

МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Факультет «Специальное машиностроение»  
Кафедра «Динамика и управление полетом  
ракет и космических аппаратов»

## **«Разработка алгоритма расчёта траектории движения ЛА методом Эйлера»**

Студент: Марков Данил Максимович  
Группа: СМ2-51

Преподаватель: Чудинова Ольга Николаевна

Дата:

Подпись:

## Оглавление

<b>1. Постановка задачи, математическая модель, исходные данные. ....</b>	<b>3</b>
<b>2. Алгоритм расчета параметров траектории методом Эйлера. ....</b>	<b>6</b>
<b>3. Описание и листинг программы.....</b>	<b>7</b>
<b>4. Результаты расчетов .....</b>	<b>21</b>
<b>5. Выводы.....</b>	<b>40</b>

# 1. Постановка задачи, математическая модель, исходные данные.

## *Постановка задачи*

Для заданных конструктивно-баллистических параметров ЛА и начальных условий определить параметры движения летательного аппарата (ЛА) на активном и пассивном участке траектории (АУТ и ПУТ), полученные с помощью численного интегрирования заданной математической модели.

## *Физическая модель.*

На активном участке траектории на ЛА действует следующая система сил: тяга  $P$ , аэродинамическая сила  $Ra$  и сила притяжения  $mg$ . Характеристики атмосферы задаются эмпирическими функциями и по ГОСТ 4401-81. Движение происходит в плоскости  $OX_cY_c$  стартовой системы координат. Гравитационное поле Земли – однородное.

Необходимо для закона изменения угла атаки  $\alpha = \vartheta - \theta_c$  с помощью интегрирования уравнений движения методом Эйлера с шагом интегрирования 0,1; 0,01; 0,001 определить элементы траектории ЛА.

## *Математическая модель.*

Запишем законы определяющие параметры движения летательного аппарата:

1. Закон управления:  $\alpha = \vartheta - \theta_c$  (1.1)

2. Основное уравнение динамики движения центра масс в проекции на трансверсальную ось связанной системы координат:

$$m \frac{dV}{dt} = P \cos \alpha - X_\alpha - m \cdot g(y) \sin \theta_c,$$

или

$$\frac{dV}{dt} = \frac{P \cos \alpha - X_\alpha}{m} - g(y) \sin \theta_c \quad (1.2)$$

3. Основное уравнение динамики движения центра масс в проекции на нормальную ось связанной системы координат:

$$mV \frac{d\theta_c}{dt} = P \sin \alpha + Y_\alpha - m \cdot g(y) \cos \theta_c$$

или

$$\frac{d\theta_c}{dt} = \frac{P \sin \alpha + Y_\alpha}{mV} - \frac{g(y) \cos \theta_c}{V} \quad (1.3)$$

4. Проекция скорости ЛА на ось  $OX_C$  стартовой системы координат:

$$\frac{dx}{dt} = V \cos(\theta_c) \quad (1.4)$$

5. Проекция скорости ЛА на ось  $OY_C$  стартовой системы координат:

$$\frac{dy}{dt} = V \sin(\theta_c) \quad (1.5)$$

6. Уравнение динамики вращательного движения ЛА вокруг центра масс:

$$J_z \frac{d\omega_z}{dt} = M_z^\alpha \cdot \alpha,$$

или

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{M_z^\alpha}{J_z} \alpha \quad (1.6)$$

7. Из кинематических уравнений Эйлера получим

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega_z \quad (1.7)$$

В итоге получили 6 дифференциальных уравнений (1.2) - (1.7) и закон управления (1.1), в которых:

$$P = P_0 + S_\alpha p_{oN}(1 - \pi(y)), \text{ Н}$$

$$\pi(y) = (1 - 2,26 \cdot 10^{-5} y)^{5,2559}$$

$$P_0 = 2100 \dot{m}, \text{ Н}$$

$$m = m_0 - \dot{m}t, \text{ кг}$$

$$X_\alpha = C_{x\alpha}(M) S_m \frac{\rho_{oN} \cdot H(y)}{2} V^2, \text{ Н}$$

$$Y_\alpha = C_{y\alpha}^\alpha(M) \alpha S_m \frac{\rho_{oN} \cdot H(y)}{2} V^2, \text{ Н}$$

$$M_z^\alpha = -(C_{x\alpha}(M) + C_{y\alpha}^\alpha(M) \alpha) S_m \frac{\rho_{oN} \cdot H(y)}{2} V^2 (l_d - l_c), \text{ Нм}$$

$$H(y) = (1 - 2,26 \cdot 10^{-5} y)^{4,2559}$$

$$M = \frac{V}{a(y)}$$

$$a(y) = 20,0468\sqrt{T_{oN} - 0,0065y}, \text{ м/с}$$

$$g(y) = g_{oN} \left( \frac{r}{r+y} \right)^2$$

Где  $V$  – скорость ЛА;  $x, y$  – координаты центра масс ЛА в стартовой системе координат;  $X_\alpha, Y_\alpha$  – проекции аэродинамической силы на оси скоростной системы координат;  $M_z^\alpha$  – градиент статического аэродинамического момента относительно связанной оси  $z$  ЛА;  $P$  – сила тяги;  $\alpha, \vartheta, \theta_c$  – углы атаки, тангажа, наклона траектории;  $M$  – число маха;  $H(y), \pi(y)$  – эмпирические формулы безразмерных функций изменения давления и плотностей с высотой;  $g(y)$  – ускорение свободного падения по ГОСТ 4401-81.

### Исходные данные:

$V_0 = 53 \text{ м/с}$  – начальная скорость ЛА;

$\theta_{c0} = 48 \text{ град}$  – начальный угол наклона траектории;

$\dot{m} = 83 \text{ кг/с}$  – массовый секундный расход топлива;

$y_0 = 3350 \text{ м}$  – начальная высота полета;

$\omega_{z0} = 0 \text{ с}^{-1}$  – начальная угловая скорость вращения ЛА относительно связанной оси  $z$ ;

$\vartheta_0 = \theta_{c0}$ , град – начальный угол тангажа;

$t_0 = x_0 = 0$ ;

$t_k = 4,73 \text{ с}$  – продолжительность активного участка;

$m_0 = 1160 \text{ кг}$  – начальная масса ЛА;

$J_z = 120 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  – момент инерции ЛА относительно связанной оси  $z$ ;

$l_d - l_c = 0,22 \text{ м}$  – расстояние от центра давления до центра масс ЛА;

$S_a = 0,15 \text{ м}^2$  – площадь выходного сечения сопла двигателя;

$S_m = 0,2289 \text{ м}^2$  – характерная площадь ЛА;

$C_{xa}(M), C_{ya}^\alpha(M)$  – аэродинамические функции, заданные таблицами 1 и 2.

$\rho_{oN} = 1.225 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха у поверхности;

$p_{oN} = 101325 \text{ Па}$  – нормальное давление у поверхности;

$T_{oN} = 288.15 \text{ К}$  – температура воздуха у поверхности;

$g_{oN} = 9,80665 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения при  $y = 0$ ;

$r = 6356767 \text{ м}$  – радиус Земли;

Таблица 1

Зависимость аэродинамического коэффициента  $C_{xa}(M)$

$M$	0,01	0,55	0,8	0,9	1,0	1,06	1,1	1,2	1,3	1,4	2,0	2,6	3,4	6,0	10,0
$C_{xa}(M)$	0,30	0,30	0,55	0,70	0,84	0,86	0,87	0,83	0,80	0,79	0,65	0,55	0,50	0,45	0,40

Таблица 2

Зависимость аэродинамического коэффициента  $C_{ya}^\alpha(M)$

$M$	0,01	0,55	0,8	0,9	1,0	1,06	1,1	1,2	1,3	1,4	2,0	2,6	3,4	6,0	10,0
$C_{ya}^\alpha(M)$	0,25	0,25	0,25	0,20	0,30	0,31	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Значения  $C_{xa}(M)$  и  $C_{ya}^\alpha(M)$  определяются из табл.1 и табл.2 методом линейной интерполяции.

## 2. Алгоритм расчета параметров траектории методом Эйлера.

По условию необходимо решать систему дифференциальных уравнений (1.2) - (1.7) методом Эйлера. Для этого:

- 1) Вычисляем каждые из значения производных (1.2) - (1.7) для прошлых (вычисленных в предыдущем шаге) значений параметров движения ЛА (скорости ЛА, угла наклона траектории, высоты полета и т.д.). В случае первого шага интегрирования прошлыми являются начальные значения параметров траектории.
- 2) Вычисляем новое значение основных параметров траектории ЛА ( $V, \theta_c, x, y, \omega_z, \vartheta$ ), соответствующих времени  $t = t_n + \Delta t$ , где  $\Delta t$  – шаг интегрирования,  $t_n$  – время соответствующее предыдущему шагу интегрирования (для первого шага  $t_n = t_0$ ). Каждый из них получаются путем суммирования прошлого значения параметра с произведением соответствующей этому параметру производной по времени, вычисленной в предыдущем пункте, на шаг интегрирования.

3) Для следующего шага интегрирования значения параметров траектории ЛА, вычисленные в предыдущем пункте, являются прошлыми.

Повторяя пункты 1-3 до тех пор пока  $y > 0$ , получим для каждого параметра  $V, \theta_c, x, y, \omega_z, \vartheta$  множество значений соответствующих определенному времени  $t = t_{\pi} + n \cdot \Delta t$ , где  $n$  – номер шага интегрирования для которого получено значение параметра.

### 3. Описание и листинг программы

Программа для расчета составлена в среде Wolfram Mathematica

1) Описание функций:

- Функция определения массы ЛА в зависимости от времени с начала отсчёта. При времени  $t > t_k$  масса аппарата будет равна  $m = m_0 - \dot{m}t_k$ .

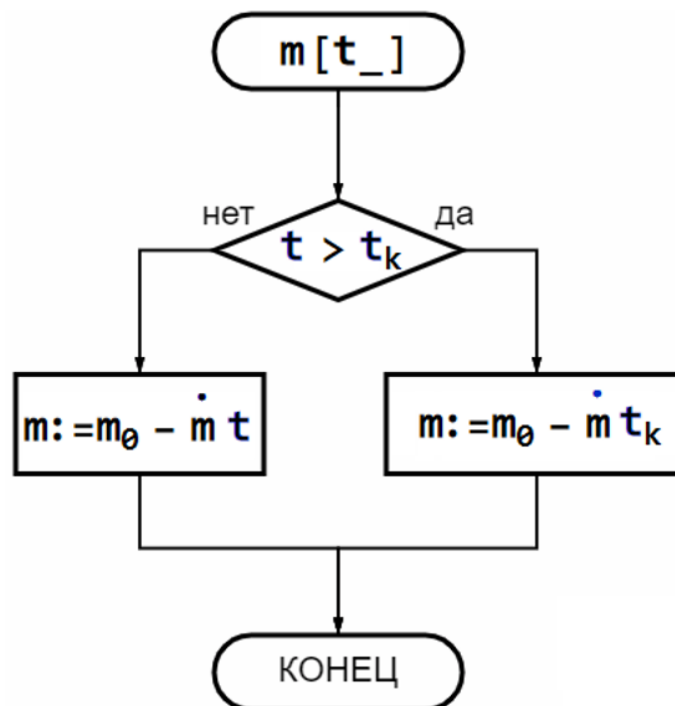


Рис. 3.1 Функция определения массы ЛА

- Функция определения тяги двигателя ЛА в зависимости от времени с начала отсчёта и высоты подъема ЛА. При времени  $t > t_k$  тяга двигателя равна 0.

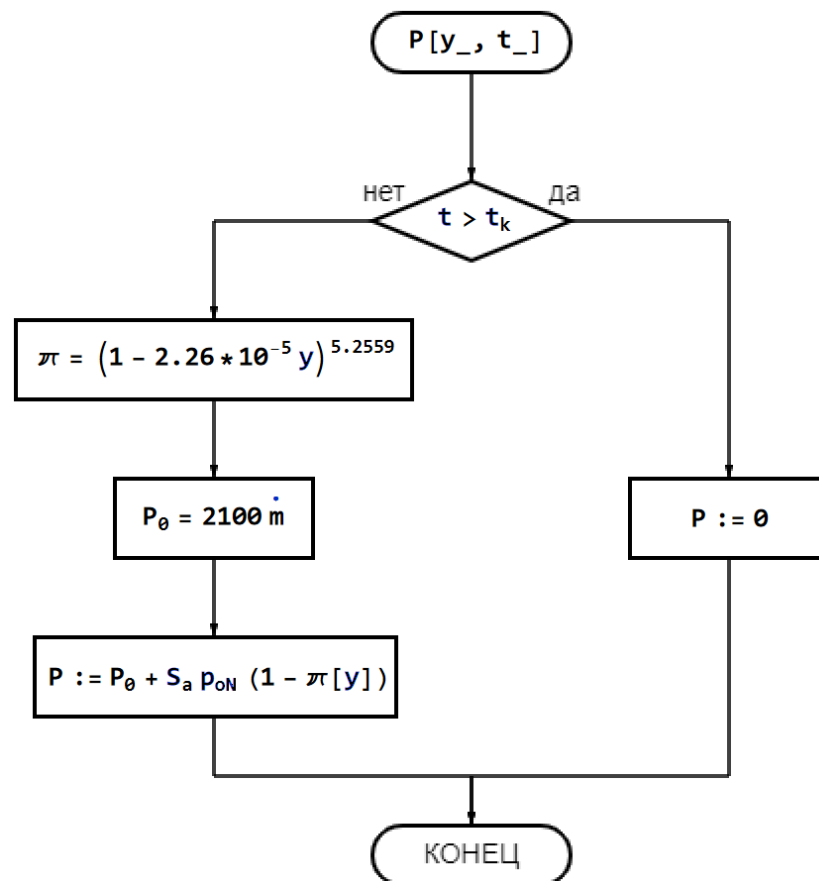


Рис. 3.2 Функция определения тяги двигателя ЛА

- Функция для определения числа Маха по скорости ЛА и высоте подъема ЛА. Определяется скорость звука на определенной высоте равной высоте подъема ЛА, и по найденному значению скорость звука и скорости ЛА считается число Маха.

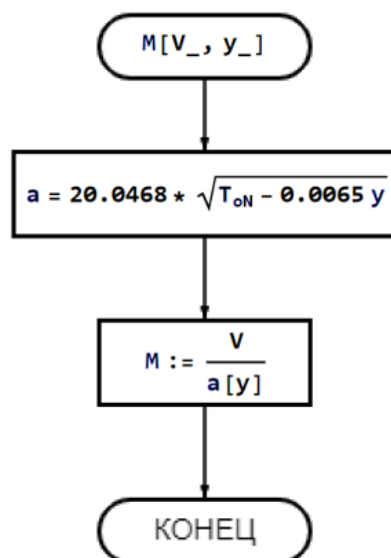


Рис. 3.3 Функция для определения числа Маха



- Функция для определения ускорения свободного падения на определенной высоте равной высоте подъема ЛА, которое находится по формуле из ГОСТ 4401-81.

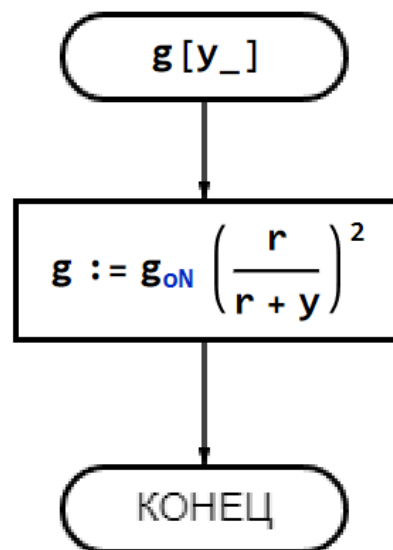


Рис. 3.4 Функция для определения ускорения свободного падения

- Функция для определения безразмерной функций изменения плотности по высоте.

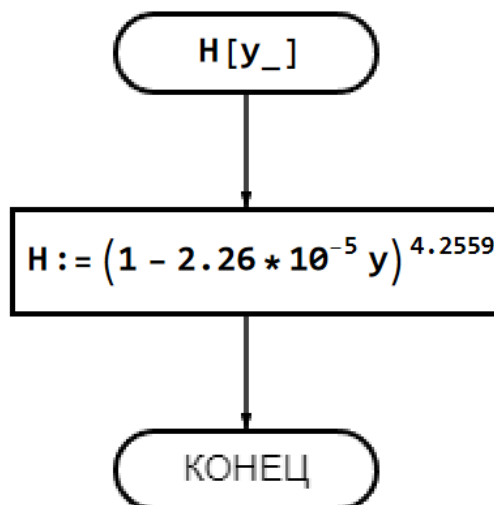


Рис. 3.5 Функция для  $H(y)$

- Функция необходимая для интерполяции данных таблицы 1, определяющая по числу Маха номер столбца таблицы 1 соответствующий интервалу последующей интерполяции. Функция ищет номер интервала  $i$ , в который попадает заданное число Маха для ЛА. Тогда отрезок интерполяции будет лежать между  $i$  - той и  $i+1$  – ой точкой. Предварительно определяется число точек  $n1$ , заданных таблицей 1.

