означает натуральный логарифм. Допустим, что при начале взрывания ракета не двигалась, т.-е Скр=0 и Мо=Мо_1. Тогда из (35):

$$36\ldots\ \text{Пост} = \text{Ско}\,.\,\text{Le}(\text{Мр}_1 + \text{Мо}_1).$$

$$\text{Следовательно:}\ \ 37\ldots\ \text{Скр} = \text{Ско}\ \text{Le}\left(\frac{\text{Мр}_1 + \text{Мо}_1}{\text{Мр}_1 + \text{Мо}}\right).$$

Наибольшую скорость получает ракета, когда израсходует весь запас взрывчатых веществ, или когда Мо = 0.

$$\text{В таком случае}\ \ 38..\ \text{Скр}_1 = \text{Ско.Le}\left(1 + \frac{\text{Мо}_1}{\text{Мр}_1}\right).$$

Из последней формулы видно: 1) Максимальная скорость снаряда (Скр) тем больше, чем большую скорость имеет отброс (Ско). 2) (Скр) может беспредельно возрастать с увеличением относительного количества $\left(\frac{\text{Мо}_1}{\text{Мр}_1}\right)$ отброса. Но возрастание это, сначала довольно быстрое, потом делается все более и более медленным. Если отношение (Мо_1 : Мр_1) очень мало, то математики легко докажут, что $\text{Скр}_1 = \text{Ско}.\frac{\text{Мо}_1}{\text{Мр}_1}$. Значит, в этом случае (Скр_1) пропорциональна запасу (Мо_1). Напротив, в пределе, когда отношение (см. 38) очень велико $\text{Скр}_1 = \text{Ско Le}\left(\frac{\text{Мо}_1}{\text{Мр}_1}\right)$, т.-е. возрастание скорости будет чрезвычайно медленное. 3) Скорость ракеты не изменяется, если отношение (Мо_1 : Мр_1) остается постоянным. Отсюда видно, что космическая скорость не зависит от абсолютной величины массы снаряда. Иными словами, масса снаряда и его нагрузка произвольно велика, если не считаться с иными условиями. 4) Окончательная (Скр_1) не зависит от порядка взрывания. Проходит ли оно равномерно или нет, секунды или тысячелетия—это все равно. Даже перерывы ничего не значат.

$$\text{Из 34 найдем:}\ \ 39\ldots\ \frac{+d\text{Скр}}{d\text{Вр}} = \frac{\text{Ско}}{\text{Мр}_1 + \text{Мо}}\,.\,\frac{d\text{Мо}}{d\text{Вр}}.$$

Первая часть выражает секундное ускорение в движении ракеты, т.-е. силу рожденной в ней относительной тяжести (хотя кругом, по нашему условию, тяжести нет). Как видно (39), она пропорциональна интенсивности в расходе материала (dМо : dВр). Кроме того, по мере его (Мо) исрасходования, кажущаяся тяжесть увеличивается, так как (Мо) уменьшается. Чтобы относительная тяжесть оставалась неизменной, необходимо постепенное ослабление интенсивности взрыва. Тогда из 39 получим:

$$39_1\ldots\ \frac{\text{Ско}}{\text{Мр}_1 + \text{Мо}}\,.\,\frac{d\text{Мо}}{d\text{Вр}} = \text{То},$$

где (То) есть постоянная относительная тяжесть. Отсюда:

$$39_2\ldots\ \frac{\text{Ско}\,.\,d\text{Мо}}{\text{Мр}_1 + \text{Мо}} = \text{То}\,.\,d\text{Вр}.$$

Интегрируя, получим:

$$39_3\ldots\ \text{Ско}\,.\,\text{Le}(\text{Мр}_1 + \text{Мо}) = \text{То}\,.\,\text{Вр} + \text{Пост}.$$

Если Мо = Мо_1, то Вр = 0, следовательно:

$$39_4\ldots\ \text{Вр} = \frac{\text{Ско}}{\text{То}}\,.\,\text{Le}\left(\frac{\text{Мр}_1 + \text{Мо}_1}{\text{Мр}_1 + \text{Мо}}\right).$$

Если Мо = 0, т.-е. весь взрывчатый материал исчерпан, то

$$39_5\ldots\ \text{Вр}_1 = \frac{\text{Ско}}{\text{То}}\,.\text{Le}\left(1 + \frac{\text{Мо}_1}{\text{Мр}_1}\right)$$

