

```

In[*]:=  $\mu_1 = 3.986004356 \times 10^{14} \text{ (м}^3/\text{с}^2\text{)}$ ;
 $\mu_2 = 4.90280014595616 \times 10^{12} \text{ (м}^3/\text{с}^2\text{)}$ ;
 $r_3 = 6371 \times 10^3 \text{ (м)}$ ;
 $RM = 385000000 \text{ (м)}$ ;
 $h_1 = 200000 \text{ (м - высота опорной орбиты)}$ ;
 $Ra = 150000000 \text{ (высота целевой орбиты)}$ ;
 $m_1 = 20000 \text{ (кг)}$ ;
 $m_{KVTkemp} = 24000 - 19600 \text{ (кг)}$ ;

```

Параметры опорной круговой НОО

```

In[*]:=  $e_1 = 0$ ;
 $p_1 = (r_3 + h_1) \cdot (1 + e_1)$ ;
 $v_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{p_1}}$ 

```

```

Out[*]=
7788.49

```

Гомановский перелёт

Параметры переходной орбиты

$$In[*]:= e2 = \frac{Ra - (r3 + h1)}{Ra + (r3 + h1)} // N$$

числен

$$p2 = (r3 + h1) * (1 + e2) // N$$

чи

$$v2p = \sqrt{\frac{\mu1}{p2}} * (1 + e2)$$

$$v2a = \sqrt{\frac{\mu1}{p2}} * (1 - e2)$$

$$\Delta v1 = v2p - v1$$

Out[*]=

0.916064

Out[*]=

1.25905×10^7

Out[*]=

10781.

Out[*]=

472.279

Out[*]=

2992.49

1 971 300 000 000

156 571

Out[*]=

10781.

Out[*]=

472.279

Out[*]=

2992.49

Параметры целевой круговой орбиты радиусом Ra

```

In[*]:= e3 = 0;
p3 = Ra;

v3 =  $\sqrt{\frac{\mu_1}{p_3}}$ 

Δv2 = v3 - v2a

Out[*]=
1630.13

Out[*]=
1157.86

In[*]:= (*Суммарная затрата характеристической скорости*)
Δv = Abs[Δv1] + Abs[Δv2]
      |абсолютно...|абсолютное значение

Out[*]=
4150.34

Δv

Out[*]=
4150.34

In[*]:= RaList = Table[36 * step * 10^6, {step, 1.5, 15, 0.5}]
      |таблица значений

Out[*]=
{5.4 × 10^7, 7.2 × 10^7, 9. × 10^7, 1.08 × 10^8, 1.26 × 10^8, 1.44 × 10^8, 1.62 × 10^8,
 1.8 × 10^8, 1.98 × 10^8, 2.16 × 10^8, 2.34 × 10^8, 2.52 × 10^8, 2.7 × 10^8, 2.88 × 10^8,
 3.06 × 10^8, 3.24 × 10^8, 3.42 × 10^8, 3.6 × 10^8, 3.78 × 10^8, 3.96 × 10^8, 4.14 × 10^8,
 4.32 × 10^8, 4.5 × 10^8, 4.68 × 10^8, 4.86 × 10^8, 5.04 × 10^8, 5.22 × 10^8, 5.4 × 10^8}

In[*]:= T3 = 2 π *  $\sqrt{\frac{Ra^3}{\mu_1}}$  ;

In[*]:= Clear[Tab1]
      |очистить

In[*]:= Tab1 = {{ "N", "Ra, тыс. км", "Δv, км/с", "Период обращения T, дней" }}
      |численное приближение

Out[*]=
{{N, Ra, тыс. км, Δv, км/с, Период обращения T, дней}}

In[*]:= RaList[[1]]

Out[*]=
5.4 × 10^7

```

```

In[*]:= For[i = 1, i ≤ Length[RaList], i++,
  AppendTo[Tab1,
    {i, RaList[[i]] / 10^6, Δv / 10^3 /. Ra → RaList[[i]], T3 / 3600 / 24 /. Ra → RaList[[i]]}]
]
Grid[Tab1, Frame → All]

```

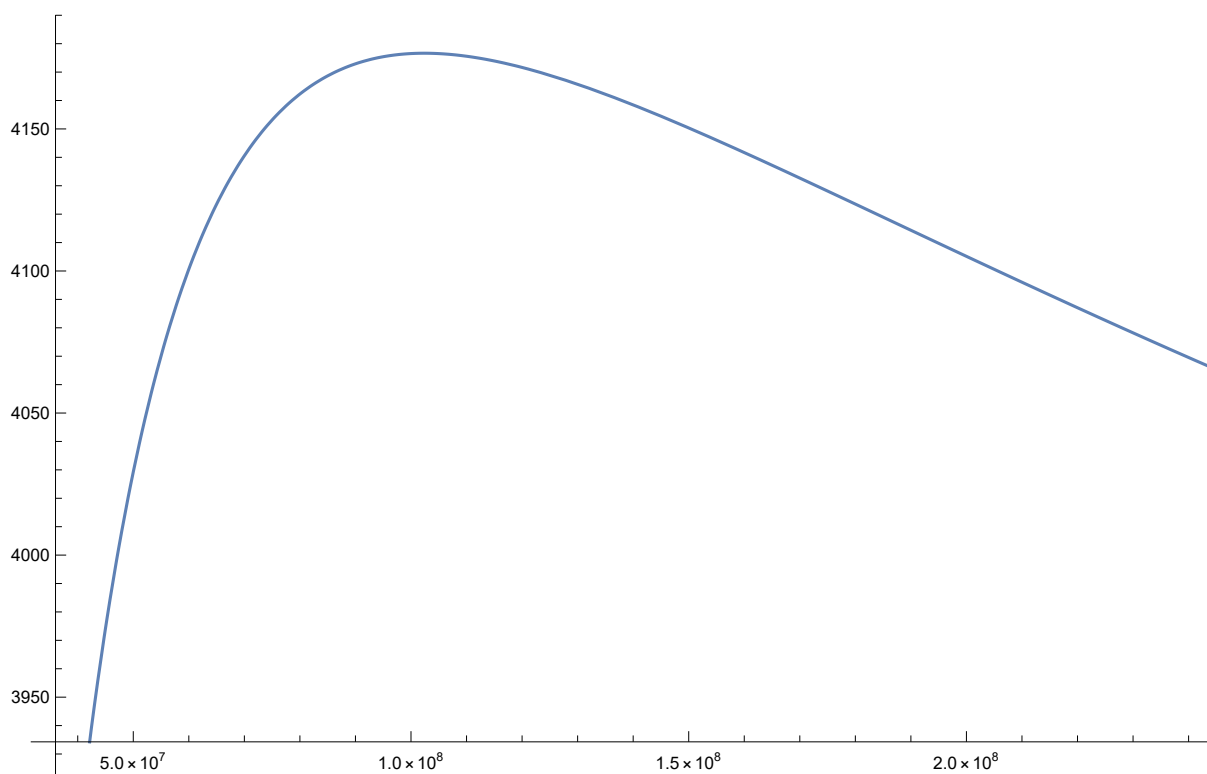
Out[*]=

N	Ra, тыс. км	Δv, км/с	Период обращения T, дней
1	54.	4.06286	1.4454
2	72.	4.14607	2.22534
3	90.	4.17291	3.11
4	108.	4.17605	4.08821
5	126.	4.16827	5.15173
6	144.	4.1553	6.29421
7	162.	4.13991	7.51052
8	180.	4.12355	8.79642
9	198.	4.10698	10.1483
10	216.	4.09064	11.5632
11	234.	4.07473	13.0383
12	252.	4.05938	14.5713
13	270.	4.04464	16.1601
14	288.	4.03051	17.8027
15	306.	4.017	19.4975
16	324.	4.00409	21.2429
17	342.	3.99174	23.0376
18	360.	3.97994	24.88
19	378.	3.96865	26.7692
20	396.	3.95784	28.7038
21	414.	3.94749	30.683
22	432.	3.93756	32.7057
23	450.	3.92803	34.7709
24	468.	3.91888	36.8779
25	486.	3.91009	39.0258
26	504.	3.90162	41.2138
27	522.	3.89347	43.4413
28	540.	3.88562	45.7075

```
In[*]:= Plot[Δv, {Ra, 36 000 000, 250 000 000}]
```