Для таблицы 2 функция аналогична, называется  $\text{arg2}[M\_]$ , количество точек  $n2$ , вместо “tab1” – “tab2”

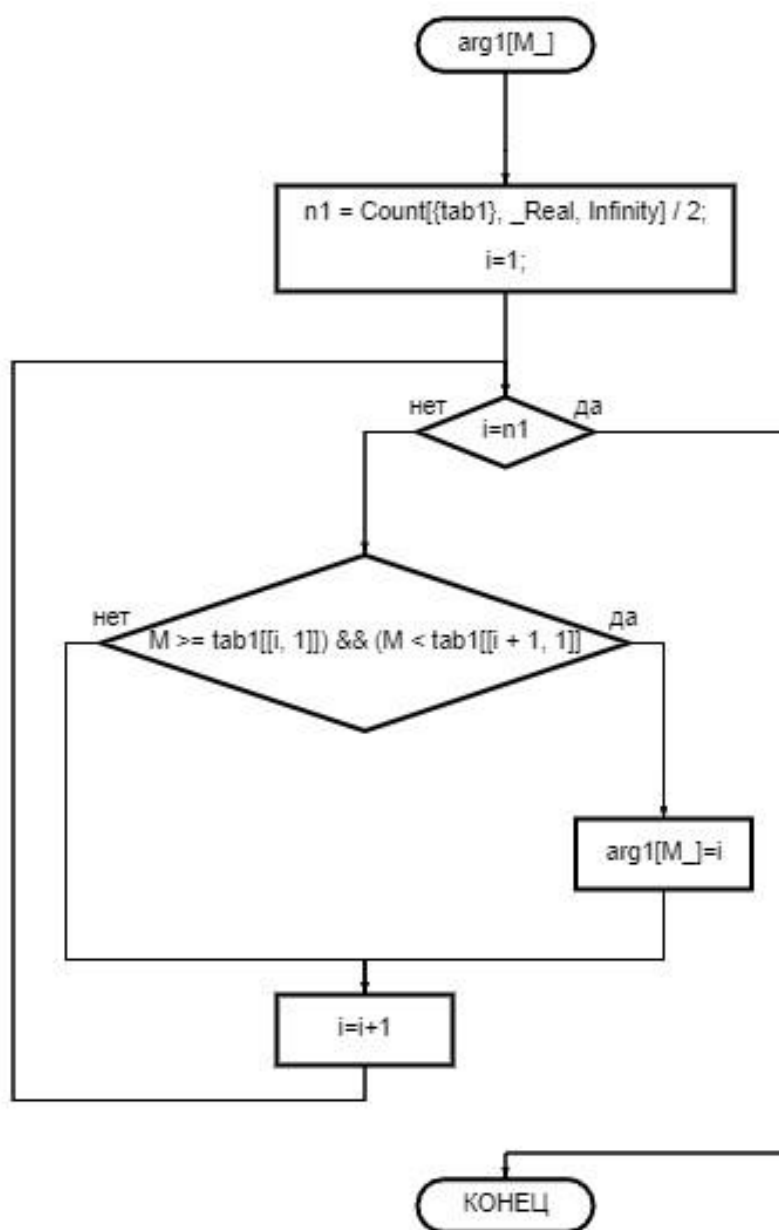


Рис. 3.6 Вспомогательная функция для интерполяции

- Функция для линейной интерполяции значений коэффициента  $C_{xa}(M)$  определяемых по таблице 1. Определяет промежуточное значение коэффициента  $C_{xa}(M)$ , для этого с помощью предыдущей функции определяется отрезок интерполяции, и считается значение коэффициента  $C_{xa}(M)$ . При граничных значениях числа Маха, а также для значений, выходящих за граничные, коэффициент  $C_{xa}(M)$  берётся на линии, проходящей через ближайшие две крайние точки.

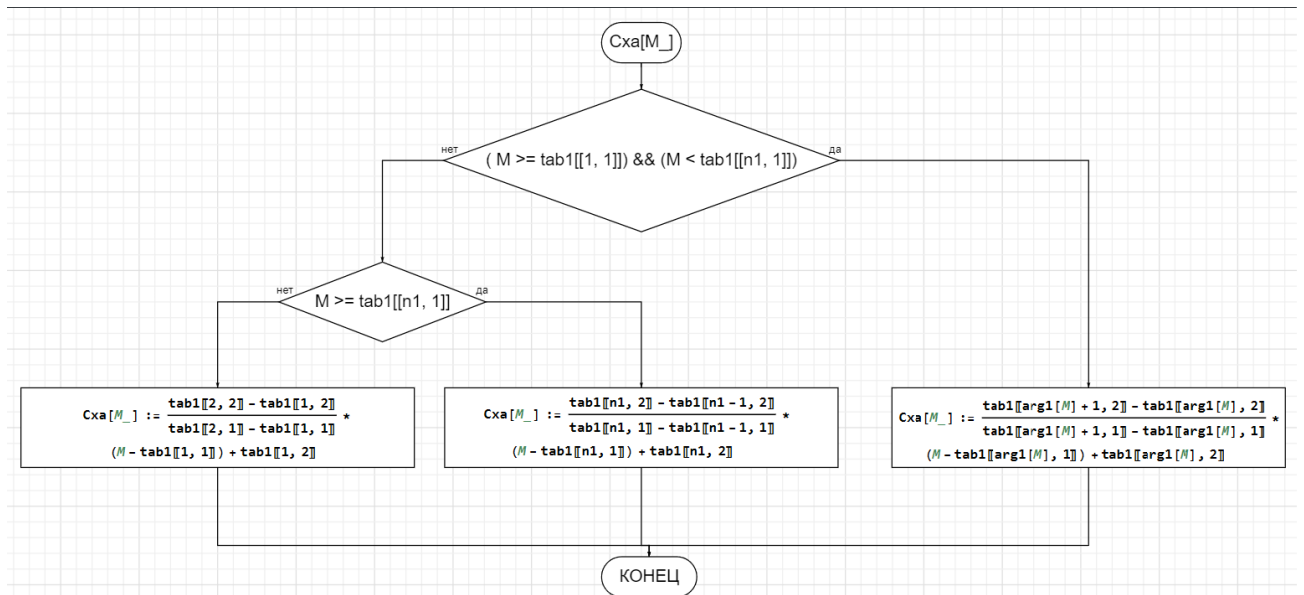


Рис. 3.7 Функция для линейной интерполяции  $C_{xa}(M)$

- Функция для линейной интерполяции значений коэффициента  $C_{ya}^a(M)$  определяемых по таблице 2. Определяет промежуточное значение коэффициента  $C_{xa}(M)$  аналогично функции выше. Вместо “tab1” – “tab2”, вместо “arg1” – “arg2”, вместо “n1” – “n2”

- Функция для определения проекции аэродинамической силы на ось  $X_\alpha$  скоростной системы координат.

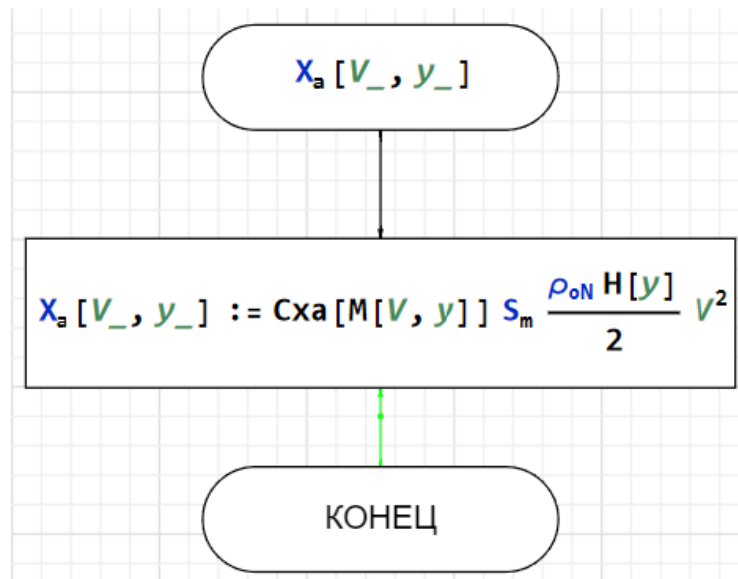


Рис. 3.8 Функция для определения  $X_\alpha$

- Функция для определения проекции аэродинамической силы на ось  $Y_\alpha$  скоростной системы координат.

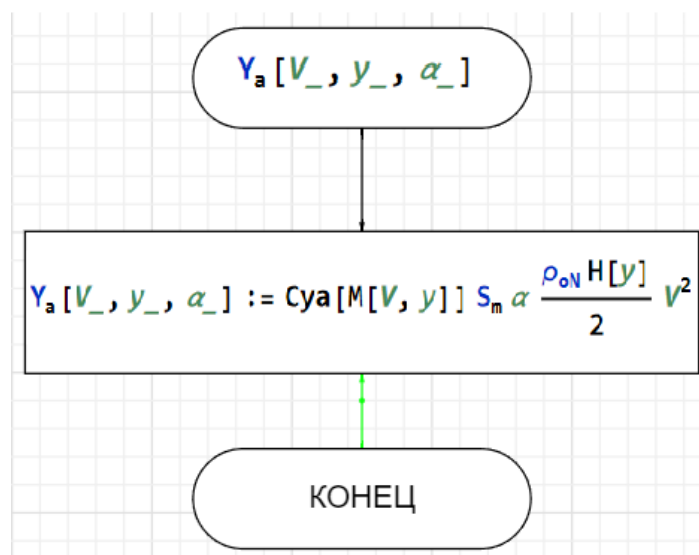


Рис. 3.9 Функция для определения  $Y_\alpha$

- Функция для определения градиента статического аэродинамического момента относительно связанной оси  $z$  ЛА.

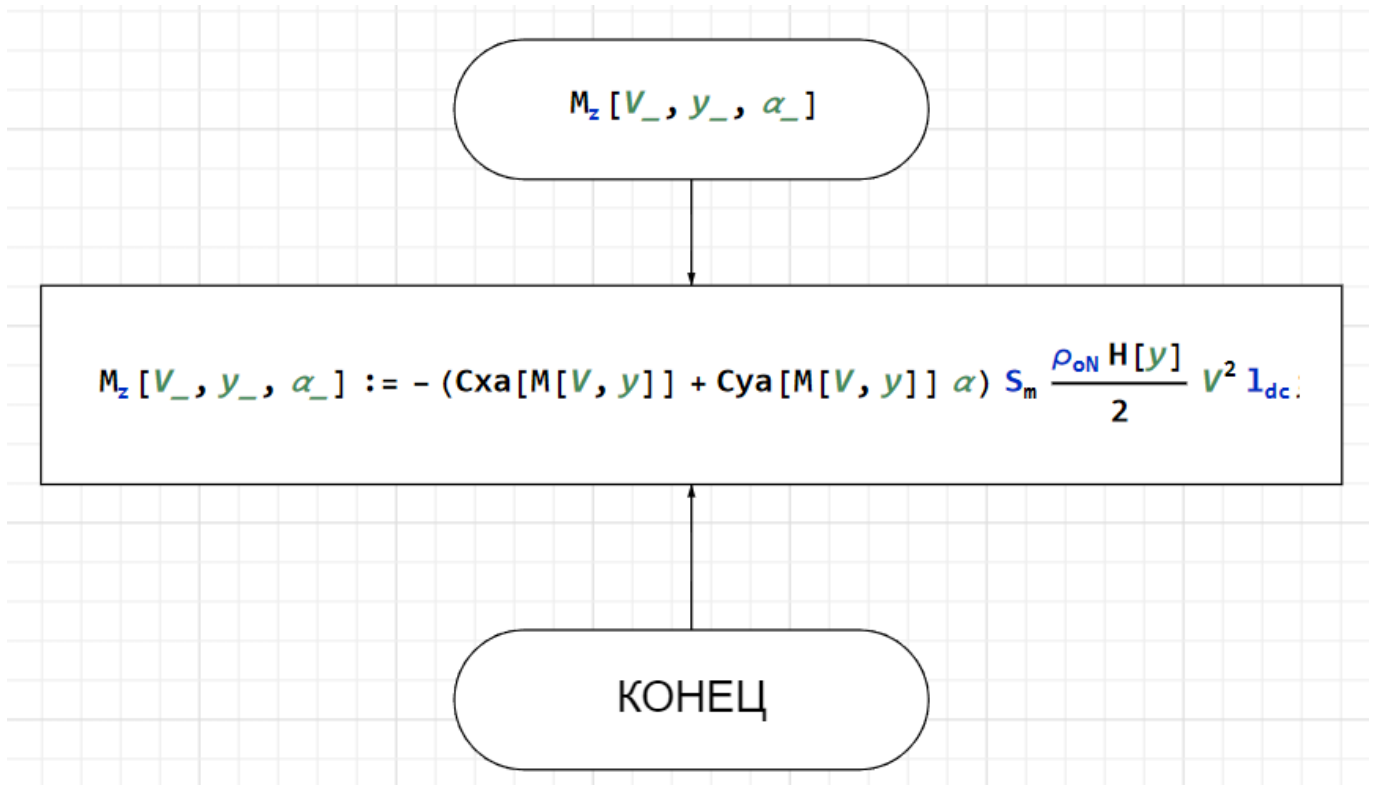
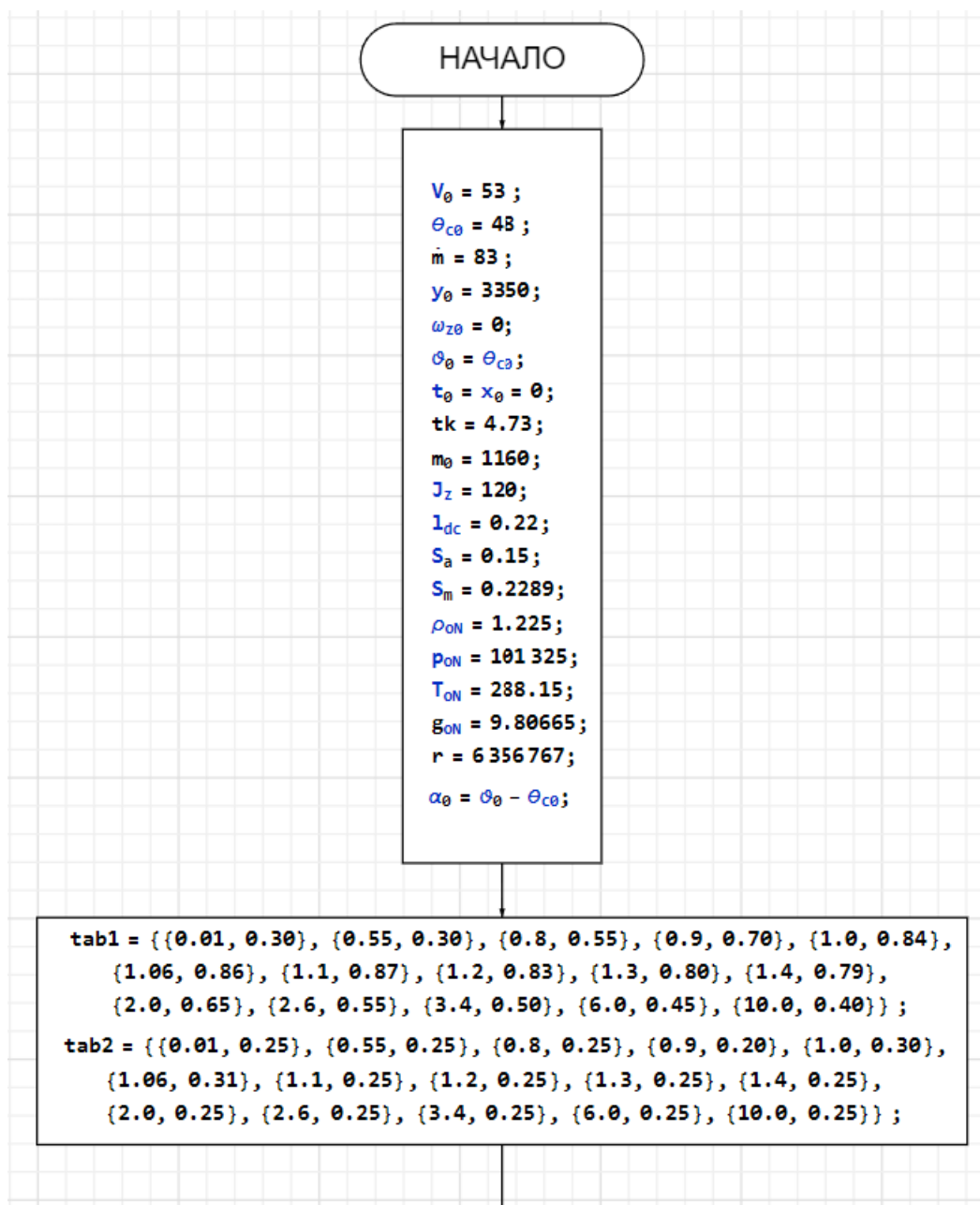


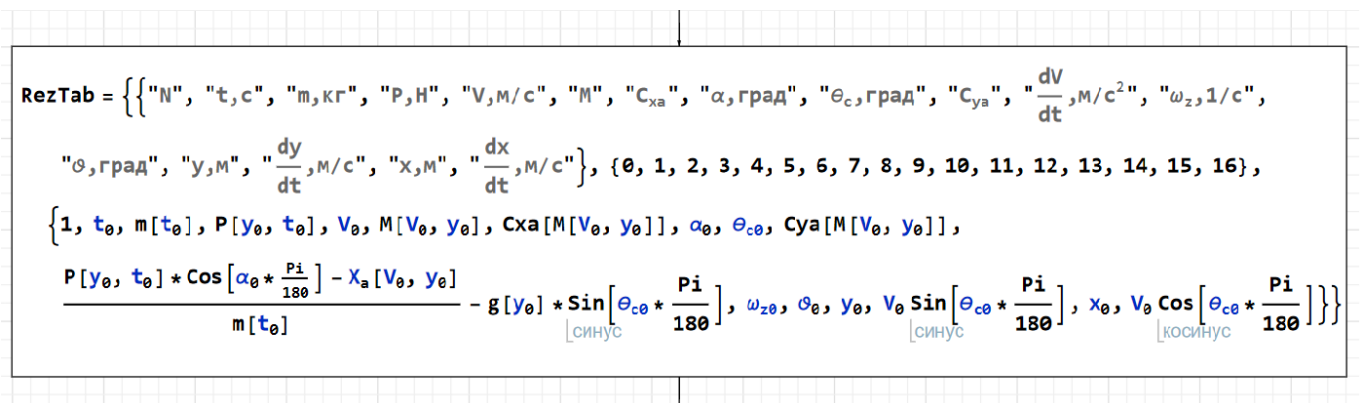
Рис. 3.10 Функция для определения  $M_z^\alpha$

2) Описание основной программы:

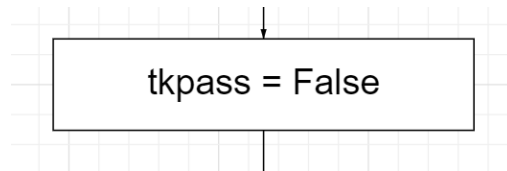
\*Ввод начальных значений, констант и таблиц\*



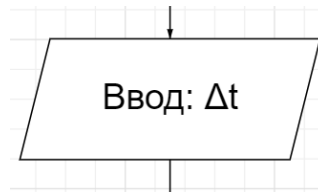
\*начало таблицы в которую будут записываться данные расчета, внесены две строчки: 1-я – названия столбцов, 2-я – их номера, 3-я начальные значения параметров\*