Значит, время всего взрывания обратно получаемой относительной тяжести и увеличивается с массой отброса.

$$\text{Из}\ (39_1)\ \text{найдем:}\ \ 39_6\ldots\ \frac{d\text{Мо}}{d\text{Вр}} = \frac{\text{Мр}_1 + \text{Мо}}{\text{Ско} + \text{То}}.$$

Отсюда видно, что наименьшая интенсивность взрывания или наименьшая их потеря бывает при конце взрывания, когда (Мо) осталось мало, а наибольшая — вначале, когда Мо = М_1.

$$\text{В первом случае}\ \ 39_7..\ \frac{d\text{Мо}}{d\text{Вр}} = \frac{\text{Мр}_1}{\text{Ско} + \text{То}}.$$

$$\text{а во втором}\ \ 39_8\ldots\ \frac{d\text{Мо}}{d\text{Вр}} = \frac{\text{Мр}_1 + \text{Мо}_1}{\text{Ско} + \text{То}}.$$

Отношение наибольшего расхода (в начале) к наименьшему (в конце) будет: $39_9\ldots\ 1 + \frac{\text{Мо}_1}{\text{Мр}_1}$. Чем больше отношение ($\text{Мо}_1$: Мр_1), тем сильнее изменяется расход взрывчатого материала и, обратно, он почти постоянен при малом отношении. На практике силу взрывания изменять неудобно, проще переносить непостоянную тяжесть, погрузивши людей и другие нежные предметы в жидкость.

Время взрывания всего запаса, при его равномерности, когда ускорение ракеты и относительная тяжесть возрастают, но расход взрывчатых веществ один и тот же, можно выразить еще так:

$$39_{10}\ldots\ \text{Вр}_1 = \text{Мо}_1 : \frac{d\text{Мо}}{d\text{Вр}}.$$

Тут производную можно заменить секундным расходом взрывчатого вещества. То же время, при равномерном ускорении ракеты и постоянной относительной тяжести в снаряде (39_1), но неравномерном расходе отброса, будет равно:

$$39_{11}\ldots\ \text{Вр}_1 = \text{Скр}_1 : \text{Ур} = \text{Скр}_1 : \frac{d\text{Скр}}{d\text{Вр}}.$$

Производная тут выражает постоянное прибавление скорости снаряда в секунду.

Интересно знать, какая часть полной работы движущихся частиц отброса передается ракете. Имеем:

$$40\ldots\ \text{Ро} = 0{,}5.\text{Мо}_1.\text{Ско}^2 \qquad 41\ldots\ \text{Рр} = 0{,}5.\text{Мр}_1.\text{Скр}_1^2.$$

$$\text{Отсюда:}\ \ 42\ldots\ \text{Рр}_1 : \text{Ро} = \frac{\text{Мр}_1}{\text{Мо}_1}\,.\,\left(\frac{\text{Скр}_1}{\text{Ско}_1}\right)^2,$$

или, на основании 38_9:

$$43\ldots\ \frac{\text{Рр}}{\text{Ро}} = \frac{\text{Мр}_1}{\text{Мо}_1}\left\{\text{Le}\left(1 + \frac{\text{Мо}_1}{\text{Мр}_1}\right)\right\}^2.$$

Отсюда можно вычислить, что использование не может быть больше 65%, а для получения космических скоростей оно может быть принято в 50%. Если запас взрывчатого вещества сравнительно не велик, то приблизительно получим вместо (43):

$$45\ldots.\ \text{Рр} : \text{Ро} = \text{Мо}_1\,.\,\text{Мр}_1 \ \ \text{или, точнее:}$$

$$46\ldots\ \text{Рр} : \text{Ро} = \frac{\text{Мо}_1}{\text{Мр}_1}\left(1 - \frac{\text{Мо}_1}{\text{Мр}_1}\right).$$

Можно получить еще более точную формулу, зная, что

$$44\ldots\ \text{Le}(1 + x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4}\ldots$$

Из формул видно, что сначала, когда запас мал, полезность возрастает пропорционально запасу, затем медленнее, достигает наибольшей величины, потом медленно уменьшается и, в пределе, достигает нуля.