график функции

```
Out[*]=
```



Биэллиптический перелёт (трёхимпульсный)

```
In[*]:= RaB = .
```

```
In[*]:= (*Перелёт на 1-ый эллипс*)
```

```
In[*]:= e2B = 
$$\frac{RaB - (r3 + h1)}{RaB + (r3 + h1)}$$
 // N
```

числен

```
p2B = (r3 + h1) * (1 + e2B) // N
```

чи

```
v2pB = 
$$\sqrt{\frac{\mu1}{p2B}}$$
 * (1 + e2B)
```

```
v2aB = 
$$\sqrt{\frac{\mu1}{p2B}}$$
 * (1 - e2B)
```

```

$$\Delta v1B = v2pB - v1$$

```

```
Out[*]=
```

0.959132

```
Out[*]=
```

1.28735×10^7

```
Out[*]=
```

10 901.5

```
Out[*]=
```

227.408

```
Out[*]=
```

3112.98

```
In[*]:= (*Перелёт на 2-ой эллипс*)
```

```

In[*]:= e3B =  $\frac{RaB - Ra}{RaB + Ra}$  // N
           |численное приближение

p3B = Ra * (1 + e3B) // N
           |численное приближение

v3pB =  $\sqrt{\frac{\mu1}{p3B}}$  * (1 + e3B) // N
           |численное приближение

v3aB =  $\sqrt{\frac{\mu1}{p3B}}$  * (1 - e3B) // N
           |численное приближение

Δv2B = v3aB - v2aB // N
           |численное приближение

(*Перелёт на целевую орбиту*)
Δv3B = v3 - v3pB // N
           |численное приближение

(*Суммарные затраты хар-ой скорости*)
ΔvB = Abs[Δv1B] + Abs[Δv2B] + Abs[Δv3B] // N
      |абсолютное... |абсолютное... |абсолютное з... |чи

```

```

Out[*]=
0.354839

```

```

Out[*]=
2.03226 × 108

```

```

Out[*]=
1897.44

```

```

Out[*]=
903.541

```

```

Out[*]=
676.133

```

```

Out[*]=
- 267.302

```

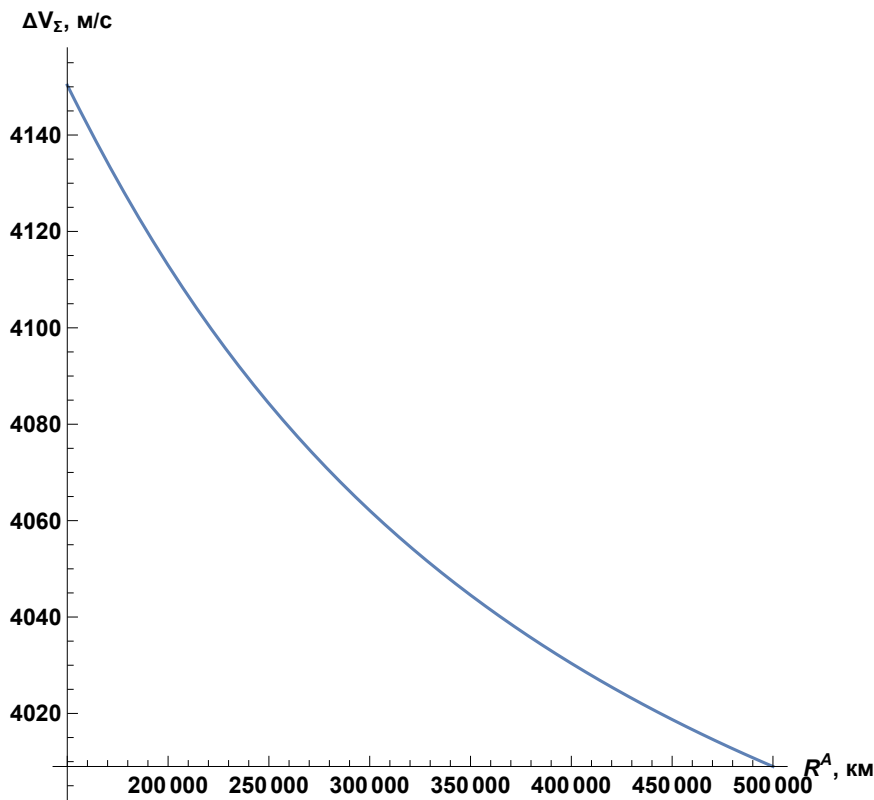
```

Out[*]=
4056.41

```

```
In[ ]:= Plot[ΔvB /. RaB → x * 1000, {x, 150000, 500000}, AxesLabel → {"RA, км", "ΔVΣ, м/с"},
  график функции                                обозначения на осях
  PlotRange → All, LabelStyle → Directive[Black, Bold, Medium], AspectRatio → 1.03]
  отображаем... всё стиль отметки директива чёрный жир... средний аспектное отношение
```

Out[]:=



```
In[ ]:= Plot[ΔvB /. RaB → x * 1000, {x, 150000, 600000}, PlotTheme → "Detailed",
  график функции                                тематический стиль графика
  AxesLabel → {"\!\(\*SuperscriptBox[\(R\), \(\Lambda\)]\), км",
  обозначения на осях бокс для верхнего индекса
  "\!\(\*SubscriptBox[\(ΔV\), \(\Sigma\)]\), м/с"},
  бокс для нижнего индекса
  PlotRange → All, LabelStyle → Directive[Black, Bold]]
  отображаем... всё стиль отметки директива чёрный жирный шрифт
```

```
In[ ]:= FindMinimum[ΔvB, {RaB, 3 * 10^8}]
  найти минимум
```

Out[]:=

{3827.67, {RaB → 3.41697 × 10⁸}}

```
In[ ]:= Δv /. Ra → 150000000
```

Out[]:=

4150.34

```
In[ ]:= Δv /. Ra → 380000000
```

Out[]:=

3967.42

Переход на орбиту захоронения

In[*]:= Параметры орбиты захоронения

$$ezakh = \frac{Ra - (r3 + 100\,000)}{Ra + (r3 + 100\,000)};$$

$$pzakh = (r3 + 100\,000) * (1 + ezakh);$$

$$vpzakh = \sqrt{\frac{\mu1}{pzakh}} * (1 + ezakh);$$

$$vazakh = \sqrt{\frac{\mu1}{pzakh}} * (1 - ezakh);$$

$$\Delta v1zakh = \text{Abs}[v3 - vazakh];$$

↳ абсолютное значение

$$\Delta v1zakh / . Ra \rightarrow 150\,000\,000$$

Out[*]=

орбиты Параметры захоронения

Out[*]=

1161.31

In[*]:= $Vzakh = \sqrt{\frac{2 \mu1}{Ra}};$

$$\Delta v2zakh = \text{Abs}[v3 - Vzakh];$$

↳ абсолютное значение

$$\Delta v2zakh / . Ra \rightarrow 150\,000\,000$$

Out[*]=

675.224

In[*]:= (*Выбираем отлёт в межпланетное пространство*)

In[*]:= mfzakh =

$$\text{Solve}\left[(\Delta v2zakh / . Ra \rightarrow 150\,000\,000) == 4500 * \text{Log}\left[\frac{mkVTkemp + mfzakh}{mkVTkemp}\right], mfzakh\right][[1, 1, 2]]$$

↳ решить уравнения

↳ натуральный логарифм

Out[*]=

712.325

Затраты топлива при
биэллиптическом перелёте, РБ
КВТК (не подходит, если только

КВТК2Б-А7В)

In[*]:= RaB = 315 000 000

Out[*]=
315 000 000

In[*]:= mf1 = Solve[$\Delta v3B == 4500 * \text{Log}\left[\frac{m1 + mKVTkemp + mfzakh + mf1}{m1 + mKVTkemp + mfzakh}\right]$, mf1][[1, 1, 2]]

Out[*]=
2072.32

In[*]:= mf2 = Solve[$\Delta v2B == 4500 * \text{Log}\left[\frac{m1 + mKVTkemp + mfzakh + mf1 + mf2}{m1 + mKVTkemp + mfzakh + mf1}\right]$, mf2][[1, 1, 2]]

Out[*]=
2193.26

In[*]:= mf3 = Solve[$\Delta v1B == 4500 * \text{Log}\left[\frac{m1 + mKVTkemp + mfzakh + mf1 + mf2 + mf3}{m1 + mKVTkemp + mfzakh + mf1 + mf2}\right]$, mf3][[1, 1, 2]]

Out[*]=
29 411.