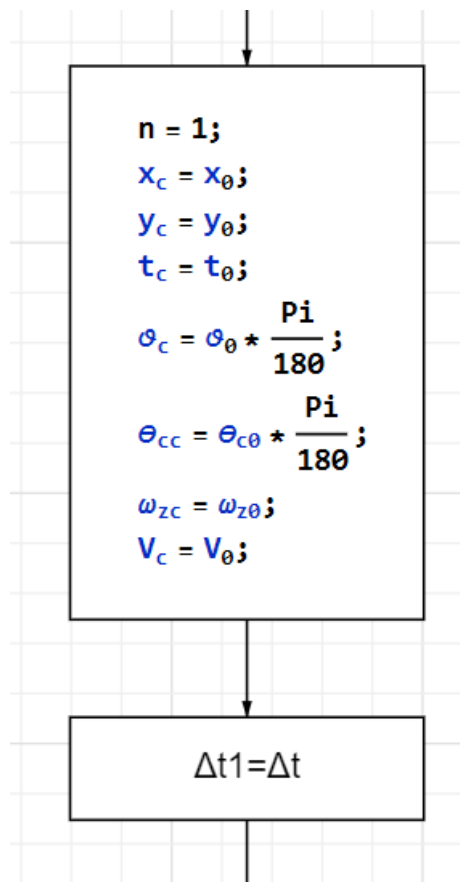
\*Логическая переменная, которая показывает прохождение через время  
конца АУТ\*



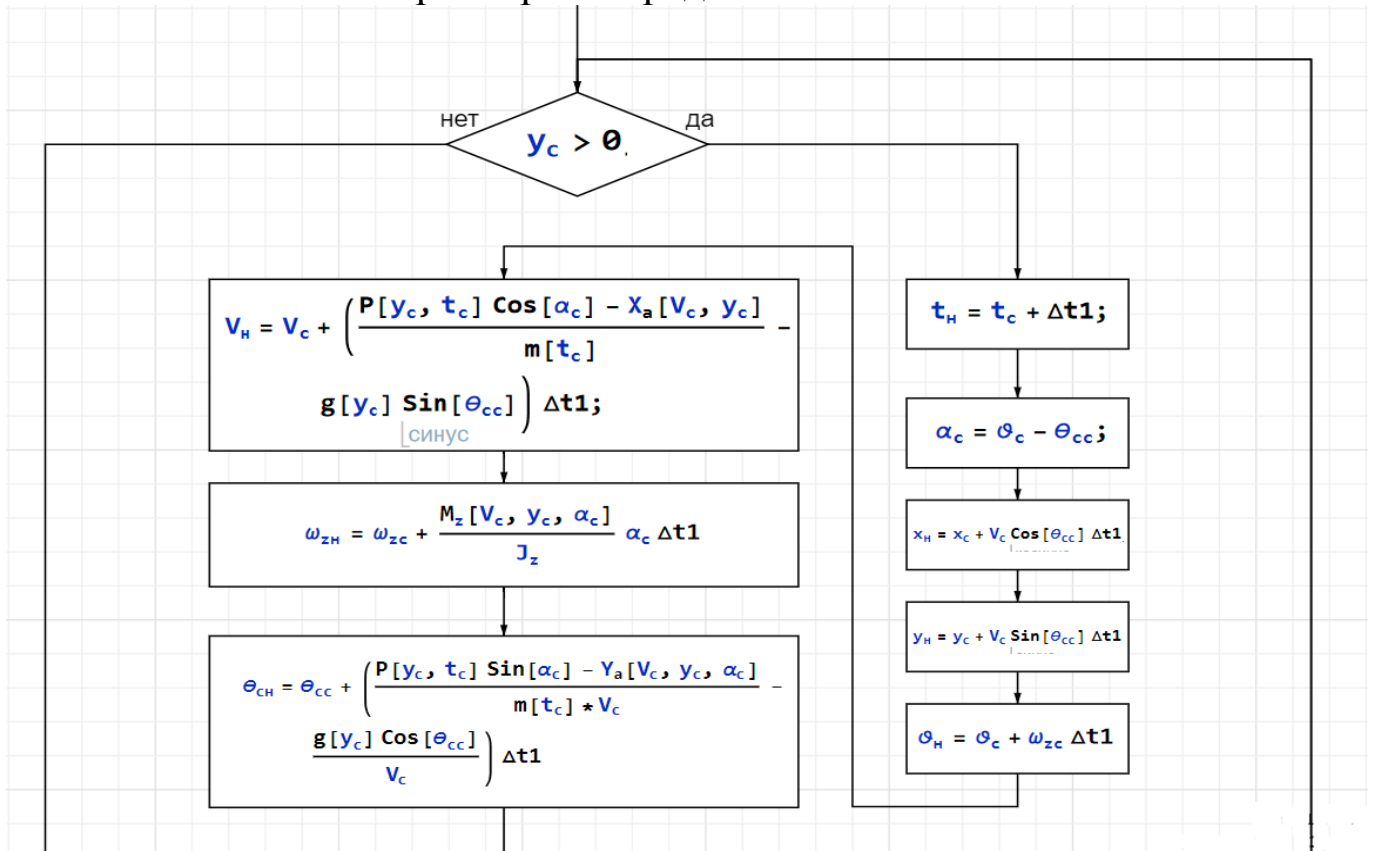
\*Ввод шага интегрирования  $\Delta t$ \*



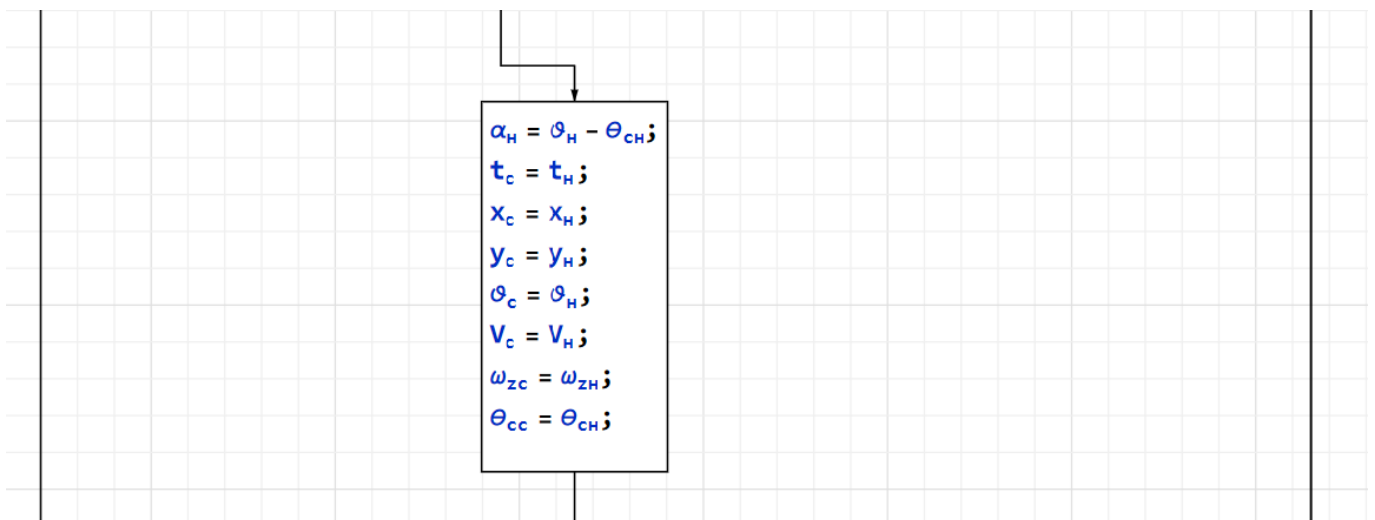
\*записываем начальные значения как предыдущие\*



\*начало цикла интегрирования значений параметров, по старым параметрам определяются новые\*

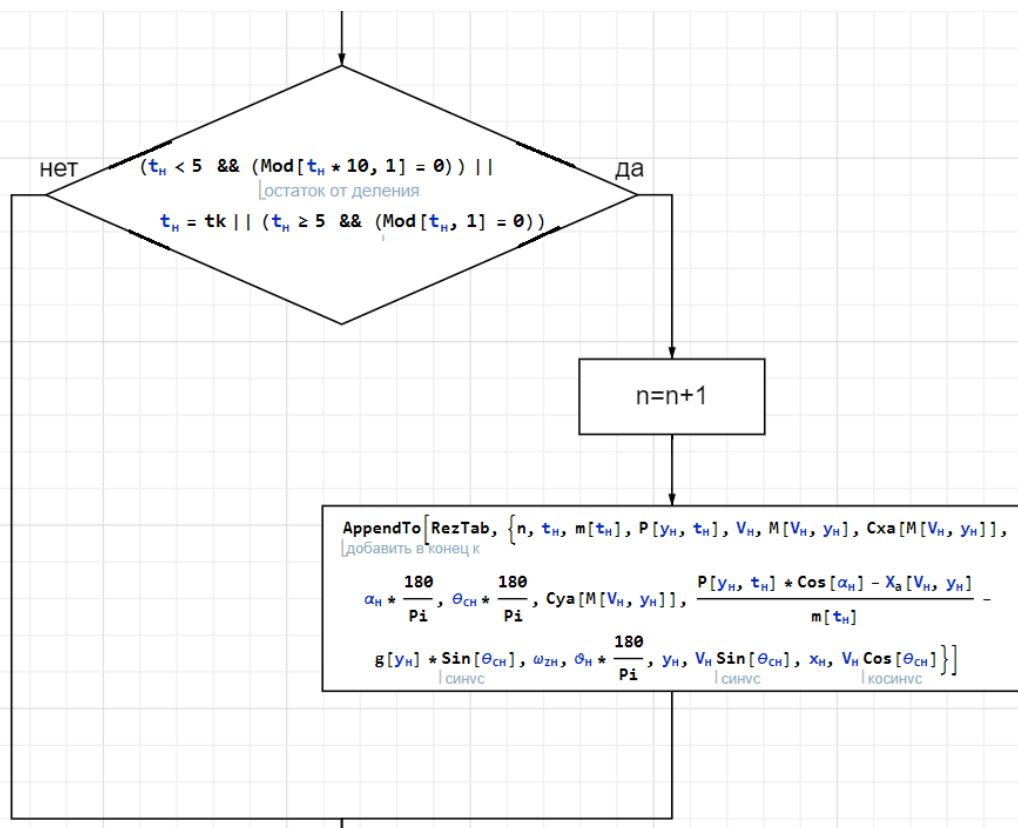


\*переопределяем старые значения как новые\*

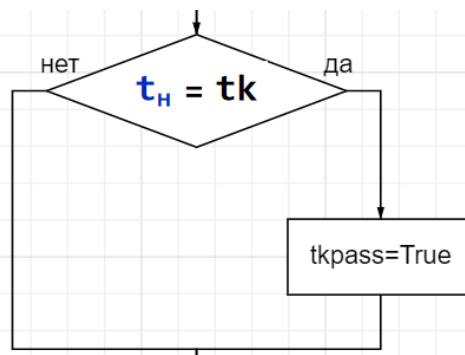


\*запись данных в таблицу, при этом запись происходит до 5-ой секунды с начала запуска с регулярностью 0.1 с, после 5-ой секунды с регулярностью 1 с, либо же когда текущее время равно времени конца АУТ  $t_k$ \*

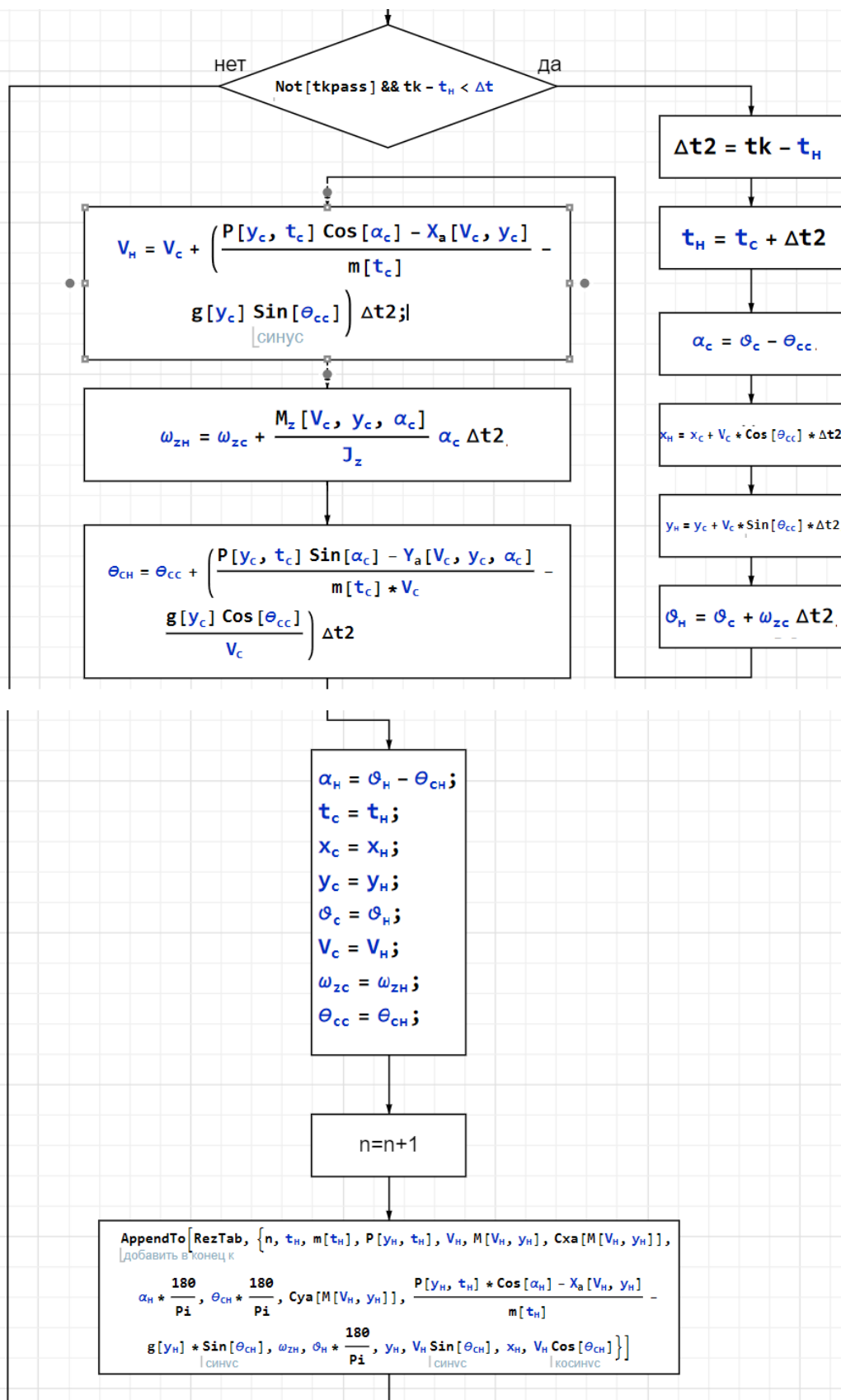




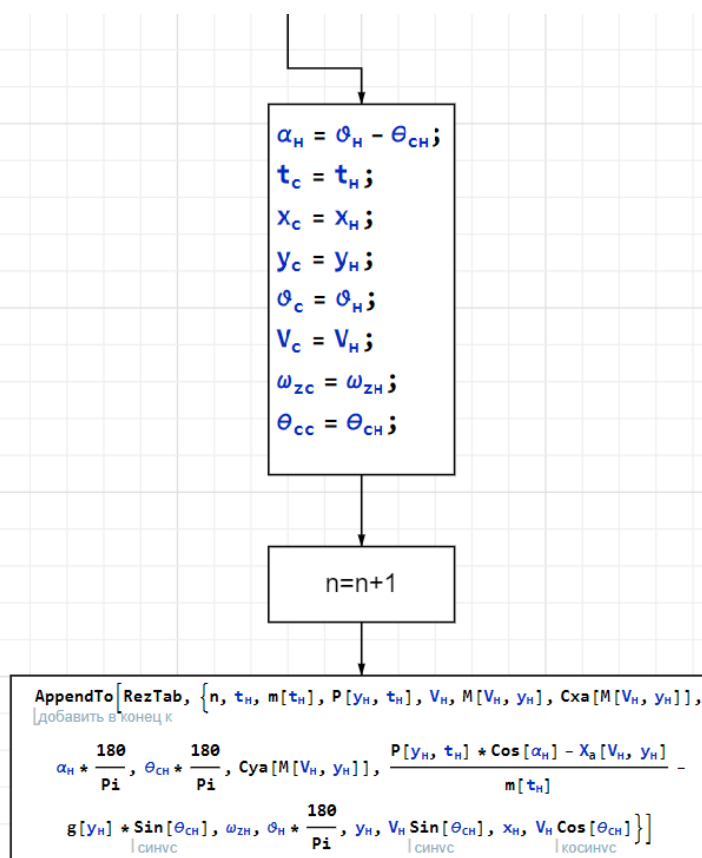
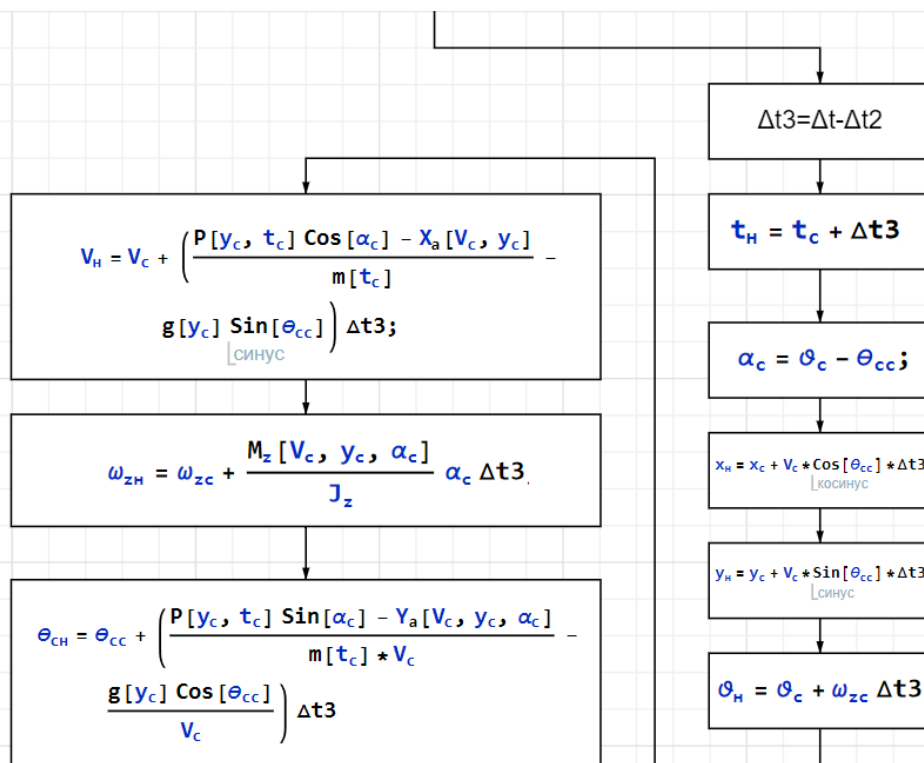
\*проверка, является ли текущее время временем конца АУТ, и если да, то логическая переменная tkpass приобретает значение True, и тогда изменение шага интегрирования для получения значений в  $t_k$  не потребуется\*



\*изменение шага интегрирования, если  $t_k - t < \Delta t$ , необходимо чтобы определить значения параметров при выключении двигателей в момент времени  $t_k$ \*



\*теперь с помощью отрезка Δt3 находим значение для времени, которое было бы без уменьшения шага интегрирования\*



\*добавление последних значений и вывод данных\*

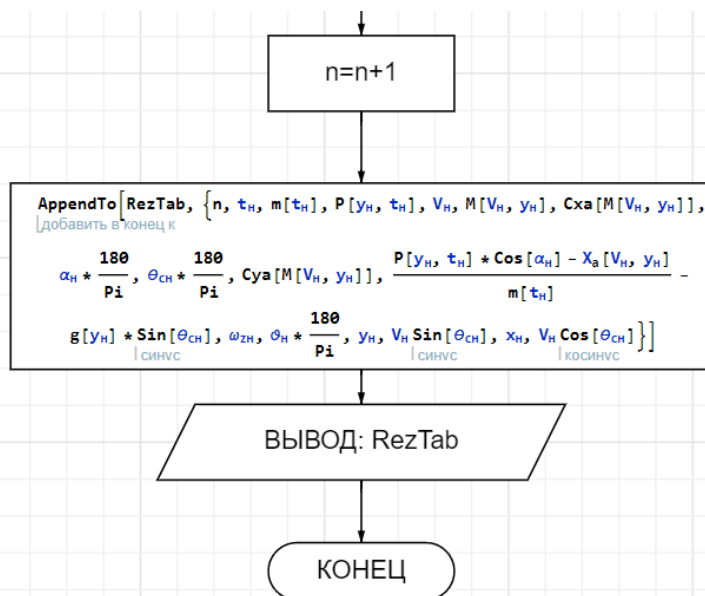


Рис. 3.11 Алгоритм работы программы.