Отношение (Мр_1 : Мо_1 = x), соответствующее наибольшей полезности, определяется уравнением:

$$\text{Le}(1 + x) = \frac{2x}{1 + x},\ \ (\text{x})\ \text{близко к}\ 4$$

(т.-е. запас превышает вес ракеты в 4 раза), а использование 65%.

Кроме того, что мы вывели аналитически из таблицы, видим, что наибольшее использование (до 65%) энергии отброса бывает тогда, когда вес его в 4 раза больше веса ракеты. Но процент использования, вообще, не мал (около 50%), когда относительное количество отброса колеблется от 1 до 20, а соответствующие скорости от 3000 м. до 15000. Это вполне достаточные космические величины. Две скорости таблицы относятся к разным взрывчатым материалам. Большая — к чистым—водороду и кислороду. Меньшая — к углеводородам и эндогенным соединениям кислорода. Для наглядности, я прибавляю пятый столбец, который показывает в кило наибольшее поднятие тела при земной и **постоянной** тяжести.

Таблица 6.

Отношение массы отброса к массе ракеты Мо_1 : Мр_1.	(Скр), если скорость отброса=5000 м. форм. 38.	(Скр_1), если скорость отброса=4000 м форм. 38.	Использование Пр=Плв (в процентах) форм. 43.	Приблизител. поднятие в кило при постоян. земн. тяжести.
0,1	472,5	378	8,87	11,4
0,2	910	728	16,55	42
0,3	1310	1048	22,9	92
0,4	1680	1344	28,2	138
0,5	2025	1620	32,8	204
0,6	2345	1876	36,7	280
0,7	2645	2116	40,0	357
0,8	2930	2344	42,9	440
0,9	3210	2568	45,8	520
1	3465	2772	48,0	607
1,5	4575	3660	55,8	650
2	5490	4392	60,3	1520
3	6900	5520	63,5	2430
4	8045	6436	64,7	3300
5	8960	7168	64,1	На деле поднятие выше, ибо тяжесть ослабляется.
6	9730	7784	63,0	
7	10395	8316	61,7	
8	10985	8788	60,5	
9	11515	9212	58,9	
10	11990	9592	57,6	
15	13865	11092	51,2	
20	15220	12176	46,3	
30	17170	13736	39,3	
50	22400	17920	31,0	
100	26280	21040	21,0	
193	30038	24032	14,4	
∞	∞	∞	0	

Наше исследование применяется в следующих случаях: 1) в среде без тяжести, напр., между солнцами или млечными путями, где тяжесть близка к нулю; 2) на малых астероидах, малых лунах (луны Марса) и на всех малых небесных телах, напр., на кольцах Сатурна, где тяжестью тоже можно пренебречь; 3) на орбите Земли; 4) в каждом месте любой солнечной системы, на каком угодно расстоянии от небесного тела, если снаряд вне атмосферы и приобрел или не приобрел скорость, препятствующую ему задевать небесное тело или его атмосферу.

Потом увидим, что для избежания потери энергии, направление взрывания должно быть нормально к равнодействующей силе тяготения.

Отсюда видно, что достаточно только освободиться от планетной атмосферы и сделаться спутником этой планеты, хотя бы на очень близком от нее расстоянии, чтобы дальнейшее движение и перемещение по всей вселенной было совершенно обеспечено. Действительно, взрывание тогда может быть очень слабым, а энергия, потребная для этого, может быть заимствована от энергии Солнца. Опорный материал дадут частицы альфа и бета, повсюду рассеянные, или болиды, космическая пыль и другая небесная мелочь.

Первый великий шаг человечества состоит в том, чтобы вылететь за атмосферу и сделаться спутником Земли. Остальное сравнительно легко, вплоть до удаления от нашей солнечной системы. Но я, конечно, не имею в виду спуск на массивные планеты.

Text: К. Циолковский, *Исследование мировых пространств реактивными приборами (переиздание работ 1903 и 1911 г. с некоторыми изменениями и дополнениями)*, Калуга, 1-я Гостипография ГСНХ, 1926, pp. 36-43. Scan: Belinsky Library, Yekaterinburg.

First printed in Научное обозрение, 1903, No. 5; the text here is the author's revised text of 1926, in its spelling.

elib.uraic.ru/handle/123456789/66176