In[*]:= mfuel = mfzakh + mf1 + mf2 + mf3

Out[*]=
34 388.9

Перелёт на ТЭМ (Зевс), двигатель ИД-500

In[*]:= Jid500 = 70 000 (*м/с*);
Fid500 = 0.75 (*Н*);
 $\Delta mid500 = Fid500 / Jid500$ (*кг/с*);
nid500 = 16 (*кол-во двигателей*);
mzevs = 20 290 (*кг*);
 $\Delta m = \Delta mid500 * nid500$;
 $F = Fid500 * nid500$;

Сначала перелёт на КВТК на орбиту базирования, как можно
ВЫШЕ

```
In[*]:= e2bo = 
$$\frac{Rbo - (r3 + h1)}{Rbo + (r3 + h1)}$$
 // N
```

Численнс

```
p2bo = (r3 + h1) * (1 + e2bo) // N
```

Ч

```
v2pbo = 
$$\sqrt{\frac{\mu1}{p2bo}} * (1 + e2bo)$$

```

```
v2abo = 
$$\sqrt{\frac{\mu1}{p2bo}} * (1 - e2bo)$$

```

```

$$\Delta v1bo = v2pbo - v1$$

```

Out[*]=

0.355532

Out[*]=

8.9072×10^6

Out[*]=

9067.93

Out[*]=

4311.22

Out[*]=

1279.44

```
In[*]:= e3bo = 0;  
p3bo = Rbo;
```

```
v3bo = 
$$\sqrt{\frac{\mu1}{p3bo}}$$

```

```

$$\Delta v2bo = v3bo - v2abo$$

```

Out[*]=

5370.31

Out[*]=

1059.09

```

In[*]:= ezakhbo = 
$$\frac{Rbo - (r3 + 70\,000)}{Rbo + (r3 + 70\,000)} // N$$


$$pzakhbo = (r3 + 70\,000) * (1 + ezakhbo) // N$$


$$vazakhbo = \sqrt{\frac{\mu1}{pzakhbo}} * (1 - ezakhbo)$$


$$\Delta v1zakhbo = Abs[v3bo - vazakhbo]$$

Out[*]=
0.364229

Out[*]=
 $8.787 \times 10^6$ 

Out[*]=
4282.03

Out[*]=
1088.28

In[*]:= Clear[mfzakhbo]

In[*]:= mfzakhbo = Solve[
$$\Delta v1zakhbo == 4500 * \text{Log}\left[\frac{mKVTkemp + mfzakhbo}{mKVTkemp}\right]$$
, mfzakhbo][[1, 1, 2]];

In[*]:= mfzakhbo /. Rbo -> (r3 + hbo)
Out[*]=
1203.8

In[*]:= Clear[mf1bo]

mf1bo = Solve[
$$\Delta v2bo == 4500 * \text{Log}\left[\frac{m1 + mKVTkemp + mfzakhbo + mf1bo}{m1 + mKVTkemp + mfzakhbo}\right]$$
, mf1bo][[1, 1, 2]];

In[*]:= mf1bo /. Rbo -> (r3 + hbo)
Out[*]=
6794.11

In[*]:= Clear[mf2bo]

In[*]:= mf2bo = Solve[
$$\Delta v1bo == 4500 * \text{Log}\left[\frac{m1 + mKVTkemp + mfzakhbo + mf1bo + mf2bo}{m1 + mKVTkemp + mfzakhbo + mf1bo}\right]$$
, mf2bo][[1, 1, 2]];

... Solve: There may be values of the parameters for which some or all solutions are not valid.

In[*]:= mf2bo /. Rbo -> (r3 + hbo)
Out[*]=
10654.3

```

```

In[*]:= (mfzakhbo + mf1bo + mf2bo) * 1.05 /. Rbo -> (r3 + 7450000)
Out[*]=
19584.8

In[*]:= FindRoot[(mfzakhbo + mf1bo + mf2bo) * 1.05 == 19600, {Rbo, (r3 + 10000000)}]
|найти корень
Out[*]=
{Rbo -> 1.38291 × 107}

In[*]:= (mfzakhbo + mf1bo + mf2bo) * 1.05 /. Rbo -> 1.3829060479531711`*^7
Out[*]=
19600.

In[*]:= 1.3829060479531711`*^7 - r3
Out[*]=
7.45806 × 106

In[*]:= hbo = 7450000
Out[*]=
7450000

In[*]:= ωbo = v3bo / Rbo /. Rbo -> (r3 + hbo)
Out[*]=
0.000388561

In[*]:= Rbo = r3 + hbo
Out[*]=
13821000

```

Предварительно находим по формуле время перелёта и затраты ΔV_x

```

In[*]:= a0 = F / (m1 + mzevs) (*начальное ускорение, м/с^2*);
Tk =  $\frac{Jid500}{a0} * \left( 1 - \text{Exp} \left[ \frac{\sqrt{\mu}1}{Jid500} \left( \frac{1}{\sqrt{Ra}} - \frac{1}{\sqrt{(r3 + hbo)}} \right) \right] \right) (*с*)$ 
|показываемая формуля
Out[*]=
1.2228 × 107

In[*]:= Print["Время перелёта составит ", (Tk / 3600) / 24, " дней"]
|печатать
Время перелёта составит 141.528 дней

In[*]:= Tact = TactIter
Out[*]=
1.21419 × 107

In[*]:= Tact = .

In[*]:= Tact = Tk
Out[*]=
1.2228 × 107

```

Решаем ДУ движения

```
In[*]:= m[t_] := Piecewise[{ {m1 + mzevs - Δm * t, t < Tact}, {m1 + mzevs - Δm * Tact, t ≥ Tact} }]
```

кусочно-заданная функция

(*Закон изменения массы*)

```
In[*]:= Solution = NDSolve[{ r''[t] - r[t] * (φ'[t])^2 == -μ1 / (r[t])^2 ,
```

численно решить ДУ

$$2 * r'[t] * φ'[t] + r[t] * φ''[t] == (F / m[t]) * \begin{cases} \text{HeavisideTheta}[Tact - t] & t \neq Tact \\ 0 & t == Tact \end{cases},$$

$$φ[0] == 0, φ'[0] == ωbo, r[0] == (r3 + hbo), r'[0] == 0 \}, \{φ[t], r[t]\}, \{t, 0, Tk + TRa \}]$$

Out[*]=

$\{ \{ φ[t] \rightarrow \text{InterpolatingFunction} [\text{Domain: } \{ \{0., 1.28 \times 10^7\} \} \text{ Output: scalar}] [t],$

$r[t] \rightarrow \text{InterpolatingFunction} [\text{Domain: } \{ \{0., 1.28 \times 10^7\} \} \text{ Output: scalar}] [t] \} \}$

```
In[*]:= graph1 = ParametricPlot[Evaluate[{r[t] * Cos[φ[t]], r[t] * Sin[φ[t]]} /. Solution],
```

график параметр... вычислить косинус синус

```
{t, 0, Tact}, PlotStyle -> {Red, Thickness[0.0015]}, PlotLegends -> Automatic];
```

стиль графика кр... толщина легенды графика автоматический

```
In[*]:= graph2 = RegionPlot[x^2 + y^2 ≤ r3^2, {x, -r3, r3}, {y, -r3, r3}];
```