## 4. Результаты расчетов

Для шага интегрирования  $\Delta t = 0,1$ :

Таблица 3

*Результаты расчета для  $\Delta t = 0,1$*

$N$	$t, c$	$m, кг$	$P, Н$	$V, м/с$	$M$	$C_{xa}$	$\alpha$	$\theta_c$	$C_{ya}^\alpha$	$\frac{dV}{dt}, м/с^2$	$\omega_z, 1/c$	$\vartheta, град$	$y, м$	$\frac{dy}{dt}, м/с$	$x, м$	$\frac{dx}{dt}, м/с$
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,0	1160,0	179450	53,0	0,16	0,30	0,00	48,00	0,25	147,35	0,00	48,00	3350,00	39,39	0,00	35,46
2	0,1	1151,7	179455	67,7	0,21	0,30	0,71	47,29	0,25	148,49	0,00	48,00	3353,94	49,77	3,55	45,94
3	0,2	1143,4	179462	82,6	0,25	0,30	1,11	46,89	0,25	149,59	0,00	48,00	3358,92	60,29	8,14	56,44
4	0,3	1135,1	179470	97,5	0,30	0,30	1,36	46,64	0,25	150,69	0,00	48,00	3364,95	70,92	13,78	66,97
5	0,4	1126,8	179479	112,6	0,34	0,30	1,53	46,46	0,25	151,79	0,00	47,99	3372,04	81,64	20,48	77,57
6	0,5	1118,5	179489	127,8	0,39	0,30	1,64	46,34	0,25	152,88	0,00	47,98	3380,20	92,44	28,24	88,23
7	0,6	1110,2	179501	143,1	0,44	0,30	1,72	46,24	0,25	153,98	-0,01	47,95	3389,44	103,33	37,06	98,96
8	0,7	1101,9	179514	158,5	0,48	0,30	1,75	46,16	0,25	155,09	-0,01	47,92	3399,78	114,31	46,96	109,77
9	0,8	1093,6	179529	174,0	0,53	0,30	1,76	46,09	0,25	156,20	-0,01	47,86	3411,21	125,35	57,93	120,65
10	0,9	1085,3	179545	189,6	0,58	0,33	1,74	46,04	0,25	157,22	-0,02	47,77	3423,74	136,47	70,00	131,62
11	1,0	1077,0	179563	205,3	0,63	0,38	1,68	45,98	0,25	158,14	-0,03	47,66	3437,39	147,65	83,16	142,68
12	1,1	1068,7	179582	221,1	0,68	0,43	1,58	45,93	0,25	159,00	-0,04	47,51	3452,16	158,88	97,43	153,82
13	1,2	1060,4	179602	237,0	0,73	0,48	1,43	45,87	0,25	159,79	-0,05	47,30	3468,05	170,14	112,81	165,05
14	1,3	1052,1	179623	253,0	0,77	0,52	1,23	45,81	0,25	160,51	-0,06	47,04	3485,06	181,41	129,32	176,38
15	1,4	1043,8	179647	269,1	0,82	0,59	0,97	45,73	0,24	161,06	-0,07	46,71	3503,20	192,69	146,95	187,81
16	1,5	1035,5	179671	285,2	0,87	0,66	0,65	45,65	0,21	161,39	-0,08	46,30	3522,47	203,93	165,74	199,35
17	1,6	1027,2	179697	301,3	0,92	0,73	0,26	45,55	0,22	161,58	-0,10	45,81	3542,86	215,11	185,67	211,00
18	1,7	1018,9	179724	317,5	0,97	0,80	-0,17	45,44	0,27	161,63	-0,10	45,27	3564,37	226,19	206,77	222,77
19	1,8	1010,6	179753	333,6	1,02	0,85	-0,62	45,30	0,30	161,76	-0,10	44,69	3586,99	237,16	229,05	234,67
20	1,9	1002,3	179782	349,8	1,07	0,86	-1,02	45,15	0,29	162,11	-0,08	44,13	3610,71	248,01	252,51	246,70
21	2,0	994,0	179814	366,0	1,12	0,86	-1,31	44,99	0,25	162,63	-0,05	43,68	3635,51	258,77	277,18	258,87
22	2,1	985,7	179846	382,3	1,17	0,84	-1,39	44,82	0,25	163,39	0,00	43,42	3661,39	269,45	303,07	271,18
23	2,2	977,4	179880	398,6	1,22	0,82	-1,22	44,65	0,25	164,16	0,05	43,43	3688,33	280,13	330,19	283,60
24	2,3	969,1	179914	415,0	1,27	0,81	-0,75	44,49	0,25	164,91	0,10	43,74	3716,34	290,87	358,55	296,07
25	2,4	960,8	179951	431,5	1,33	0,80	-0,03	44,36	0,25	165,57	0,14	44,33	3745,43	301,73	388,16	308,52
26	2,5	952,5	179988	448,1	1,38	0,79	0,84	44,27	0,25	166,09	0,14	45,11	3775,60	312,78	419,01	320,87
27	2,6	944,2	180026	464,7	1,43	0,78	1,68	44,21	0,25	166,62	0,10	45,89	3806,88	324,05	451,09	333,07
28	2,7	935,9	180066	481,4	1,48	0,77	2,24	44,19	0,25	167,23	0,01	46,44	3839,29	335,55	484,40	345,13
29	2,8	927,6	180107	498,1	1,53	0,76	2,28	44,20	0,25	167,91	-0,12	46,48	3872,84	347,23	518,92	357,10
30	2,9	919,3	180150	514,9	1,58	0,75	1,62	44,20	0,25	168,68	-0,25	45,82	3907,56	358,97	554,63	369,11
31	3,0	911,0	180193	531,7	1,64	0,73	0,21	44,18	0,25	169,48	-0,35	44,39	3943,46	370,60	591,54	381,32
32	3,1	902,7	180238	548,7	1,69	0,72	-1,70	44,12	0,25	170,15	-0,36	42,41	3980,52	381,95	629,67	393,93
33	3,2	894,4	180284	565,7	1,74	0,71	-3,63	43,98	0,25	170,62	-0,25	40,35	4018,72	392,85	669,06	407,06
34	3,3	886,1	180332	582,8	1,80	0,70	-4,86	43,79	0,25	171,12	-0,01	38,92	4058,00	403,26	709,77	420,71
35	3,4	877,8	180380	599,9	1,85	0,68	-4,68	43,56	0,25	172,03	0,32	38,88	4098,33	413,35	751,84	434,74
36	3,5	869,5	180429	617,1	1,90	0,67	-2,60	43,33	0,25	173,40	0,66	40,74	4139,66	423,48	795,31	448,84
37	3,6	861,2	180479	634,4	1,96	0,66	1,31	43,19	0,25	174,49	0,85	44,50	4182,01	434,18	840,20	462,58
38	3,7	852,9	180530	651,9	2,01	0,65	6,20	43,16	0,25	174,21	0,75	49,37	4225,43	445,93	886,45	475,49
39	3,8	844,6	180583	669,3	2,07	0,64	10,35	43,29	0,25	172,79	0,23	53,64	4270,02	458,93	934,00	487,17
40	3,9	836,3	180637	686,6	2,12	0,63	11,39	43,54	0,25	172,86	-0,70	54,93	4315,91	472,94	982,72	497,70

41	4,0	828,0	180692	703,9	2,18	0,62	7,12	43,81	0,25	176,32	-1,75	50,93	4363,21	487,30	1032,49	507,89
42	4,1	819,7	180748	721,5	2,23	0,61	-3,09	43,96	0,25	178,60	-2,42	40,88	4411,94	500,86	1083,28	519,31
43	4,2	811,4	180806	739,3	2,29	0,60	-16,79	43,82	0,25	170,41	-2,14	27,03	4462,02	511,92	1135,21	533,46
44	4,3	803,1	180864	756,4	2,35	0,59	-28,54	43,30	0,25	153,68	-0,76	14,76	4513,22	518,75	1188,56	550,48
45	4,4	794,8	180923	771,8	2,39	0,58	-32,08	42,49	0,25	147,65	1,41	10,41	4565,09	521,30	1243,60	569,09
46	4,5	786,5	180982	786,5	2,44	0,58	-23,12	41,61	0,25	165,37	3,81	18,49	4617,22	522,27	1300,51	588,09
47	4,6	778,2	181041	803,1	2,49	0,57	-0,65	40,95	0,25	185,19	5,71	40,30	4669,45	526,30	1359,32	606,56
48	4,7	769,9	181100	821,6	2,55	0,56	32,16	40,88	0,25	150,31	5,78	73,04	4722,08	537,67	1419,98	621,21
49	4,73	767,4	181118	827,2	2,57	0,55	42,12	40,86	0,25	125,84	5,80	82,98	4738,21	541,11	1438,61	625,63
50	4,8	767,4	0	840,2	2,61	0,55	65,43	40,81	0,25	-49,96	5,85	106,24	4776,08	549,13	1482,41	635,98
51	4,9	767,4	0	835,2	2,60	0,55	99,14	40,60	0,25	-49,23	-4,79	139,75	4831,00	543,60	1546,01	634,14

### Графики для $\Delta t = 0,1$

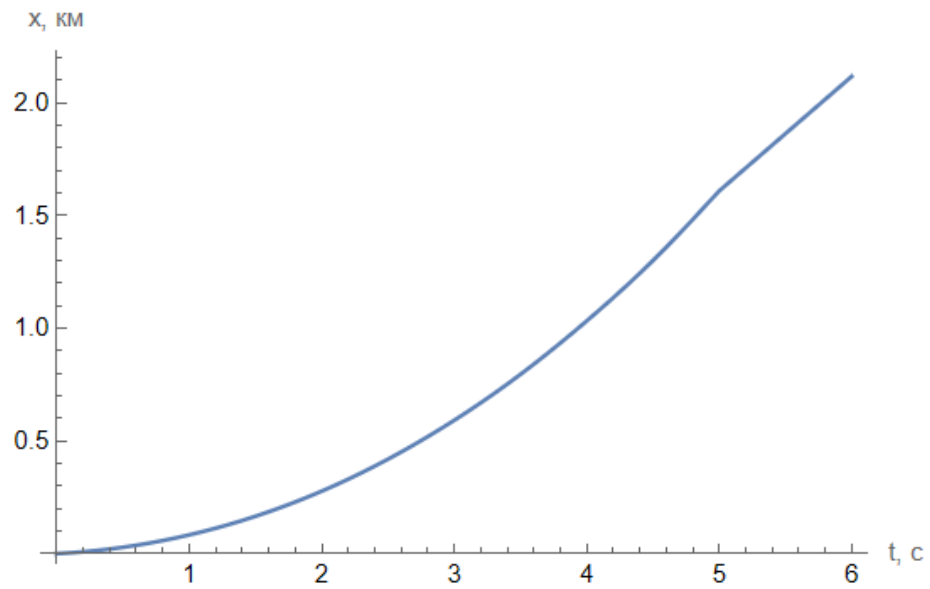


Рис. 4.1 График зависимости  $x(t)$  при  $\Delta t = 0,1$

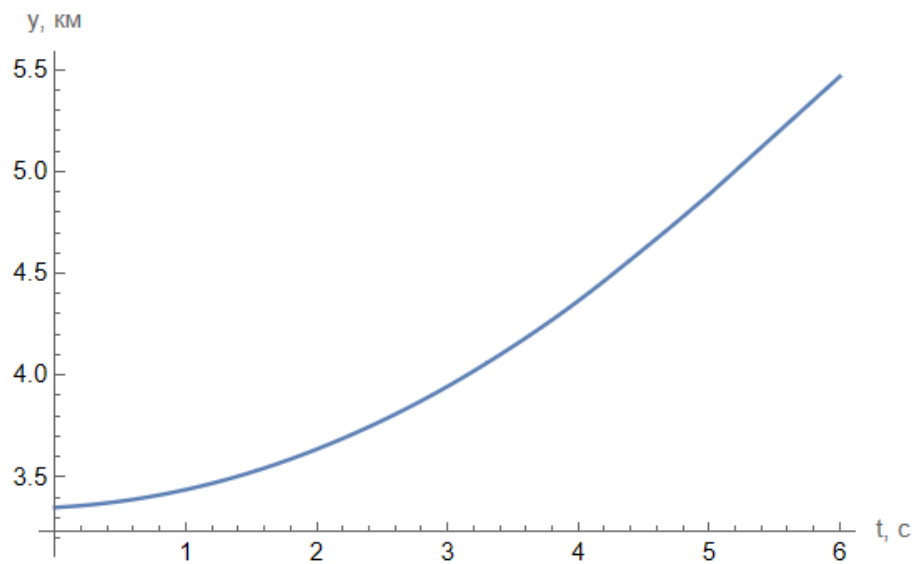


Рис. 4.2 График зависимости  $y(t)$  при  $\Delta t = 0,1$

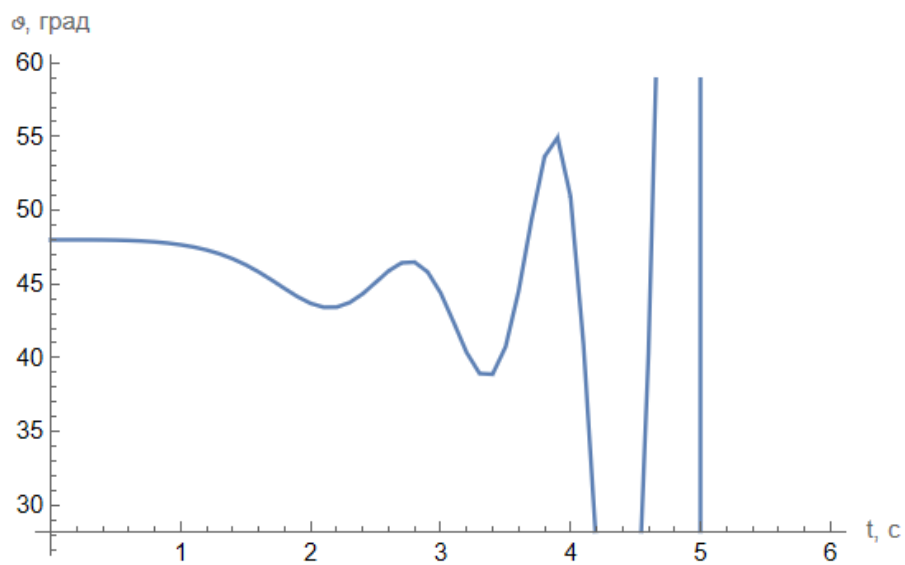


Рис. 4.3 График зависимости  $\vartheta(t)$  при  $\Delta t = 0,1$

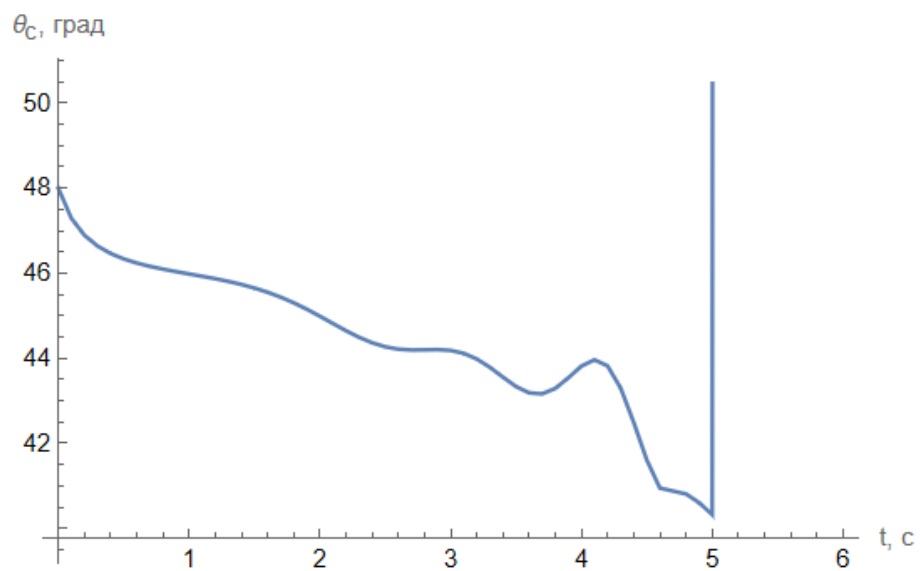


Рис. 4.4 График зависимости  $\theta_c(t)$  при  $\Delta t = 0,1$

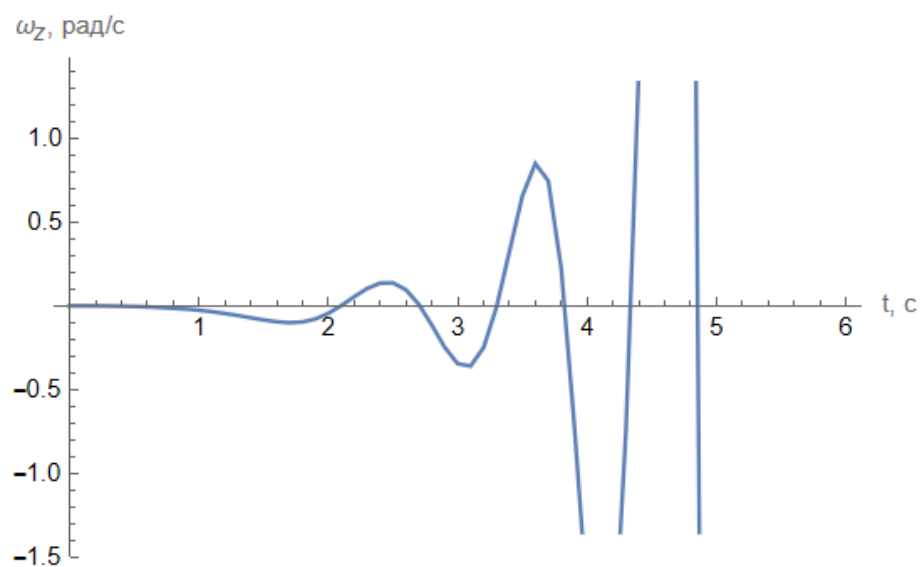


Рис. 4.5 График зависимости  $\omega_z(t)$  при  $\Delta t = 0,1$

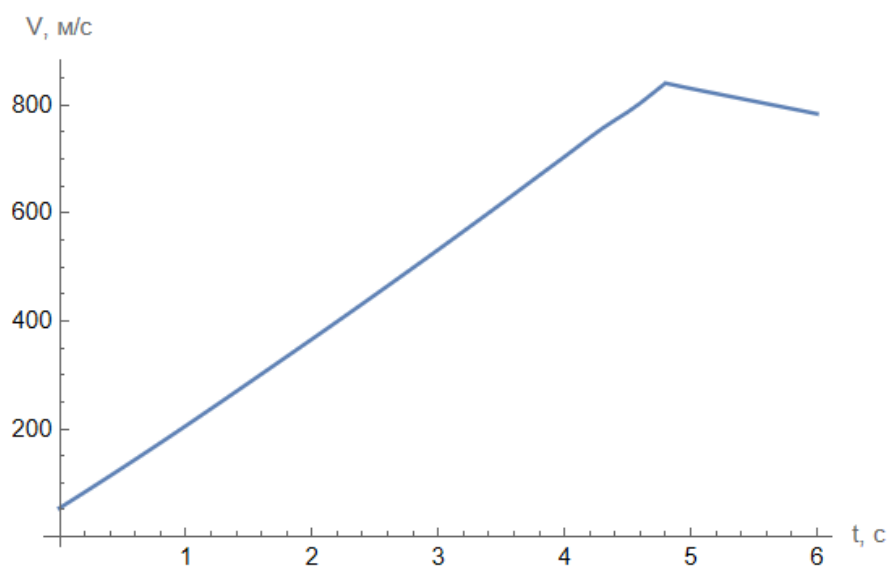


Рис. 4.6 График зависимости  $V(t)$  при  $\Delta t = 0,1$



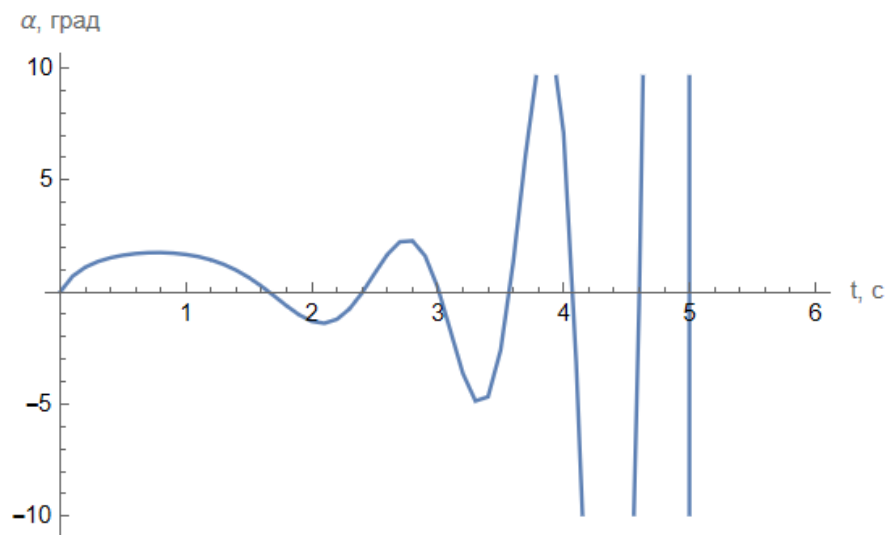


Рис. 4.7 График зависимости  $\alpha(t)$  при  $\Delta t = 0,1$

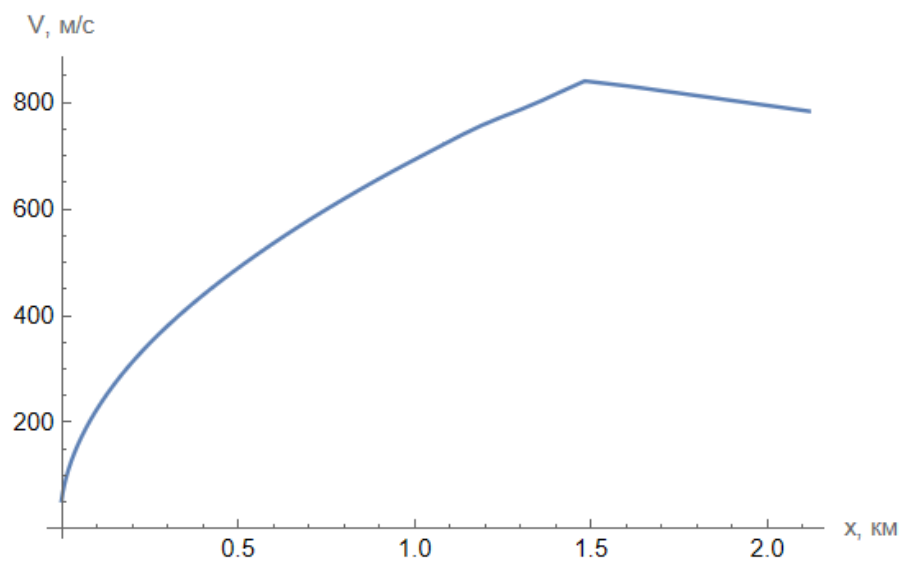


Рис. 4.8 График зависимости  $V(x)$  при  $\Delta t = 0,1$

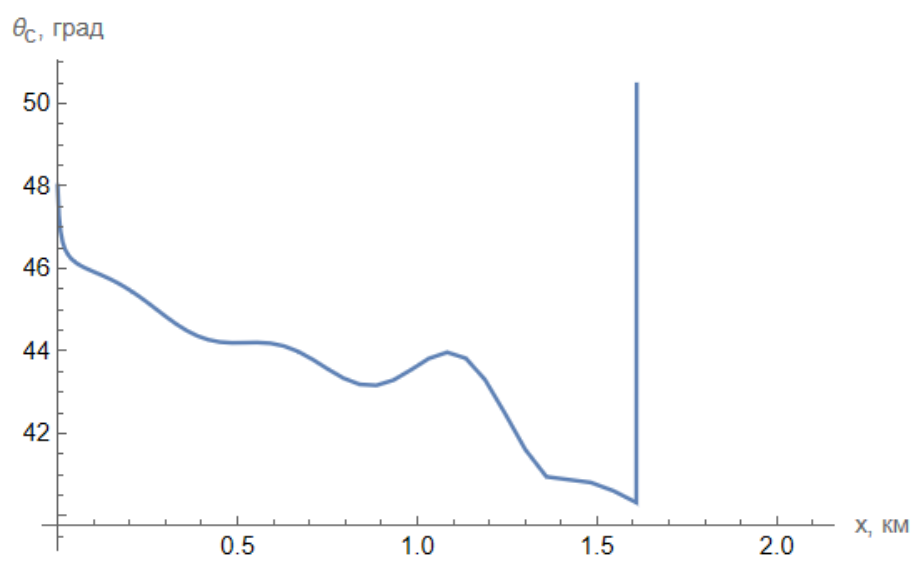


Рис. 4.9 График зависимости  $\theta_c(x)$  при  $\Delta t = 0,1$

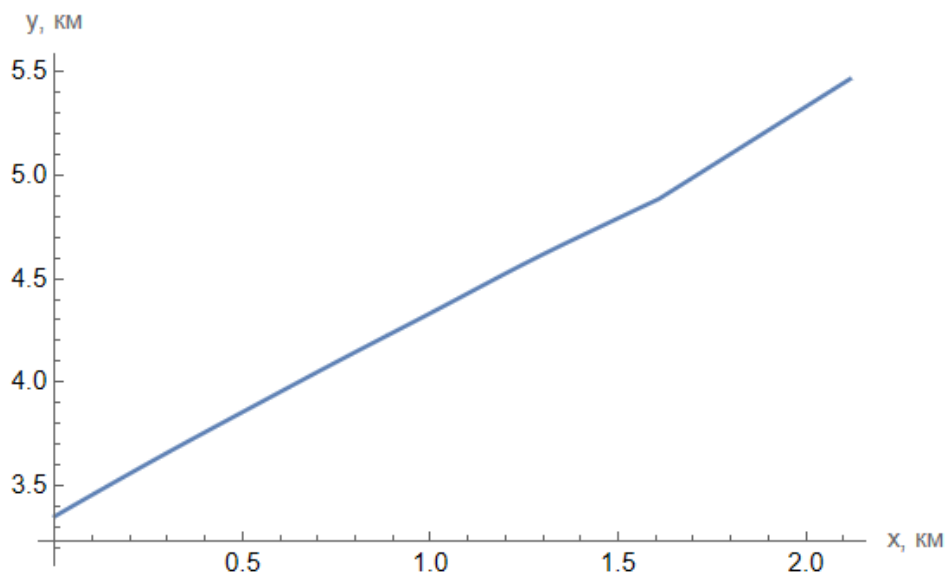


Рис. 4.10 График зависимости  $y(x)$  при  $\Delta t = 0,1$

Для шага интегрирования  $\Delta t = 0,01$ :

Таблица 4

*Результаты расчета для  $\Delta t = 0,01$*

$N$	$t, c$	$m, кг$	$P, Н$	$V, м/с$	$M$	$C_{xa}$	$\alpha$	$\theta_c$	$C_{ya}^\alpha$	$\frac{dV}{dt}', м/с^2$	$\omega_z, 1/c$	$\vartheta, град$	$y, м$	$\frac{dy}{dt}', м/с$	$x, м$	$\frac{dx}{dt}', м/с$
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,0	1160,0	179450	53,0	0,16	0,30	0,00	48,00	0,25	147,35	0,00	48,00	3350,00	39,39	0,00	35,46
2	0,1	1151,7	179456	67,8	0,21	0,30	0,57	47,43	0,25	148,48	0,00	48,00	3354,41	49,92	4,01	45,85
3	0,2	1143,4	179463	82,7	0,25	0,30	0,92	47,07	0,25	149,58	0,00	48,00	3359,88	60,54	9,07	56,31
4	0,3	1135,1	179471	97,7	0,30	0,30	1,17	46,83	0,25	150,68	0,00	47,99	3366,42	71,25	15,17	66,84
5	0,4	1126,8	179481	112,8	0,34	0,30	1,33	46,65	0,25	151,78	0,00	47,98	3374,03	82,03	22,33	77,44
6	0,5	1118,5	179492	128,0	0,39	0,30	1,45	46,51	0,25	152,88	0,00	47,96	3382,72	92,89	30,56	88,12
7	0,6	1110,2	179505	143,4	0,44	0,30	1,53	46,40	0,25	153,98	-0,01	47,93	3392,50	103,83	39,85	98,87
8	0,7	1101,9	179519	158,8	0,49	0,30	1,57	46,31	0,25	155,09	-0,01	47,88	3403,38	114,84	50,23	109,71
9	0,8	1093,6	179534	174,4	0,53	0,30	1,58	46,23	0,25	156,20	-0,01	47,81	3415,36	125,93	61,69	120,63
10	0,9	1085,3	179551	190,0	0,58	0,33	1,55	46,16	0,25	157,22	-0,02	47,71	3428,45	137,07	74,24	131,64
11	1,0	1077,0	179569	205,8	0,63	0,38	1,49	46,09	0,25	158,13	-0,03	47,58	3442,66	148,27	87,91	142,74
12	1,1	1068,7	179589	221,7	0,68	0,43	1,38	46,02	0,25	158,99	-0,04	47,40	3458,00	159,50	102,68	153,93
13	1,2	1060,4	179610	237,6	0,73	0,48	1,23	45,94	0,25	159,79	-0,05	47,17	3474,45	170,76	118,58	165,21
14	1,3	1052,1	179632	253,6	0,78	0,53	1,02	45,86	0,25	160,50	-0,06	46,89	3492,03	182,01	135,62	176,61
15	1,4	1043,8	179656	269,7	0,83	0,59	0,76	45,77	0,24	161,04	-0,07	46,53	3510,74	193,25	153,79	188,11
16	1,5	1035,5	179681	285,8	0,88	0,66	0,45	45,67	0,21	161,36	-0,08	46,12	3530,57	204,45	173,13	199,72
17	1,6	1027,2	179708	302,0	0,93	0,74	0,12	45,55	0,23	161,55	-0,08	45,67	3551,52	215,57	193,62	211,44
18	1,7	1018,9	179736	318,1	0,97	0,80	-0,23	45,42	0,27	161,59	-0,08	45,20	3573,57	226,60	215,30	223,26
19	1,8	1010,6	179765	334,3	1,02	0,85	-0,53	45,28	0,30	161,74	-0,07	44,76	3596,72	237,53	238,16	235,19
20	1,9	1002,3	179795	350,5	1,07	0,86	-0,74	45,14	0,29	162,11	-0,05	44,40	3620,97	248,40	262,22	247,23
21	2,0	994,0	179827	366,7	1,12	0,86	-0,82	44,99	0,25	162,66	-0,02	44,17	3646,29	259,23	287,49	259,35
22	2,1	985,7	179860	383,0	1,18	0,84	-0,73	44,84	0,25	163,43	0,01	44,11	3672,70	270,07	313,97	271,56
23	2,2	977,4	179894	399,4	1,23	0,82	-0,50	44,71	0,25	164,18	0,03	44,21	3700,20	280,97	341,68	283,82