визуализация геометрической области на плоскости

```
In[*]:= graph3 = ParametricPlot[{Ra * Cos[p], Ra * Sin[p]},
```

график параметрически... косинус синус

```
{p, 0, 2 Pi}, PlotStyle -> Thickness[0.0015]];
```

чис... стиль графика толщина

```
In[*]:= graph4 = ParametricPlot[
```

график параметрически заданной области на плоскости

```
Evaluate[{r[t] * Cos[φ[t]], r[t] * Sin[φ[t]]} /. Solution], {t, Tact, Tk + TRa},
```

вычислить косинус синус

```
PlotStyle -> {RGBColor[0., 0.82, 0.27], Dashing[0.015, 0.015], Thickness[0.0017]},
```

стиль графика цвет RGB разбиение шриха толщина

```
PlotLegends -> Automatic];
```

легенды графика автоматический

```
graph5 = Graphics[Point[{r1 * Cos[φ1], r1 * Sin[φ1]}] /. t -> Tact];
```

графика точка косинус синус

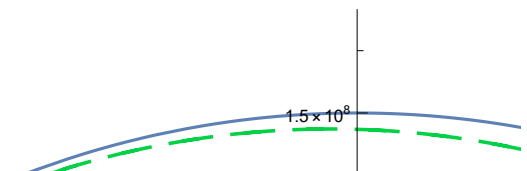
```
graph6 = Graphics[Point[{r1 * Cos[φ1], r1 * Sin[φ1]}] /. t -> tManevr];
```

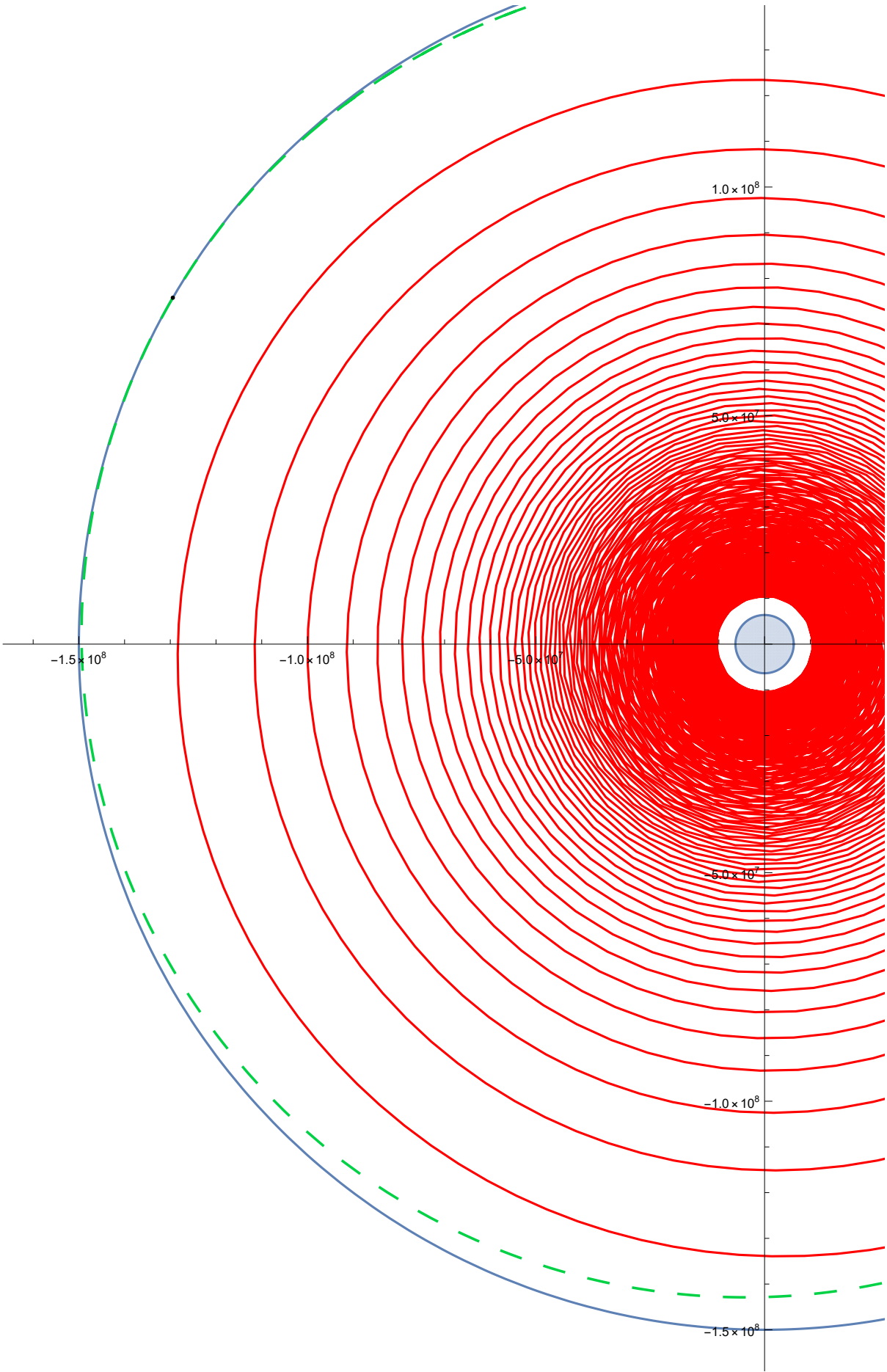
графика точка косинус синус

```
In[*]:= Show[graph1, graph2, graph3, graph4, graph5, graph6, PlotRange -> All]
```

показать отображаемы... всё

Out[*]=





```
In[*]:=  $\omega Ra = v3 / Ra$ 
```

```
Out[*]=  
0.0000108676
```

```
In[*]:=  $TRa = 2 \text{ Pi} / \omega Ra$ 
```

число пи

```
Out[*]=  
578160.
```

```
In[*]:=  $TRa / 3600 / 24$ 
```

```
Out[*]=  
6.69166
```

```
In[*]:=  $r1 = \text{Solution}[1, 2, 2]$ 
```


```
Out[*]=  
InterpolatingFunction[ Domain:  $\{0., 1.28 \times 10^7\}$   
Output: scalar][t]
```

```
In[*]:=  $Tact + TRa / 4$ 
```

```
Out[*]=  
 $1.23445 \times 10^7$ 
```

```
In[*]:=  $RaReal = \text{FindMaximum}[r1 \&\& Tact \leq t \leq Tact + TRa, \{t, Tact + TRa / 4\}][1]$ 
```

найти максимум


InterpolatingFunction: Input value $\{1.84296 \times 10^7\}$ lies outside the range of data in the interpolating function. Extrapolation will be used. 

FindMaximum: The function value -False is not a real number at $\{t\} = \{1.84296 \times 10^7\}$.

```
Out[*]=  
 $1.5 \times 10^8$ 
```

```
In[*]:=  $tManevr = \text{FindMaximum}[r1 \&\& Tact \leq t \leq Tact + TRa, \{t, Tact + TRa / 4\}][2, 1, 2]$ 
```

найти максимум

InterpolatingFunction: Input value $\{1.84296 \times 10^7\}$ lies outside the range of data in the interpolating function. Extrapolation will be used. 

FindMaximum: The function value -False is not a real number at $\{t\} = \{1.84296 \times 10^7\}$.

```
Out[*]=  
 $1.22864 \times 10^7$ 
```

```
In[*]:=  $r1 /. t \rightarrow tManevr$ 
```

```
Out[*]=  
 $1.5 \times 10^8$ 
```

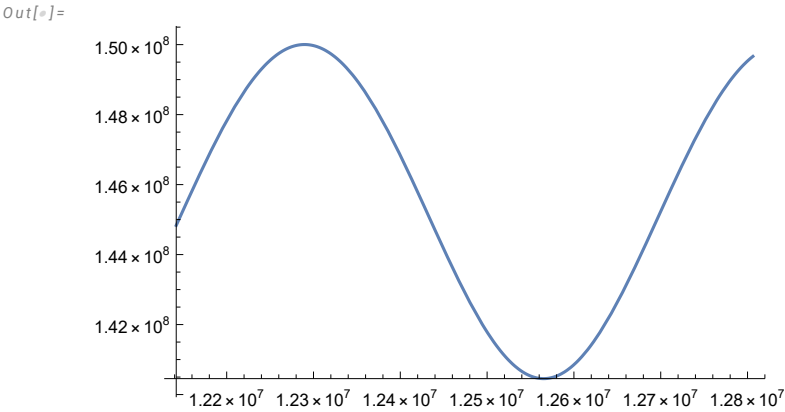
```
In[*]:=  $RpReal = \text{FindMinimum}[r1 \&\& Tact \leq t \leq Tact + TRa, \{t, Tact + 3 * TRa / 4\}][1]$ 
```

найти минимум

FindMinimum: The function value False is not a real number at $\{t\} = \{6.28774 \times 10^6\}$.


```
Out[*]=  
 $1.40491 \times 10^8$ 
```


In[*]:= Plot[r1, {t, Tact, Tk + TRa}]
[график функции]



In[*]:= $\varphi 1 = \text{Solution}[[1, 1, 2]]$

Out[*]=

InterpolatingFunction[ Domain: $\{0., 1.28 \times 10^7\}$ Output: scalar] [t]

In[*]:= $\varphi 1 /. t \rightarrow Tk$

Out[*]=
1711.01

In[*]:= $\varphi 1 / (2 \text{ Pi}) /. t \rightarrow Tk$
[число пи]

Out[*]=
272.316

Параметры получившейся орбиты после активного участка полёта

```

In[*]:= eReal = 
$$\frac{RaReal - RpReal}{RaReal + RpReal}$$

pReal = RpReal * (1 + eReal)
vpReal = 
$$\sqrt{\frac{\mu 1}{pReal}} * (1 + eReal);$$

vaReal = 
$$\sqrt{\frac{\mu 1}{pReal}} * (1 - eReal)$$

ΔvFin =
v3 - vaReal (*Характеристическая скорость, требуемая для выхода на круговую орбиту*)
Out[*]=
0.0327323

Out[*]=
 $1.4509 \times 10^8$ 

Out[*]=
1603.24

Out[*]=
26.8986

In[*]:= mfFin = .

In[*]:= mfFin = Solve[ΔvFin == Jid500 * Log[
$$\frac{m1 + mzevs - \Delta m * Tact}{m1 + mzevs - \Delta m * Tact - mFin}$$
], mFin][[1, 1, 2]]
| решить уравнения | натуральным числам
(*масса рабочего тела для последнего манёвра*)
Out[*]=
14.6794

In[*]:= ΔtFin = mfFin / Δm
Out[*]=
85 630.

In[*]:= ΔtFin / TRa
Out[*]=
0.148108

```

Программа для нахождения времени активного участка полёта

```
In[*]:= step = 10^5;
RightBorder = Tk;
LeftBorder = Tk - step;
TactIter = (LeftBorder + RightBorder) / 2;
mIter[t_] := Piecewise[
  { {m1 + mzevs - Δm * t, t < TactIter}, {m1 + mzevs - Δm * TactIter, t ≥ TactIter} }];
SolutionIter =
  NDSolve[ { r''[t] - r[t] * (φ'[t])^2 == -μ1 / (r[t])^2, 2 * r'[t] * φ'[t] + r[t] * φ''[t] ==
    (F / mIter[t]) * { HeavisideTheta[TactIter - t] t ≠ TactIter
                      0 t == TactIter },
    φ[0] == 0, φ'[0] == ωbo, r[0] == (r3 + hbo), r'[0] == 0 }, {φ[t], r[t]}, {t, 0, Tk + TRa}]
```

Out[*]=

$\{\varphi[t] \rightarrow \text{InterpolatingFunction}[\text{Domain: } \{0., 1.28 \times 10^7\}] [t],$
 $r[t] \rightarrow \text{InterpolatingFunction}[\text{Domain: } \{0., 1.28 \times 10^7\}] [t]\}$

```
In[*]:= rIter = SolutionIter[[1, 2, 2]];
φIter = SolutionIter[[1, 1, 2]];
```

In[*]:=

```
RaIter = FindMaximum[rIter && TactIter ≤ t ≤ TactIter + TRa, {t, TactIter + TRa / 4}] [[1]]
```

InterpolatingFunction: Input value $\{1.84839 \times 10^7\}$ lies outside the range of data in the interpolating function. Extrapolation will be used.

FindMaximum: The function value -False is not a real number at $\{t\} = \{1.84839 \times 10^7\}$.

Out[*]=

1.5221×10^8

```
In[*]:= RpIter = FindMinimum[rIter && TactIter ≤ t ≤ TactIter + TRa, {t, TactIter + 3 * TRa / 4}] [[1]]
```

FindMinimum: The function value False is not a real number at $\{t\} = \{7.35851 \times 10^6\}$.

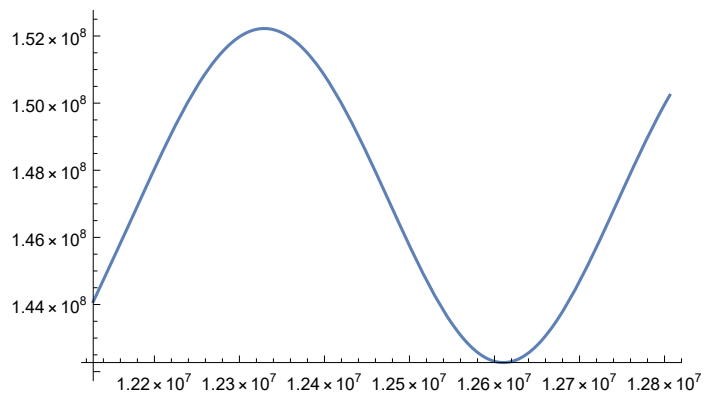
Out[*]=

1.42271×10^8

```
In[*]:= Plot[rIter, {t, LeftBorder, Tk + TRa}]
```

график функции

Out[*]=



```

In[ ]:= While[Not[Ra * (1 - 0.00001) < RaIter < Ra * (1 + 0.00001)],
  [цикл... отрицание
    If[RaIter > Ra, RightBorder = TactIter,
      [условный оператор
        LeftBorder = TactIter
      ];
    TactIter = (LeftBorder + RightBorder) / 2;
    SolutionIter =
      NDSolve[
        {r''[t] - r[t] * (φ'[t])^2 == -μ1 / (r[t])^2, 2 * r'[t] * φ'[t] + r[t] * φ''[t] ==
          [численно решить ДУ
            (F / mIter[t]) * {
              HeavisideTheta[TactIter - t] t ≠ TactIter
              0 t == TactIter
            },
            φ[0] == 0, φ'[0] == ωbo, r[0] == (r3 + hbo), r'[0] == 0},
            {φ[t], r[t]}, {t, 0, Tk + TRa}];
    rIter = SolutionIter[[1, 2, 2]];
    φIter = SolutionIter[[1, 1, 2]];
    RaIter = FindMaximum[rIter && TactIter ≤ t ≤ TactIter + TRa, {t, TactIter + TRa / 4}][[1]];
    [найти максимум
    RpIter = FindMinimum[rIter && TactIter ≤ t ≤ TactIter + TRa, {t, TactIter + 3 * TRa / 4}][[1]];
    [найти минимум
  ]

```

... InterpolatingFunction: Input value $\{1.84464 \times 10^7\}$ lies outside the range of data in the interpolating function. Extrapolation will be used. ⓘ

... FindMaximum: The function value -False is not a real number at $\{t\} = \{1.84464 \times 10^7\}$.

... FindMinimum: The function value False is not a real number at $\{t\} = \{6.29333 \times 10^6\}$.

... InterpolatingFunction: Input value $\{1.84276 \times 10^7\}$ lies outside the range of data in the interpolating function. Extrapolation will be used. ⓘ

... FindMaximum: The function value -False is not a real number at $\{t\} = \{1.84276 \times 10^7\}$.

... FindMinimum: The function value False is not a real number at $\{t\} = \{6.28708 \times 10^6\}$.