24	2,3	969,1	179930	415,8	1,28	0,81	-0,17	44,60	0,25	164,91	0,05	44,42	3728,79	291,95	370,62	296,09
25	2,4	960,8	179967	432,3	1,33	0,80	0,19	44,50	0,25	165,54	0,05	44,69	3758,48	303,04	400,78	308,36
26	2,5	952,5	180005	448,9	1,38	0,79	0,49	44,42	0,25	166,07	0,03	44,92	3789,29	314,23	432,16	320,61
27	2,6	944,2	180044	465,6	1,43	0,78	0,66	44,36	0,25	166,67	0,00	45,02	3821,22	325,50	464,78	332,85
28	2,7	935,9	180085	482,2	1,48	0,77	0,63	44,30	0,25	167,35	-0,03	44,93	3854,28	336,82	498,61	345,14
29	2,8	927,6	180126	499,0	1,54	0,76	0,40	44,24	0,25	168,05	-0,07	44,64	3888,47	348,14	533,68	357,51
30	2,9	919,3	180169	515,9	1,59	0,75	0,05	44,17	0,25	168,76	-0,08	44,22	3923,79	359,44	570,00	370,01
31	3,0	911,0	180214	532,8	1,64	0,73	-0,31	44,09	0,25	169,49	-0,07	43,77	3960,24	370,68	607,56	382,67
32	3,1	902,7	180259	549,7	1,69	0,72	-0,58	44,00	0,25	170,24	-0,04	43,42	3997,81	381,87	646,41	395,47
33	3,2	894,4	180306	566,8	1,75	0,71	-0,63	43,90	0,25	171,02	0,00	43,27	4036,51	393,05	686,53	408,38
34	3,3	886,1	180353	583,9	1,80	0,70	-0,45	43,81	0,25	171,84	0,04	43,36	4076,31	404,28	727,96	421,37
35	3,4	877,8	180402	601,2	1,85	0,68	-0,10	43,74	0,25	172,70	0,06	43,64	4117,25	415,61	770,68	434,36
36	3,5	869,5	180452	618,5	1,91	0,67	0,29	43,67	0,25	173,57	0,05	43,97	4159,33	427,07	814,70	447,35
37	3,6	861,2	180503	635,9	1,96	0,66	0,57	43,62	0,25	174,49	0,02	44,19	4202,56	438,68	860,02	460,32
38	3,7	852,9	180556	653,4	2,02	0,65	0,60	43,58	0,25	175,39	-0,03	44,17	4246,95	450,38	906,63	473,33
39	3,8	844,6	180609	670,9	2,07	0,64	0,36	43,53	0,25	176,23	-0,07	43,89	4292,51	462,10	954,56	486,44
40	3,9	836,3	180664	688,6	2,13	0,63	-0,05	43,48	0,25	177,10	-0,09	43,42	4339,25	473,79	1003,79	499,70
41	4,0	828,0	180719	706,4	2,19	0,62	-0,44	43,41	0,25	178,00	-0,07	42,97	4387,15	485,42	1054,37	513,13
42	4,1	819,7	180776	724,2	2,24	0,61	-0,63	43,34	0,25	178,93	-0,02	42,71	4436,22	497,01	1106,29	526,73
43	4,2	811,4	180834	742,1	2,30	0,60	-0,50	43,26	0,25	179,92	0,04	42,76	4486,44	508,63	1159,58	540,42
44	4,3	803,1	180892	760,2	2,36	0,59	-0,11	43,20	0,25	180,96	0,07	43,09	4537,83	520,38	1214,24	554,14
45	4,4	794,8	180952	778,3	2,42	0,58	0,34	43,15	0,25	182,03	0,06	43,49	4590,40	532,30	1270,27	567,83
46	4,5	786,5	181013	796,6	2,47	0,57	0,62	43,11	0,25	183,16	0,01	43,74	4644,18	544,39	1327,67	581,52
47	4,6	778,2	181075	814,9	2,53	0,56	0,56	43,08	0,25	184,35	-0,05	43,64	4699,16	556,58	1386,44	595,26
48	4,7	769,9	181137	833,4	2,59	0,55	0,17	43,04	0,25	185,61	-0,09	43,21	4755,37	568,80	1446,59	609,16
49	4,73	767,4	181156	839,0	2,61	0,55	0,02	43,02	0,25	185,91	-0,10	43,05	4772,47	572,45	1464,90	613,37
50	4,8	767,4	0	837,9	2,61	0,55	-0,33	42,99	0,25	-49,85	-0,09	42,66	4812,56	571,31	1507,88	612,87
51	4,9	767,4	0	832,9	2,59	0,55	-0,67	42,94	0,25	-49,18	-0,04	42,27	4869,51	567,42	1569,02	609,72
52	5,0	767,4	0	828,0	2,58	0,55	-0,64	42,89	0,25	-48,59	0,04	42,25	4926,08	563,58	1629,85	606,61
53	6,0	767,4	0	782,2	2,45	0,57	0,04	42,38	0,25	-43,19	0,12	42,42	5471,34	527,24	2221,88	577,75
54	7,0	767,4	0	741,3	2,34	0,59	0,84	41,84	0,25	-38,61	0,11	42,68	5982,05	494,45	2786,79	552,30
55	8,0	767,4	0	704,7	2,24	0,61	1,34	41,26	0,25	-34,72	0,11	42,59	6461,51	464,68	3327,73	529,75
56	9,0	767,4	0	671,6	2,15	0,63	1,42	40,64	0,25	-31,38	0,15	42,06	6912,49	437,46	3847,36	509,64
57	10,0	767,4	0	641,7	2,06	0,64	0,51	39,99	0,25	-28,52	0,24	40,50	7337,35	412,43	4347,97	491,63
58	11,0	767,4	0	614,4	1,99	0,65	-1,92	39,31	0,25	-26,07	0,22	37,38	7738,09	389,23	4831,50	475,44
59	12,0	767,4	0	589,4	1,92	0,67	-3,65	38,57	0,25	-24,04	-0,08	34,93	8116,43	367,51	5299,60	460,80
60	13,0	767,4	0	566,3	1,85	0,68	0,03	37,80	0,25	-22,23	-0,37	37,84	8473,80	347,11	5753,63	447,42
61	14,0	767,4	0	544,9	1,79	0,70	4,87	37,01	0,25	-20,63	0,02	41,89	8811,42	328,01	6194,80	435,06
62	15,0	767,4	0	525,0	1,73	0,71	-2,01	36,18	0,25	-19,19	0,38	34,17	9130,33	309,92	6624,21	423,70
63	16,0	767,4	0	506,4	1,68	0,73	-4,45	35,28	0,25	-17,90	-0,34	30,84	9431,55	292,51	7042,75	413,39
64	17,0	767,4	0	489,1	1,63	0,74	6,89	34,37	0,25	-16,73	-0,06	41,26	9715,96	276,10	7451,23	403,71
65	18,0	767,4	0	472,9	1,58	0,75	-5,34	33,42	0,25	-15,68	0,36	28,07	9984,17	260,42	7850,49	394,73
66	19,0	767,4	0	457,7	1,53	0,76	0,97	32,38	0,25	-14,71	-0,56	33,35	10237,00	245,11	8241,09	386,54
67	20,0	767,4	0	443,4	1,49	0,77	2,32	31,36	0,25	-13,83	0,53	33,67	10474,96	230,75	8623,68	378,66
68	21,0	767,4	0	430,0	1,45	0,78	-5,86	30,23	0,25	-13,01	-0,51	24,36	10698,56	216,47	8998,81	371,55
69	22,0	767,4	0	417,4	1,41	0,79	7,05	29,11	0,25	-12,26	0,45	36,16	10908,39	203,03	9366,88	364,66
70	23,0	767,4	0	405,5	1,38	0,79	-8,69	27,89	0,25	-11,53	-0,46	19,20	11104,71	189,64	9728,43	358,39
71	24,0	767,4	0	394,3	1,34	0,80	7,74	26,67	0,25	-10,84	0,49	34,41	11288,12	177,00	10083,76	352,32
72	25,0	767,4	0	383,8	1,31	0,80	-7,24	25,35	0,25	-10,19	-0,60	18,11	11458,75	164,29	10433,36	346,83
73	26,0	767,4	0	373,9	1,28	0,81	2,54	24,05	0,25	-9,62	0,66	26,59	11617,15	152,36	10777,47	341,42
74	27,0	767,4	0	364,5	1,25	0,82	1,37	22,61	0,25	-9,07	-0,74	23,98	11763,45	140,16	11116,45	336,51

75	28,0	767,4	0	355,7	1,22	0,82	-9,66	21,22	0,25	-8,56	0,56	11,56	11897,91	128,74	11450,52	331,61
76	29,0	767,4	0	347,4	1,20	0,83	14,47	19,70	0,25	-8,05	-0,36	34,17	12020,93	117,10	11779,85	327,09
77	30,0	767,4	0	339,6	1,17	0,84	-17,78	18,17	0,25	-7,58	-0,14	0,39	12132,39	105,88	12104,77	322,68
78	31,0	767,4	0	332,2	1,15	0,85	11,77	16,60	0,25	-7,12	0,56	28,37	12232,90	94,94	12425,29	318,39
79	32,0	767,4	0	325,4	1,13	0,86	-2,29	14,92	0,25	-6,66	-0,83	12,63	12322,27	83,77	12741,70	314,39
80	33,0	767,4	0	318,9	1,10	0,87	-13,86	13,29	0,25	-6,23	0,56	-0,57	12400,82	73,31	13054,09	310,37
81	34,0	767,4	0	312,9	1,08	0,87	19,89	11,54	0,27	-5,74	-0,08	31,43	12468,87	62,58	13362,57	306,60
82	35,0	767,4	0	307,4	1,07	0,86	-16,08	9,74	0,30	-5,26	-0,62	-6,34	12526,15	52,03	13667,38	302,98
83	36,0	767,4	0	302,4	1,05	0,86	-6,27	8,01	0,31	-4,81	0,79	1,73	12573,29	42,12	13968,59	299,43
84	37,0	767,4	0	297,8	1,03	0,85	20,09	6,10	0,31	-4,35	-0,40	26,19	12610,28	31,67	14266,37	296,11
85	38,0	767,4	0	293,7	1,02	0,85	-21,14	4,22	0,30	-3,91	-0,51	-16,92	12636,88	21,61	14560,87	292,88
86	39,0	767,4	0	290,0	1,01	0,84	-5,39	2,38	0,30	-3,49	0,84	-3,01	12653,78	12,05	14852,18	289,72
87	40,0	767,4	0	286,7	1,00	0,84	22,40	0,39	0,30	-3,05	-0,39	22,78	12660,87	1,94	15140,39	286,68
88	41,0	767,4	0	283,9	0,99	0,82	-21,10	-1,58	0,29	-2,61	-0,63	-22,69	12657,88	-7,84	15425,61	283,75
89	42,0	767,4	0	281,4	0,98	0,81	-12,46	-3,48	0,28	-2,20	0,80	-15,94	12645,48	-17,07	15707,96	280,93
90	43,0	767,4	0	279,4	0,97	0,80	26,38	-5,50	0,27	-1,79	-0,05	20,88	12623,65	-26,80	15987,51	278,16
91	44,0	767,4	0	277,9	0,96	0,79	-13,38	-7,54	0,26	-1,40	-0,89	-20,92	12592,01	-36,44	16264,32	275,45
92	45,0	767,4	0	276,6	0,96	0,78	-24,55	-9,45	0,26	-1,05	0,55	-34,00	12551,11	-45,41	16538,49	272,87
93	46,0	767,4	0	275,8	0,96	0,78	23,67	-11,44	0,26	-0,70	0,52	12,23	12501,17	-54,69	16810,09	270,28
94	47,0	767,4	0	275,2	0,95	0,78	2,48	-13,49	0,25	-0,35	-1,05	-11,01	12441,74	-64,20	17079,05	267,64
95	48,0	767,4	0	275,0	0,95	0,77	-32,77	-15,39	0,25	-0,05	0,09	-48,17	12373,12	-73,01	17345,45	265,16
96	49,0	767,4	0	275,1	0,95	0,77	10,69	-17,30	0,25	0,24	0,96	-6,61	12295,81	-81,80	17609,39	262,68
97	50,0	767,4	0	275,5	0,95	0,77	19,14	-19,31	0,25	0,52	-0,89	-0,17	12209,42	-91,08	17870,75	260,01
98	51,0	767,4	0	276,1	0,95	0,77	-32,57	-21,18	0,25	0,77	-0,41	-53,75	12113,96	-99,77	18129,49	257,49
99	52,0	767,4	0	277,0	0,95	0,77	-4,95	-22,97	0,25	0,99	1,10	-27,92	12010,09	-108,10	18385,80	255,06
100	53,0	767,4	0	278,1	0,96	0,78	28,80	-24,88	0,26	1,21	-0,53	3,92	11897,61	-117,02	18639,52	252,31
101	54,0	767,4	0	279,4	0,96	0,78	-28,28	-26,69	0,26	1,40	-0,78	-54,98	11776,29	-125,53	18890,49	249,65
102	55,0	767,4	0	280,9	0,96	0,79	-14,74	-28,35	0,26	1,55	1,11	-43,10	11646,86	-133,41	19138,94	247,21
103	56,0	767,4	0	282,5	0,96	0,79	32,07	-30,15	0,26	1,71	-0,32	1,93	11509,30	-141,90	19384,77	244,33
104	57,0	767,4	0	284,3	0,97	0,80	-27,83	-31,86	0,27	1,83	-0,92	-59,69	11363,25	-150,08	19627,64	241,48
105	58,0	767,4	0	286,2	0,97	0,80	-14,98	-33,38	0,27	1,91	1,24	-48,36	11209,52	-157,47	19867,89	238,97
106	59,0	767,4	0	288,2	0,98	0,81	31,81	-35,07	0,28	2,01	-0,58	-3,26	11048,10	-165,57	20105,37	235,84
107	60,0	767,4	0	290,2	0,98	0,81	-35,39	-36,63	0,28	2,06	-0,72	-72,02	10878,66	-173,16	20339,66	232,87
108	61,0	767,4	0	292,3	0,99	0,82	-1,20	-38,03	0,29	2,08	1,52	-39,22	10702,13	-180,04	20571,27	230,22
109	62,0	767,4	0	294,4	0,99	0,83	19,70	-39,63	0,29	2,11	-1,40	-19,94	10518,29	-187,76	20799,78	226,69
110	63,0	767,4	0	296,5	0,99	0,83	-43,03	-40,98	0,29	2,10	0,14	-84,00	10327,10	-194,42	21024,96	223,82
111	64,0	767,4	0	298,5	1,00	0,84	28,69	-42,32	0,30	2,07	1,11	-13,63	10129,55	-200,99	21247,39	220,75
112	65,0	767,4	0	300,6	1,00	0,84	-19,45	-43,79	0,30	2,06	-1,67	-63,24	9924,96	-208,04	21466,20	216,99
113	66,0	767,4	0	302,6	1,01	0,84	-21,06	-44,91	0,30	2,00	1,66	-65,97	9714,11	-213,66	21681,87	214,34
114	67,0	767,4	0	304,6	1,01	0,84	28,58	-46,32	0,30	1,96	-1,48	-17,74	9497,26	-220,30	21894,36	210,37
115	68,0	767,4	0	306,5	1,01	0,84	-49,35	-47,45	0,30	1,88	0,24	-96,80	9274,04	-225,83	22103,03	207,28
116	69,0	767,4	0	308,4	1,02	0,85	38,96	-48,61	0,30	1,79	0,83	-9,65	9045,66	-231,33	22308,85	203,90
117	70,0	767,4	0	310,1	1,02	0,85	-42,49	-49,85	0,30	1,70	-1,37	-92,34	8811,29	-237,06	22510,58	199,94
118	71,0	767,4	0	311,7	1,02	0,85	10,44	-50,76	0,30	1,56	2,37	-40,33	8572,15	-241,45	22709,30	197,20
119	72,0	767,4	0	313,3	1,02	0,85	-16,50	-52,06	0,30	1,46	-2,50	-68,56	8327,84	-247,06	22904,15	192,59
120	73,0	767,4	0	314,6	1,02	0,85	-23,42	-52,82	0,30	1,29	2,45	-76,24	8078,94	-250,69	23095,50	190,14
121	74,0	767,4	0	315,9	1,02	0,85	11,89	-54,07	0,30	1,17	-2,87	-42,19	7825,80	-255,79	23283,40	185,33
122	75,0	767,4	0	317,0	1,02	0,85	-48,30	-54,76	0,30	0,99	1,93	-103,06	7568,32	-258,89	23467,32	182,86
123	76,0	767,4	0	317,9	1,02	0,85	33,69	-55,91	0,30	0,85	-2,62	-22,22	7307,47	-263,25	23648,19	178,17
124	77,0	767,4	0	318,6	1,02	0,85	-65,33	-56,57	0,30	0,65	1,35	-121,90	7042,65	-265,91	23824,70	175,55
125	78,0	767,4	0	319,2	1,02	0,85	48,31	-57,58	0,30	0,49	-2,09	-9,27	6775,28	-269,45	23998,55	171,12

126	79,0	767,4	0	319,6	1,02	0,85	-78,88	-58,21	0,30	0,30	0,86	-137,09	6504,40	-271,65	24167,80	168,38
127	80,0	767,4	0	319,8	1,01	0,84	58,80	-59,09	0,30	0,13	-1,45	-0,28	6231,75	-274,37	24334,78	164,30
128	81,0	767,4	0	319,8	1,01	0,84	-92,34	-59,68	0,30	-0,07	0,36	-152,01	5956,12	-276,09	24497,02	161,48
129	82,0	767,4	0	319,7	1,01	0,84	67,34	-60,38	0,30	-0,25	-0,36	6,96	5679,54	-277,90	24657,52	157,99
130	83,0	767,4	0	319,3	1,00	0,84	-107,08	-60,96	0,30	-0,44	-0,36	-168,05	5400,51	-279,20	24813,19	154,99
131	84,0	767,4	0	318,8	1,00	0,83	66,15	-61,36	0,30	-0,59	2,30	4,79	5121,43	-279,80	24967,90	152,80
132	85,0	767,4	0	318,2	0,99	0,83	-117,28	-62,07	0,29	-0,69	-1,63	-179,35	4840,43	-281,13	25117,85	149,01
133	86,0	767,4	0	317,4	0,98	0,82	-6,47	-61,88	0,28	-0,85	5,72	-68,35	4560,11	-279,94	25267,61	149,60
134	87,0	767,4	0	316,5	0,98	0,81	-83,41	-62,97	0,28	-0,90	-4,53	-146,38	4278,93	-281,96	25413,92	143,87