... InterpolatingFunction: Input value $\{1.8437 \times 10^7\}$ lies outside the range of data in the interpolating function. Extrapolation will be used. ⓘ

... General: Further output of InterpolatingFunction::dmval will be suppressed during this calculation. ⓘ

... FindMaximum: The function value -False is not a real number at $\{t\} = \{1.8437 \times 10^7\}$.

... General: Further output of FindMaximum::nrnum will be suppressed during this calculation. ⓘ

... FindMinimum: The function value False is not a real number at $\{t\} = \{6.29021 \times 10^6\}$.

... General: Further output of FindMinimum::nrnum will be suppressed during this calculation. ⓘ

In[]:= TactIter

Out[]:=

1.21419×10^7

```
In[*]:= RaIter
```

```
Out[*]=
```

1.5×10^8

Расчёт траекторий с “округлением” конечной орбиты

```
mWM[t_] := Piecewise[{
  |кусочно-заданная функция
  {m1 + mzevs - Δm * t, t < Tact},
  {m1 + mzevs - Δm * Tact, Tact ≤ t < (tManevr - ΔtFin / 2)},
  {m1 + mzevs - Δm * Tact - Δm * (t - (tManevr - ΔtFin / 2)),
   (tManevr - ΔtFin / 2) ≤ t < (tManevr + ΔtFin / 2)},
  {m1 + mzevs - Δm * Tact - mfFin, t ≥ (tManevr + ΔtFin / 2)}
}] (*Закон изменения массы*)
(*, {1, tManevr - ΔtFin / 2 ≤ t < tManevr + ΔtFin / 2}, {0, t ≥ tManevr + ΔtFin / 2} *)
```

```
In[*]:= mWM[1.2329218768892493`*^7 - 10^-10]
```

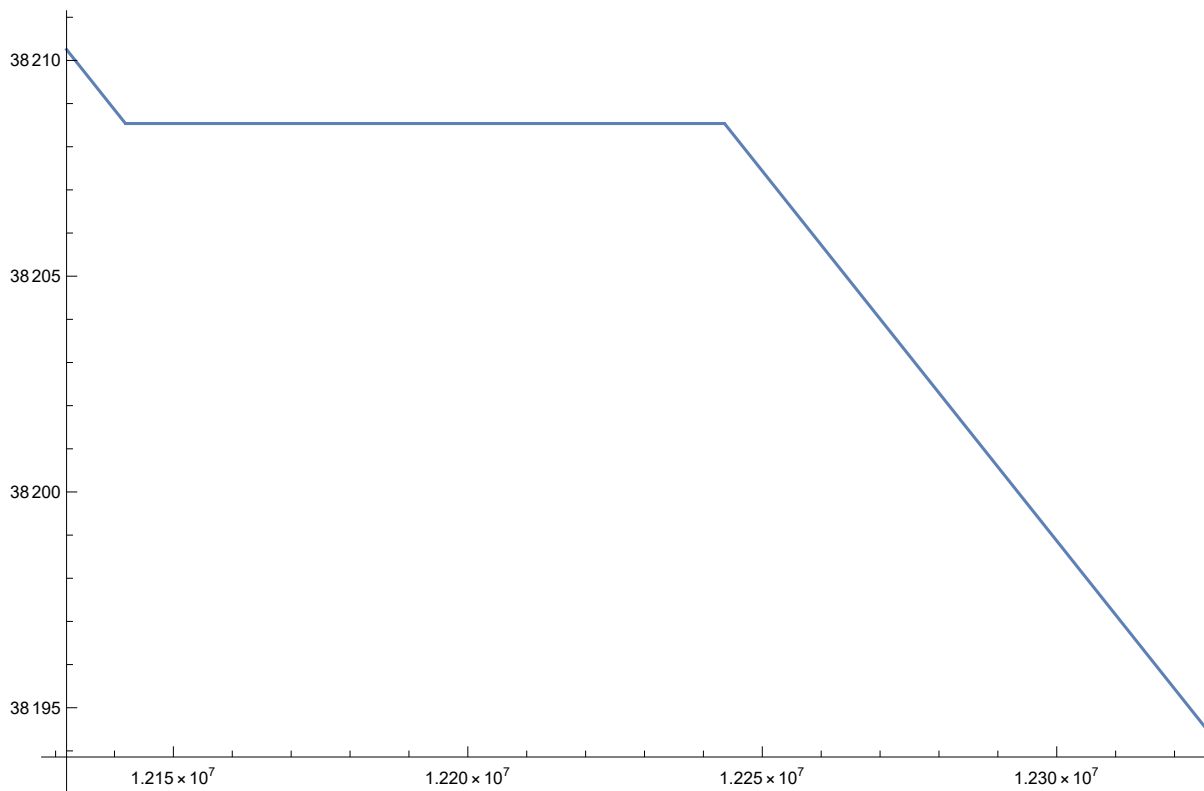
```
Out[*]=
```

38193.9

```
In[*]:= Plot[mWM[t], {t, Tact - 10000, tManevr + ΔtFin / 2 + 10000}]
```

|график функции

```
Out[*]=
```



```

In[*]:= SolutionWManevr =
  NDSolve[{r''[t] - r[t] * (φ'[t])^2 == -μ1 / (r[t])^2, 2 * r'[t] * φ'[t] + r[t] * φ''[t] ==
    численно решить ДУ
    (F / m[t]) * Piecewise[{ {1, (t < Tact || tManevr - ΔtFin / 2 ≤ t < tManevr + ΔtFin / 2)},
      кусочно-заданная функция
      {0, (Tact ≤ t < tManevr - ΔtFin / 2) || (t ≥ tManevr + ΔtFin / 2)} }],
    φ[0] == 0, φ'[0] == ωbo, r[0] == (r3 + hbo), r'[0] == 0}, {φ[t], r[t]}, {t, 0, Tk + 2 TRa}]

```

Out[*]=

```

{ { φ[t] → InterpolatingFunction[
  { Domain: {{0., 1.34 × 107}}
    Output: scalar
  ] [t],

  r[t] → InterpolatingFunction[
  { Domain: {{0., 1.34 × 107}}
    Output: scalar
  ] [t] } }

```

```

In[*]:= rFin = SolutionWManevr[[1, 2, 2]];
φFin = SolutionWManevr[[1, 1, 2]];

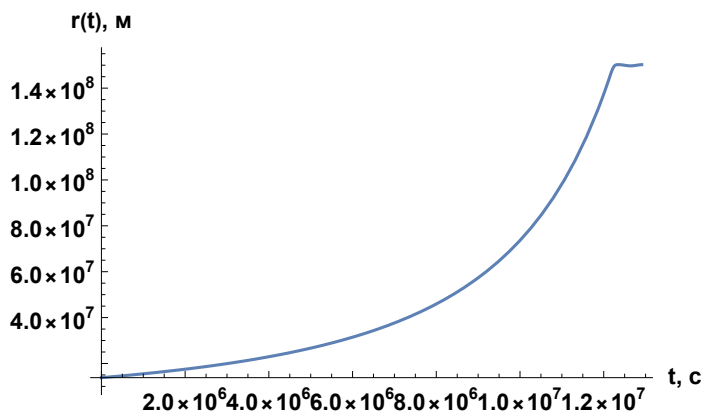
```

```

In[*]:= Plot[rFin, {t, 0, tManevr + ΔtFin / 2 + TRa},
  график функции
  LabelStyle → Directive[Black, Bold, Medium], AxesLabel → {"t, c", "r(t), м"}]
  стиль отметки директива чёрный жир... средний обозначения на осях

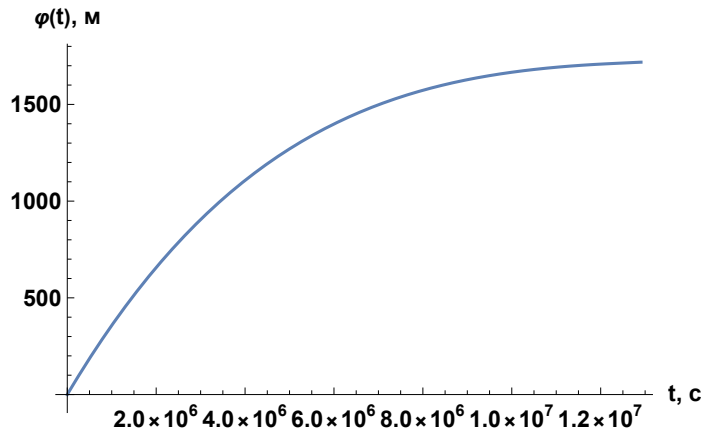
```