## Графики для $\Delta t = 0,01$

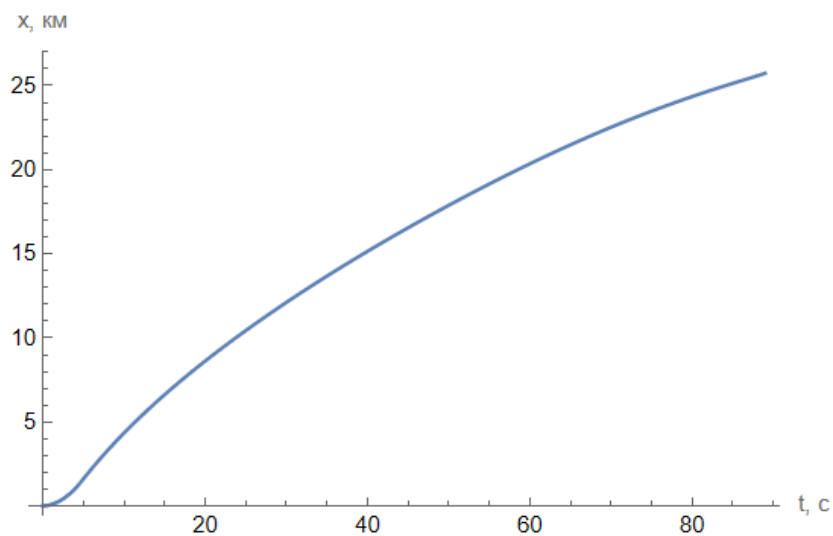


Рис. 4.11 График зависимости  $x(t)$  при  $\Delta t = 0,01$

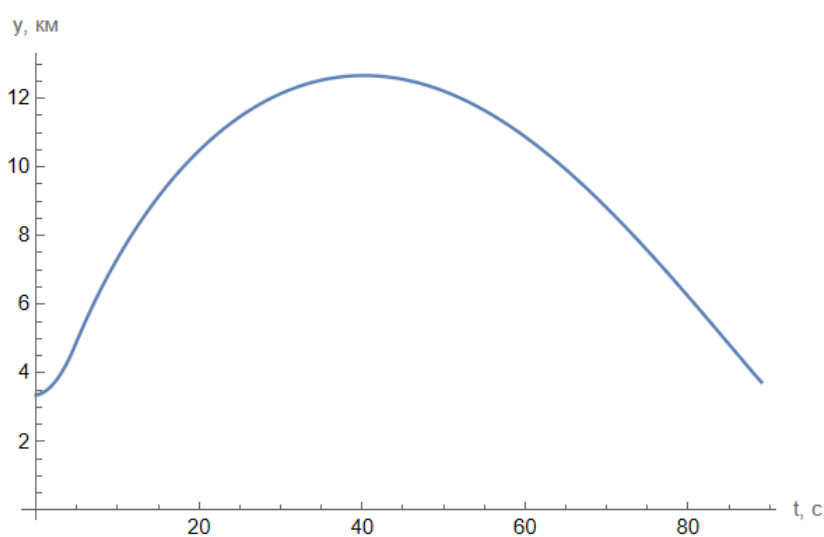


Рис. 4.12 График зависимости  $y(t)$  при  $\Delta t = 0,01$

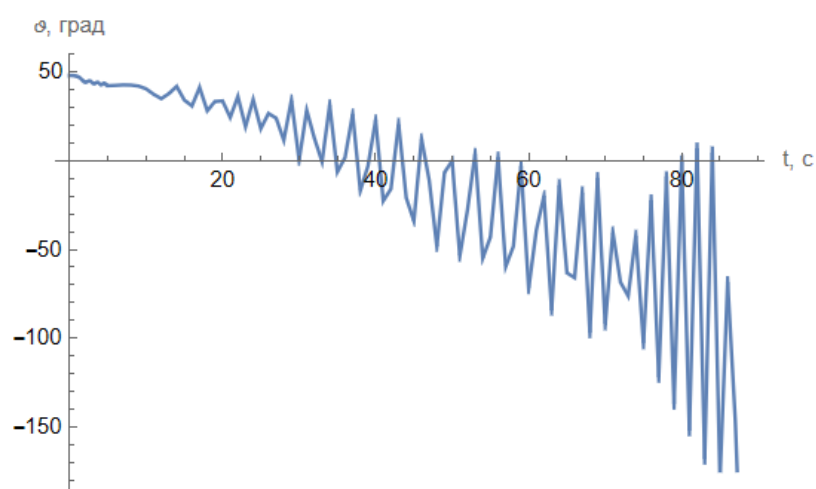


Рис. 4.13 График зависимости  $\vartheta(t)$  при  $\Delta t = 0,01$

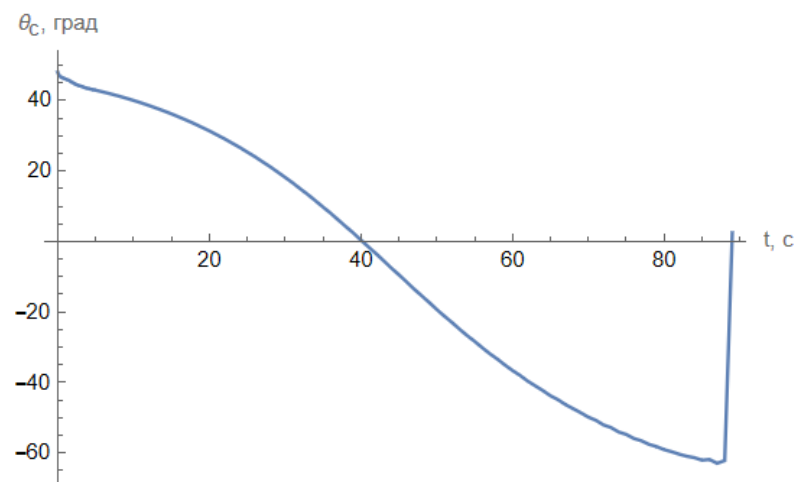


Рис. 4.14 График зависимости  $\theta_c(t)$  при  $\Delta t = 0,01$

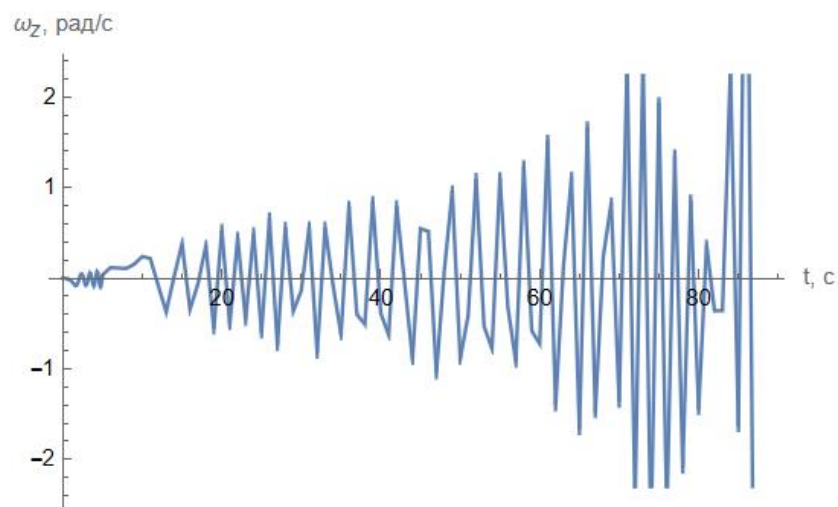


Рис. 4.15 График зависимости  $\omega_z(t)$  при  $\Delta t = 0,01$

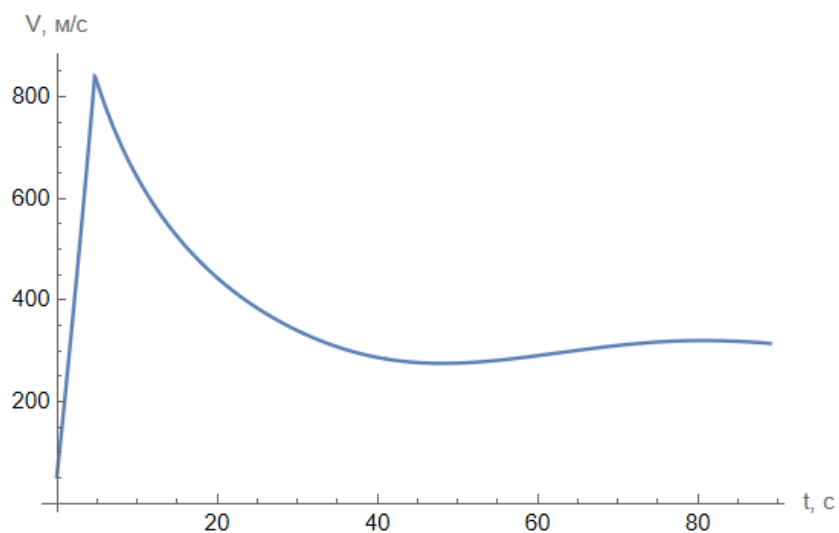


Рис. 4.16 График зависимости  $V(t)$  при  $\Delta t = 0,01$

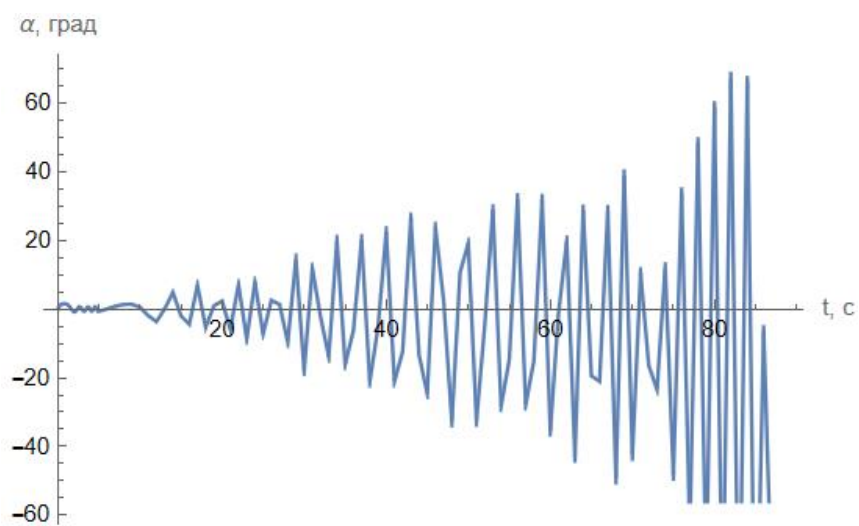


Рис. 4.17 График зависимости  $\alpha(t)$  при  $\Delta t = 0,01$

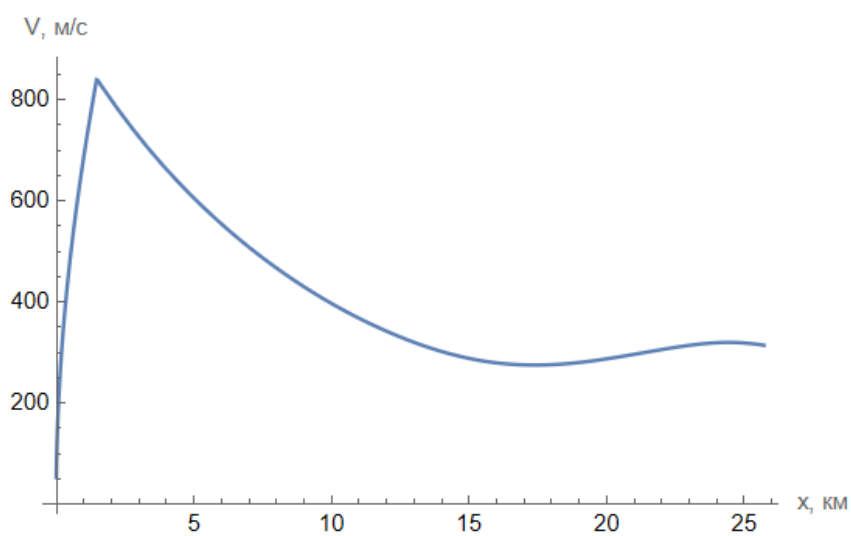


Рис. 4.18 График зависимости  $V(x)$  при  $\Delta t = 0,01$

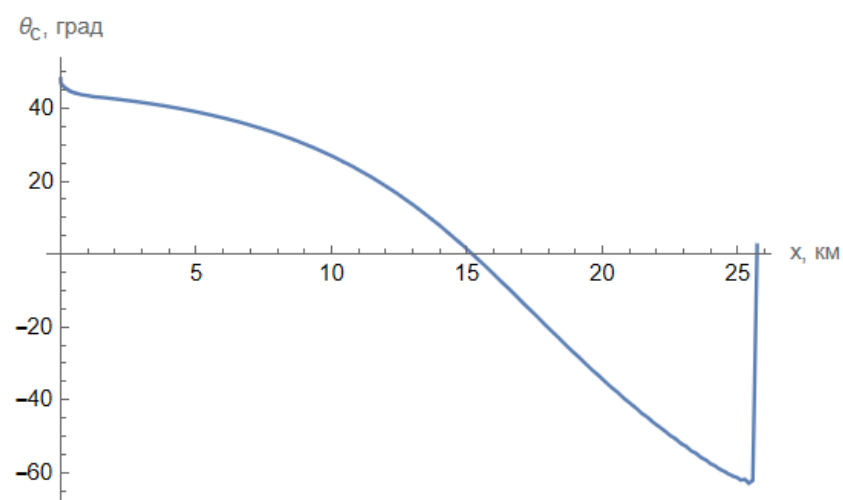


Рис. 4.19 График зависимости  $\theta_c(x)$  при  $\Delta t = 0,01$



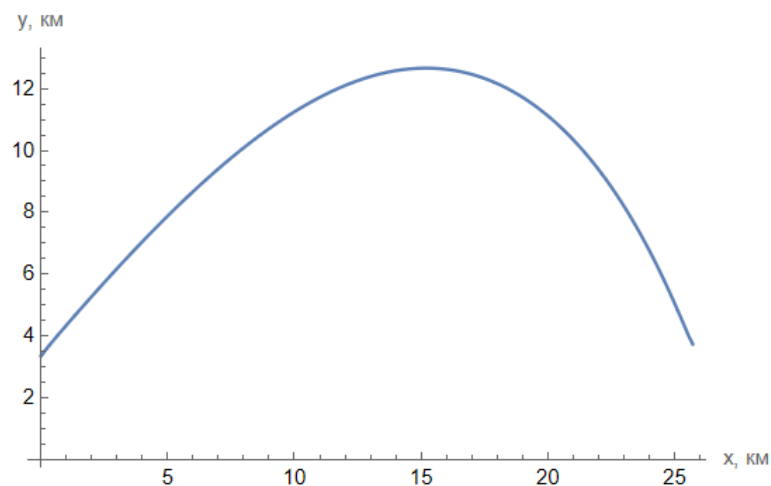


Рис. 4.20 График зависимости  $y(x)$  при  $\Delta t = 0,01$

Для шага интегрирования  $\Delta t = 0,001$ :

Таблица 5

*Результаты расчета для  $\Delta t = 0,001$*

$N$	$t, c$	$m, кг$	$P, Н$	$V, м/с$	$M$	$C_{xa}$	$\alpha$	$\theta_c$	$C_{ya}^a$	$\frac{dV}{dt}', м/с^2$	$\omega_z, 1/c$	$\vartheta, град$	$y, м$	$\frac{dy}{dt}', м/с$	$x, м$	$\frac{dx}{dt}', м/с$
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,0	1160,0	179450	53,0	0,16	0,30	0,00	48,00	0,25	147,35	0,00	48,00	3350,00	39,39	0,00	35,46
2	0,1	1151,7	179456	67,8	0,21	0,30	0,56	47,44	0,25	148,47	0,00	48,00	3354,46	49,94	4,06	45,85
3	0,2	1143,4	179463	82,7	0,25	0,30	0,91	47,09	0,25	149,58	0,00	48,00	3359,98	60,57	9,16	56,30
4	0,3	1135,1	179472	97,7	0,30	0,30	1,15	46,84	0,25	150,68	0,00	47,99	3366,57	71,28	15,31	66,83
5	0,4	1126,8	179482	112,8	0,34	0,30	1,32	46,66	0,25	151,78	0,00	47,98	3374,23	82,07	22,52	77,43
6	0,5	1118,5	179493	128,1	0,39	0,30	1,43	46,53	0,25	152,88	0,00	47,96	3382,97	92,93	30,79	88,11
7	0,6	1110,2	179505	143,4	0,44	0,30	1,51	46,42	0,25	153,98	-0,01	47,93	3392,80	103,88	40,13	98,86
8	0,7	1101,9	179519	158,9	0,49	0,30	1,55	46,32	0,25	155,09	-0,01	47,88	3403,74	114,89	50,55	109,70
9	0,8	1093,6	179535	174,4	0,53	0,30	1,56	46,24	0,25	156,20	-0,01	47,80	3415,77	125,98	62,07	120,63
10	0,9	1085,3	179552	190,1	0,58	0,33	1,53	46,17	0,25	157,22	-0,02	47,70	3428,92	137,13	74,67	131,64
11	1,0	1077,0	179570	205,9	0,63	0,38	1,47	46,10	0,25	158,13	-0,03	47,57	3443,19	148,33	88,39	142,75
12	1,1	1068,7	179590	221,7	0,68	0,43	1,36	46,03	0,25	158,99	-0,04	47,39	3458,58	159,56	103,21	153,94
13	1,2	1060,4	179611	237,7	0,73	0,48	1,21	45,95	0,25	159,78	-0,05	47,16	3475,09	170,81	119,17	165,23
14	1,3	1052,1	179633	253,7	0,78	0,53	1,00	45,87	0,25	160,50	-0,06	46,87	3492,73	182,07	136,25	176,63
15	1,4	1043,8	179657	269,7	0,83	0,59	0,74	45,78	0,24	161,03	-0,07	46,52	3511,49	193,31	154,48	188,14
16	1,5	1035,5	179682	285,9	0,88	0,66	0,44	45,67	0,21	161,36	-0,08	46,11	3531,38	204,50	173,87	199,76
17	1,6	1027,2	179709	302,0	0,93	0,74	0,11	45,55	0,23	161,54	-0,08	45,66	3552,38	215,61	194,43	211,48
18	1,7	1018,9	179737	318,2	0,98	0,81	-0,23	45,42	0,28	161,59	-0,08	45,20	3574,49	226,64	216,16	223,31
19	1,8	1010,6	179766	334,3	1,02	0,85	-0,51	45,28	0,30	161,74	-0,07	44,77	3597,69	237,57	239,08	235,24
20	1,9	1002,3	179797	350,5	1,07	0,86	-0,71	45,14	0,29	162,11	-0,05	44,43	3621,99	248,45	263,20	247,27
21	2,0	994,0	179828	366,8	1,13	0,86	-0,77	44,99	0,25	162,66	-0,02	44,22	3647,37	259,28	288,53	259,39
22	2,1	985,7	179861	383,1	1,18	0,84	-0,69	44,85	0,25	163,43	0,00	44,16	3673,84	270,14	315,07	271,59
23	2,2	977,4	179896	399,4	1,23	0,82	-0,47	44,72	0,25	164,18	0,03	44,25	3701,39	281,06	342,83	283,84
24	2,3	969,1	179931	415,9	1,28	0,81	-0,15	44,61	0,25	164,91	0,04	44,45	3730,04	292,05	371,82	296,10
25	2,4	960,8	179968	432,4	1,33	0,80	0,18	44,51	0,25	165,54	0,04	44,69	3759,79	303,15	402,04	308,36
26	2,5	952,5	180006	449,0	1,38	0,79	0,44	44,43	0,25	166,07	0,02	44,88	3790,66	314,34	433,48	320,61
27	2,6	944,2	180046	465,6	1,43	0,78	0,58	44,37	0,25	166,67	0,00	44,95	3822,65	325,60	466,15	332,87