Out[*]=



```
In[*]:= Plot[φFin, {t, 0, tManevr + ΔtFin / 2 + TRa},
  график функции
  LabelStyle → Directive[Black, Bold, Medium], AxesLabel → {"t, c", "φ(t), м"}]
  стиль отметки | директива | чёрный | жир... | средний | обозначения на осях
```

Out[*]=



```
In[*]:= ActTrajectory1 =
  ParametricPlot[Evaluate[{r[t] * Cos[φ[t]], r[t] * Sin[φ[t]]} /. SolutionWManevr],
  график параметр... | вычислить | косинус | синус
  {t, 0, Tact}, PlotStyle → {Red, Thickness[0.001]}];
  стиль графика | кр... | толщина
```

```
In[*]:= PassTrajectory1 =
  ParametricPlot[Evaluate[{r[t] * Cos[φ[t]], r[t] * Sin[φ[t]]} /. SolutionWManevr],
  график параметр... | вычислить | косинус | синус
  {t, Tact, tManevr - ΔtFin / 2}, PlotStyle → {RGBColor[0., 0.82, 0.27],
  стиль графика | цвет RGB
  Dashing[0.015, 0.015], Thickness[0.0017]}], PlotLegends → Automatic];
  разбиение шриха | толщина | легенды графика | автоматический
```

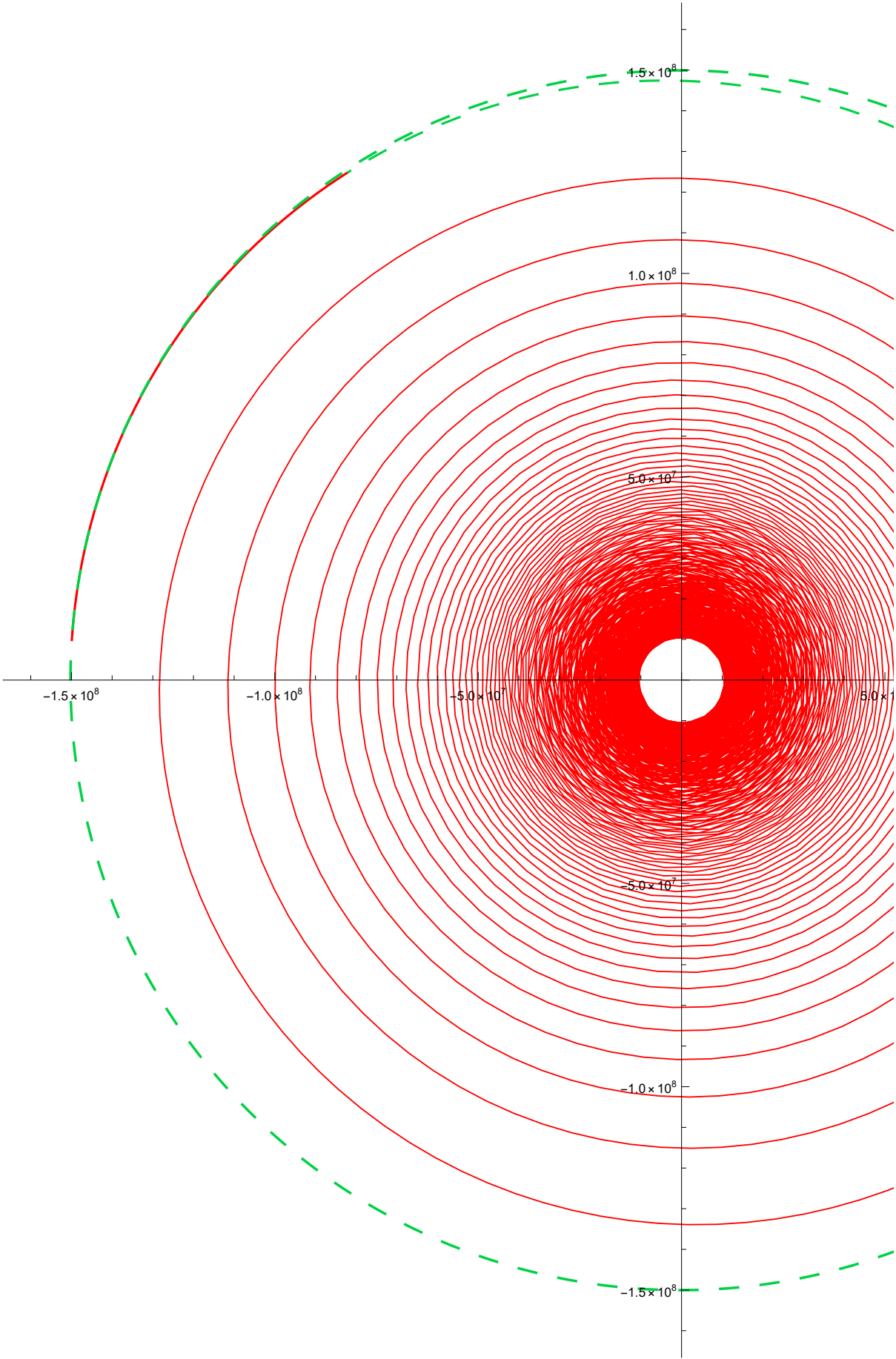
```
ManevrTrajectory =
  ParametricPlot[Evaluate[{r[t] * Cos[φ[t]], r[t] * Sin[φ[t]]} /. SolutionWManevr],
  график параметр... | вычислить | косинус | синус
  {t, tManevr - ΔtFin / 2, tManevr + ΔtFin / 2}, PlotStyle → {Red, Thickness[0.0017]}];
  стиль графика | кр... | толщина
```

```
PassTrajectory2 =
  ParametricPlot[Evaluate[{r[t] * Cos[φ[t]], r[t] * Sin[φ[t]]} /. SolutionWManevr],
  график параметр... | вычислить | косинус | синус
  {t, tManevr + ΔtFin / 2, tManevr + ΔtFin / 2 + TRa},
  PlotStyle → {RGBColor[0., 0.82, 0.27], Dashing[0.015, 0.015], Thickness[0.0019]},
  стиль графика | цвет RGB | разбиение шриха | толщина
  PlotLegends → Automatic];
  легенды графика | автоматический
```

```
PointOff = Graphics[Point[{rFin * Cos[φFin], rFin * Sin[φFin]}]] /. t → Tact;
  графика | точка | косинус | синус
```

```
In[*]:= Show[ActTrajectory1, ManevrTrajectory,
  показать
  PassTrajectory1, PassTrajectory2, PointOff, PlotRange → All]
  отображаемы... | всё
```

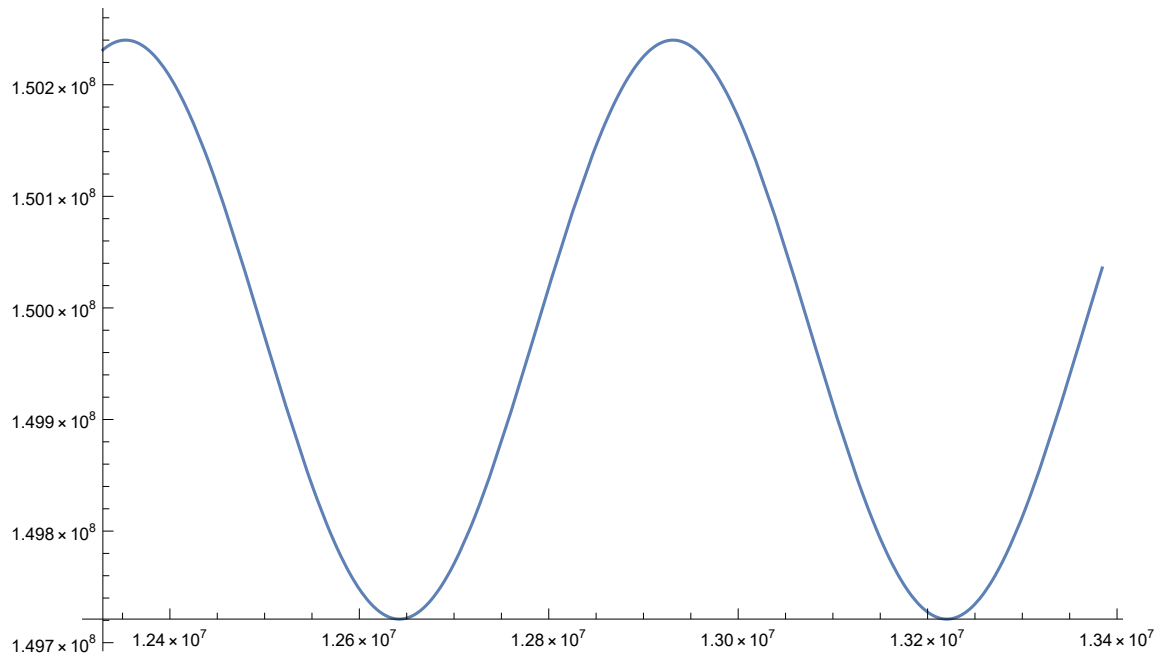

Out[]=



In[]:= **Plot[rFin, {t, tManevr + ΔtFin / 2, Tk + 2 TRa}]**

⌈график функции

Out[]:=



In[]:= **tManevr + ΔtFin / 2**

Out[]:=

1.23292×10^7

In[]:= **2 TRa**

Out[]:=

1.15632×10^6

In[]:= **RpFin = FindMinimum[rFin && tManevr + ΔtFin / 2 ≤ t ≤ tManevr + ΔtFin / 2 + TRa,**

⌈найти минимум

{t, tManevr + ΔtFin / 2 + TRa / 2}] [[1]]

⋯ InterpolatingFunction: Input value $\{1.72083 \times 10^7\}$ lies outside the range of data in the interpolating function. Extrapolation will be used. ⓘ

⋯ FindMinimum: The function value False is not a real number at $\{t\} = \{1.72083 \times 10^7\}$.

Out[]:=

1.4973×10^8

In[]:= **RaFin = FindMaximum[rFin && tManevr + ΔtFin / 2 + TRa / 2 ≤ t ≤ tManevr + ΔtFin / 2 + 3 TRa / 2,**

⌈найти максимум

{t, tManevr + ΔtFin / 2 + TRa}] [[1]]

⋯ InterpolatingFunction: Input value $\{1.75606 \times 10^7\}$ lies outside the range of data in the interpolating function. Extrapolation will be used. ⓘ

⋯ FindMaximum: The function value -False is not a real number at $\{t\} = \{1.75606 \times 10^7\}$.

Out[]:=

1.50231×10^8

```
In[*]:= tManevr + ΔtFin / 2 + TRa / 2
```

```
Out[*]=  
1.26183 × 107
```

Параметры финальной орбиты

```
In[*]:= eFin = 
$$\frac{RaFin - RpFin}{RaFin + RpFin}$$

```

```
0.00167163
```

Вековые уходы наклона орбиты i и эксцентриситета e

```
In[*]:= ivosto = (51.88) * 
$$\frac{\pi}{180}$$
;
```

```
ω = π / 4;
```

```
Rekv = 6378 * 103;
```

```
ξm = 0.56 * 10−7 * 
$$\left(\frac{Ra}{2 * Rekv}\right)^3$$
;
```

```
ξs = 0.26 * 10−7 * 
$$\left(\frac{Ra}{2 * Rekv}\right)^4$$
;
```

```
Ts = 365.256 * 24 * 3600; (*Период "оборота" Солнца вокруг Земли в секундах*)
```

```
Tm = 27.322 * 24 * 3600; (*Период оборота Луны вокруг Земли в секундах*)
```

```
In[*]:= δi = 
$$\frac{-15}{8} * \frac{\pi}{\sqrt{1 - eFin^2}} * (\xi s + \xi m) * eFin^2 * \sin[2 * ivosto] * \sin[2 * \omega] / \text{Degree} // N$$

```

```
(*Вековой уход наклона орбиты за один оборот станции*)
```

```
δe = 
$$\frac{15}{4} * \pi * (\xi s + \xi m) * eFin * \sqrt{1 - eFin^2} * \sin[ivosto]^2 * \sin[2 * \omega]$$

```

```
(*Вековой уход эксцентриситета за один оборот станции*)
```

```
Out[*]=  
−5.38809 × 10−7
```

```
Out[*]=  
7.16946 × 10−6
```

```
In[*]:= Tworking = 20 * Ts; (*20 лет будет работать станция в секундах*)
```

```
δitotal = δi * 
$$\frac{Tworking}{TRa} / \text{Degree} // N$$

```

```
δetotal = δe * 
$$\frac{Tworking}{TRa}$$

```

```
Out[*]=  
−0.0337016
```

```
Out[*]=  
0.00782672
```

```
In[*]:= 1.2329218703937775`*^7 / 3600 / 24
```

```
Out[*]=  
142.699
```

```
In[*]:= ϕFin / (2 Pi) /. t → 1.2329218703937775`*^7  
└число пи
```

```
Out[*]=  
272.49
```

```
In[*]:= Rvek =
```

```
Solve[0.00782671645632294` + eFin ==  $\frac{Ra1 - Rp1}{Ra1 + Rp1}$  && Ra1 + Rp1 == RaFin + RpFin, {Ra1, Rp1}]  
└решить уравнения
```

⋯ Solve: Solve was unable to solve the system with inexact coefficients. The answer was obtained by solving a corresponding exact system and numericizing the result.

```
Out[*]=  
{ {Ra1 → 1.51405 × 108, Rp1 → 1.48556 × 108 } }
```

```
In[*]:= Ra1 = Rvek[[1, 1, 2]]
```

```
Out[*]=  
1.51405 × 108
```

```
In[*]:= Rp1 = Rvek[[1, 2, 2]]
```

```
Out[*]=  
1.48556 × 108
```

```
In[*]:= evek =  $\frac{Ra1 - Rp1}{Ra1 + Rp1}$  ;
```

```
pvek = Rp1 * (1 + evek) ;
```

```
vAvek =  $\sqrt{\frac{\mu1}{pvek}}$  * (1 - evek)
```

```
evek1 =  $\frac{Ra1 - Ra}{Ra1 + Ra}$  ;
```

```
pvek1 = Ra * (1 + evek1) ;
```

```
vAvek1 =  $\sqrt{\frac{\mu1}{pvek1}}$  * (1 - evek1)
```

```
Δv1vek = vAvek1 - vAvek
```

```
Out[*]=  
1614.83
```

```
Out[*]=  
1618.76
```

```
Out[*]=  
3.93752
```

```
In[*]:= Δvturn = Sqrt[2 * v32 * (1 - Cos[-0.033701619126163686` * Degree])]  
└квадратный корень └косинус └градус
```

```
Out[*]=  
0.958852
```

```
In[*]:= Solve[0.9588515671870977` + 3.93751655534993` == 3000 * Log[ $\frac{40000 + mpodd}{40000}$ ], mpodd]
```

```
Out[*]=
```

$$\{\{mpodd \rightarrow 65.3382\}\}$$

```
In[*]:= Solve[0.9588515671870977` + 3.93751655534993` == 3000 * Log[ $\frac{40000 + mpodd}{40000}$ ], mpodd]
```

```
Out[*]=
```

$$\{\{mpodd \rightarrow 65.3382\}\}$$

```
In[*]:= Δm * Tact + mfFin
```

```
Out[*]=
```

$$2096.14$$