28	2,7	935,9	180086	482,3	1,48	0,77	0,54	44,31	0,25	167,35	-0,03	44,85	3855,77	336,91	500,05	345,17
29	2,8	927,6	180128	499,1	1,54	0,76	0,34	44,24	0,25	168,05	-0,06	44,58	3890,02	348,22	535,18	357,56
30	2,9	919,3	180171	515,9	1,59	0,75	0,04	44,17	0,25	168,76	-0,07	44,21	3925,40	359,50	571,55	370,08
31	3,0	911,0	180216	532,9	1,64	0,73	-0,27	44,09	0,25	169,49	-0,06	43,82	3961,91	370,75	609,18	382,74
32	3,1	902,7	180261	549,8	1,69	0,72	-0,48	44,00	0,25	170,25	-0,04	43,52	3999,54	381,96	648,09	395,52
33	3,2	894,4	180308	566,9	1,75	0,71	-0,51	43,91	0,25	171,03	0,00	43,40	4038,29	393,17	688,28	408,42
34	3,3	886,1	180356	584,1	1,80	0,70	-0,36	43,82	0,25	171,85	0,03	43,47	4078,17	404,43	729,76	421,37
35	3,4	877,8	180405	601,3	1,86	0,68	-0,07	43,75	0,25	172,70	0,04	43,68	4119,17	415,79	772,54	434,35
36	3,5	869,5	180455	618,6	1,91	0,67	0,23	43,69	0,25	173,58	0,04	43,91	4161,32	427,26	816,62	447,33
37	3,6	861,2	180506	636,0	1,96	0,66	0,43	43,63	0,25	174,49	0,01	44,06	4204,61	438,85	862,00	460,33
38	3,7	852,9	180558	653,5	2,02	0,65	0,44	43,58	0,25	175,40	-0,03	44,02	4249,08	450,51	908,67	473,38
39	3,8	844,6	180612	671,1	2,08	0,64	0,25	43,53	0,25	176,24	-0,05	43,78	4294,71	462,20	956,66	486,52
40	3,9	836,3	180666	688,7	2,13	0,63	-0,04	43,47	0,25	177,10	-0,06	43,43	4341,50	473,88	1005,97	499,80
41	4,0	828,0	180722	706,5	2,19	0,62	-0,31	43,41	0,25	178,00	-0,05	43,10	4389,47	485,52	1056,61	513,22
42	4,1	819,7	180779	724,3	2,24	0,61	-0,42	43,34	0,25	178,94	-0,01	42,92	4438,60	497,16	1108,61	526,78
43	4,2	811,4	180836	742,3	2,30	0,60	-0,33	43,28	0,25	179,93	0,02	42,95	4488,89	508,85	1161,96	540,42
44	4,3	803,1	180895	760,3	2,36	0,59	-0,07	43,22	0,25	180,96	0,04	43,15	4540,36	520,64	1216,68	554,11
45	4,4	794,8	180955	778,5	2,42	0,58	0,22	43,17	0,25	182,04	0,03	43,38	4593,01	532,56	1272,77	567,81
46	4,5	786,5	181016	796,7	2,47	0,57	0,38	43,12	0,25	183,17	0,00	43,50	4646,86	544,61	1330,23	581,54
47	4,6	778,2	181078	815,1	2,53	0,56	0,33	43,08	0,25	184,36	-0,04	43,41	4701,92	556,74	1389,06	595,35
48	4,7	769,9	181140	833,6	2,59	0,55	0,09	43,04	0,25	185,61	-0,06	43,13	4758,20	568,91	1449,29	609,30
49	4,73	767,4	181159	839,2	2,61	0,55	0,00	43,02	0,25	185,92	-0,06	43,03	4775,32	572,56	1467,63	613,51
50	4,8	767,4	0	835,9	2,60	0,55	-0,19	42,99	0,25	-49,67	-0,05	42,79	4815,31	569,97	1510,51	611,47
51	4,9	767,4	0	831,0	2,59	0,55	-0,37	42,94	0,25	-49,05	-0,02	42,57	4872,12	566,09	1571,50	608,34
52	5,0	767,4	0	826,1	2,57	0,55	-0,34	42,89	0,25	-48,46	0,02	42,55	4928,54	562,26	1632,18	605,25
53	6,0	767,4	0	780,4	2,45	0,58	0,03	42,38	0,25	-43,08	0,04	42,40	5472,36	526,01	2222,77	576,50
54	7,0	767,4	0	739,7	2,34	0,59	0,29	41,83	0,25	-38,52	0,03	42,12	5981,74	493,30	2786,36	551,15
55	8,0	767,4	0	703,1	2,24	0,61	0,38	41,25	0,25	-34,63	0,02	41,63	6459,96	463,59	3326,08	528,68
56	9,0	767,4	0	670,2	2,14	0,63	0,34	40,63	0,25	-31,31	0,03	40,97	6909,78	436,42	3844,56	508,64
57	10,0	767,4	0	640,4	2,06	0,64	0,12	39,98	0,25	-28,46	0,04	40,09	7333,54	411,42	4344,09	490,70
58	11,0	767,4	0	613,2	1,98	0,65	-0,33	39,29	0,25	-26,03	0,03	38,96	7733,24	388,26	4826,61	474,57
59	12,0	767,4	0	588,2	1,91	0,67	-0,57	38,56	0,25	-24,00	-0,02	37,99	8110,57	366,63	5293,75	459,91
60	13,0	767,4	0	565,1	1,85	0,69	0,01	37,80	0,25	-22,20	-0,06	37,80	8466,95	346,31	5746,87	446,53
61	14,0	767,4	0	543,7	1,78	0,70	0,63	36,99	0,25	-20,60	-0,01	37,62	8803,61	327,16	6187,17	434,26
62	15,0	767,4	0	523,8	1,73	0,71	-0,21	36,15	0,25	-19,16	0,03	35,94	9121,62	309,02	6615,72	422,98
63	16,0	767,4	0	505,3	1,67	0,73	-0,47	35,26	0,25	-17,87	-0,05	34,79	9421,94	291,75	7033,45	412,60
64	17,0	767,4	0	488,0	1,62	0,74	0,70	34,34	0,25	-16,71	-0,02	35,04	9705,43	275,30	7441,17	402,98
65	18,0	767,4	0	471,9	1,58	0,75	-0,47	33,37	0,25	-15,65	0,02	32,90	9972,80	259,56	7839,65	394,07
66	19,0	767,4	0	456,7	1,53	0,76	0,10	32,36	0,25	-14,69	-0,07	32,45	10224,74	244,41	8229,54	385,80
67	20,0	767,4	0	442,5	1,49	0,77	0,23	31,30	0,25	-13,81	0,03	31,53	10461,84	229,86	8611,43	378,06
68	21,0	767,4	0	429,1	1,45	0,78	-0,45	30,19	0,25	-13,00	-0,06	29,75	10684,62	215,77	8985,86	370,86
69	22,0	767,4	0	416,4	1,41	0,79	0,57	29,04	0,25	-12,24	0,01	29,61	10893,57	202,16	9353,29	364,08
70	23,0	767,4	0	404,6	1,37	0,79	-0,61	27,84	0,25	-11,51	-0,05	27,24	11089,09	188,94	9714,17	357,74
71	24,0	767,4	0	393,4	1,34	0,80	0,58	26,59	0,25	-10,82	0,01	27,18	11271,60	176,12	10068,91	351,79
72	25,0	767,4	0	382,9	1,31	0,80	-0,46	25,30	0,25	-10,17	-0,06	24,83	11441,44	163,61	10417,88	346,21
73	26,0	767,4	0	373,0	1,28	0,81	0,24	23,95	0,25	-9,59	0,02	24,20	11598,95	151,44	10761,43	340,92
74	27,0	767,4	0	363,7	1,25	0,82	0,09	22,55	0,25	-9,05	-0,07	22,64	11744,41	139,49	11099,82	335,91
75	28,0	767,4	0	354,9	1,22	0,82	-0,48	21,11	0,25	-8,53	0,01	20,63	11878,05	127,82	11433,32	331,12
76	29,0	767,4	0	346,6	1,19	0,83	0,84	19,61	0,25	-8,04	-0,05	20,45	12000,12	116,34	11762,14	326,54
77	30,0	767,4	0	338,8	1,17	0,84	-0,96	18,06	0,25	-7,56	-0,03	17,10	12110,81	105,07	12086,47	322,15
78	31,0	767,4	0	331,5	1,14	0,85	0,74	16,47	0,25	-7,10	0,00	17,21	12210,34	94,00	12406,49	317,92

79	32,0	767,4	0	324,6	1,12	0,86	-0,14	14,83	0,25	-6,65	-0,07	14,69	12298,86	83,07	12722,36	313,84
80	33,0	767,4	0	318,2	1,10	0,87	-0,58	13,14	0,25	-6,20	0,00	12,56	12376,56	72,33	13034,22	309,89
81	34,0	767,4	0	312,3	1,08	0,87	1,03	11,40	0,28	-5,71	-0,04	12,43	12443,58	61,73	13342,20	306,10
82	35,0	767,4	0	306,8	1,06	0,86	-0,80	9,62	0,30	-5,24	-0,06	8,82	12500,08	51,28	13646,48	302,48
83	36,0	767,4	0	301,8	1,05	0,86	-0,05	7,81	0,31	-4,77	0,01	7,76	12546,21	41,00	13947,20	298,99
84	37,0	767,4	0	297,2	1,03	0,85	0,93	5,95	0,31	-4,32	-0,05	6,87	12582,11	30,81	14244,51	295,64
85	38,0	767,4	0	293,1	1,02	0,85	-0,99	4,06	0,30	-3,88	-0,05	3,07	12607,89	20,76	14538,53	292,41
86	39,0	767,4	0	289,5	1,01	0,84	0,09	2,15	0,30	-3,45	0,01	2,24	12623,69	10,84	14829,37	289,28
87	40,0	767,4	0	286,2	0,99	0,83	0,94	0,20	0,29	-3,02	-0,06	1,14	12629,60	0,99	15117,12	286,24
88	41,0	767,4	0	283,4	0,98	0,82	-0,99	-1,77	0,28	-2,58	-0,05	-2,75	12625,71	-8,74	15401,89	283,31
89	42,0	767,4	0	281,1	0,98	0,81	-0,12	-3,74	0,28	-2,16	0,01	-3,87	12612,17	-18,36	15683,78	280,48
90	43,0	767,4	0	279,1	0,97	0,80	1,12	-5,74	0,27	-1,75	-0,05	-4,62	12589,03	-27,91	15962,89	277,73
91	44,0	767,4	0	277,6	0,96	0,79	-0,74	-7,74	0,26	-1,37	-0,07	-8,47	12556,39	-37,36	16239,27	275,05
92	45,0	767,4	0	276,4	0,96	0,78	-0,61	-9,73	0,26	-1,00	0,00	-10,34	12514,35	-46,71	16513,00	272,41
93	46,0	767,4	0	275,6	0,96	0,78	1,17	-11,72	0,26	-0,65	-0,03	-10,56	12463,00	-55,99	16784,11	269,81
94	47,0	767,4	0	275,1	0,95	0,77	-0,22	-13,71	0,25	-0,32	-0,07	-13,93	12402,40	-65,19	17052,64	267,24
95	48,0	767,4	0	274,9	0,95	0,77	-1,04	-15,68	0,25	-0,01	-0,01	-16,71	12332,67	-74,28	17318,60	264,69
96	49,0	767,4	0	275,0	0,95	0,77	0,93	-17,63	0,25	0,28	-0,01	-16,70	12253,89	-83,28	17582,01	262,14
97	50,0	767,4	0	275,5	0,95	0,77	0,33	-19,56	0,25	0,55	-0,07	-19,22	12166,14	-92,20	17842,87	259,57
98	51,0	767,4	0	276,1	0,95	0,77	-1,20	-21,45	0,25	0,80	-0,03	-22,65	12069,53	-101,00	18101,16	257,01
99	52,0	767,4	0	277,1	0,95	0,77	0,58	-23,32	0,25	1,03	0,00	-22,75	11964,18	-109,70	18356,88	254,42
100	53,0	767,4	0	278,2	0,96	0,78	0,67	-25,17	0,26	1,24	-0,07	-24,49	11850,17	-118,30	18609,99	251,79
101	54,0	767,4	0	279,5	0,96	0,78	-1,18	-26,97	0,26	1,42	-0,04	-28,15	11727,63	-126,76	18860,46	249,13
102	55,0	767,4	0	281,0	0,96	0,79	0,40	-28,73	0,26	1,59	0,01	-28,33	11596,70	-135,10	19108,25	246,44
103	56,0	767,4	0	282,7	0,96	0,79	0,72	-30,46	0,26	1,73	-0,06	-29,74	11457,48	-143,32	19353,31	243,68
104	57,0	767,4	0	284,5	0,97	0,80	-1,17	-32,15	0,27	1,85	-0,03	-33,32	11310,13	-151,38	19595,59	240,87
105	58,0	767,4	0	286,4	0,97	0,80	0,57	-33,79	0,27	1,94	0,01	-33,22	11154,79	-159,28	19835,04	238,01
106	59,0	767,4	0	288,4	0,98	0,81	0,41	-35,40	0,28	2,02	-0,07	-34,99	10991,62	-167,04	20071,58	235,06
107	60,0	767,4	0	290,4	0,98	0,81	-1,09	-36,96	0,28	2,07	-0,01	-38,05	10820,78	-174,61	20305,15	232,07
108	61,0	767,4	0	292,5	0,99	0,82	1,01	-38,48	0,29	2,10	-0,01	-37,47	10642,47	-182,00	20535,69	228,99
109	62,0	767,4	0	294,6	0,99	0,83	-0,41	-39,96	0,29	2,12	-0,07	-40,37	10456,85	-189,21	20763,11	225,83
110	63,0	767,4	0	296,7	0,99	0,83	-0,38	-41,39	0,29	2,11	0,02	-41,77	10264,13	-196,19	20987,34	222,62
111	64,0	767,4	0	298,8	1,00	0,84	0,91	-42,79	0,30	2,08	-0,05	-41,88	10064,53	-203,00	21208,31	219,30
112	65,0	767,4	0	300,9	1,00	0,84	-1,12	-44,14	0,30	2,05	-0,02	-45,27	9858,23	-209,56	21425,92	215,92
113	66,0	767,4	0	302,9	1,01	0,84	0,96	-45,46	0,30	2,01	0,00	-44,50	9645,49	-215,91	21640,14	212,48
114	67,0	767,4	0	304,9	1,01	0,84	-0,62	-46,74	0,30	1,95	-0,06	-47,36	9426,49	-222,05	21850,86	208,96
115	68,0	767,4	0	306,8	1,01	0,84	0,18	-47,98	0,30	1,88	0,03	-47,80	9201,48	-227,93	22058,05	205,40
116	69,0	767,4	0	308,7	1,02	0,85	0,20	-49,19	0,30	1,79	-0,07	-48,99	8970,69	-233,61	22261,63	201,75
117	70,0	767,4	0	310,4	1,02	0,85	-0,53	-50,35	0,30	1,69	0,03	-50,88	8734,37	-239,00	22461,54	198,07
118	71,0	767,4	0	312,0	1,02	0,85	0,73	-51,49	0,30	1,57	-0,06	-50,76	8492,77	-244,17	22657,74	194,30
119	72,0	767,4	0	313,5	1,02	0,85	-0,88	-52,59	0,30	1,44	0,02	-53,47	8246,15	-249,04	22850,14	190,50
120	73,0	767,4	0	314,9	1,02	0,85	0,94	-53,66	0,30	1,30	-0,05	-52,72	7994,77	-253,68	23038,71	186,61
121	74,0	767,4	0	316,2	1,02	0,85	-0,99	-54,70	0,30	1,16	0,01	-55,69	7738,90	-258,02	23223,37	182,71
122	75,0	767,4	0	317,2	1,02	0,85	0,98	-55,71	0,30	1,00	-0,04	-54,73	7478,83	-262,09	23404,09	178,72
123	76,0	767,4	0	318,1	1,02	0,85	-0,97	-56,69	0,30	0,83	0,01	-57,66	7214,82	-265,87	23580,82	174,72
124	77,0	767,4	0	318,9	1,02	0,85	0,91	-57,65	0,30	0,66	-0,05	-56,74	6947,17	-269,39	23753,52	170,66
125	78,0	767,4	0	319,5	1,02	0,85	-0,82	-58,57	0,30	0,48	0,03	-59,39	6676,15	-272,59	23922,14	166,59
126	79,0	767,4	0	319,9	1,02	0,85	0,63	-59,48	0,30	0,31	-0,07	-58,84	6402,07	-275,54	24086,67	162,45
127	80,0	767,4	0	320,1	1,01	0,84	-0,39	-60,35	0,30	0,12	0,05	-60,74	6125,19	-278,17	24247,07	158,34
128	81,0	767,4	0	320,1	1,01	0,84	0,04	-61,21	0,30	-0,06	-0,08	-61,17	5845,82	-280,54	24403,32	154,16
129	82,0	767,4	0	320,0	1,01	0,84	0,35	-62,04	0,30	-0,24	0,05	-61,69	5564,22	-282,61	24555,42	150,02

130	83,0	767,4	0	319,6	1,00	0,84	-0,76	-62,85	0,30	-0,42	-0,06	-63,61	5280,68	-284,42	24703,34	145,83
131	84,0	767,4	0	319,1	1,00	0,83	1,04	-63,64	0,30	-0,55	0,01	-62,60	4995,48	-285,96	24847,12	141,70
132	85,0	767,4	0	318,5	0,99	0,83	-1,12	-64,41	0,29	-0,66	0,00	-65,53	4708,82	-287,30	24986,74	137,57
133	86,0	767,4	0	317,8	0,98	0,82	0,89	-65,17	0,28	-0,76	-0,06	-64,28	4420,94	-288,44	25122,28	133,49
134	87,0	767,4	0	317,0	0,98	0,81	-0,40	-65,89	0,28	-0,86	0,06	-66,29	4132,01	-289,38	25253,75	129,49
135	88,0	767,4	0	316,1	0,97	0,80	-0,27	-66,61	0,27	-0,94	-0,09	-66,88	3842,23	-290,15	25381,24	125,48
136	89,0	767,4	0	315,1	0,97	0,79	0,86	-67,30	0,27	-1,02	0,04	-66,44	3551,78	-290,74	25504,78	121,60
137	90,0	767,4	0	314,1	0,96	0,78	-1,17	-67,98	0,26	-1,10	-0,02	-69,16	3260,80	-291,18	25624,43	117,73
138	91,0	767,4	0	312,9	0,95	0,77	1,00	-68,65	0,25	-1,16	-0,05	-67,64	2969,48	-291,46	25740,28	113,95
139	92,0	767,4	0	311,8	0,95	0,76	-0,41	-69,29	0,25	-1,22	0,06	-69,70	2677,93	-291,60	25852,37	110,26
140	93,0	767,4	0	310,5	0,94	0,75	-0,42	-69,92	0,24	-1,28	-0,09	-70,34	2386,30	-291,63	25960,79	106,59
141	94,0	767,4	0	309,2	0,93	0,74	1,06	-70,53	0,23	-1,32	0,03	-69,47	2094,72	-291,52	26065,62	103,06
142	95,0	767,4	0	307,9	0,92	0,73	-1,22	-71,13	0,22	-1,36	0,01	-72,34	1803,29	-291,31	26166,92	99,57
143	96,0	767,4	0	306,5	0,92	0,72	0,74	-71,71	0,22	-1,39	-0,08	-70,98	1512,12	-291,01	26264,79	96,16
144	97,0	767,4	0	305,1	0,91	0,71	0,13	-72,28	0,21	-1,42	0,08	-72,15	1221,31	-290,60	26359,30	92,87
145	98,0	767,4	0	303,6	0,90	0,70	-0,97	-72,84	0,20	-1,44	-0,07	-73,81	930,94	-290,12	26450,53	89,61
146	99,0	767,4	0	302,2	0,89	0,69	1,29	-73,37	0,20	-1,45	-0,01	-72,08	641,10	-289,56	26538,58	86,47
147	100,0	767,4	0	300,7	0,89	0,68	-0,90	-73,89	0,21	-1,46	0,06	-74,80	351,85	-288,94	26623,51	83,43
148	101,0	767,4	0	299,3	0,88	0,67	-0,03	-74,41	0,21	-1,45	-0,10	-74,45	63,24	-288,28	26705,44	80,42
149	101,2	767,4	0	299,0	0,88	0,67	-1,03	-74,52	0,21	-1,45	-0,07	-75,55	-0,17	-288,12	26723,06	79,79

# Графики для $\Delta t = 0,001$

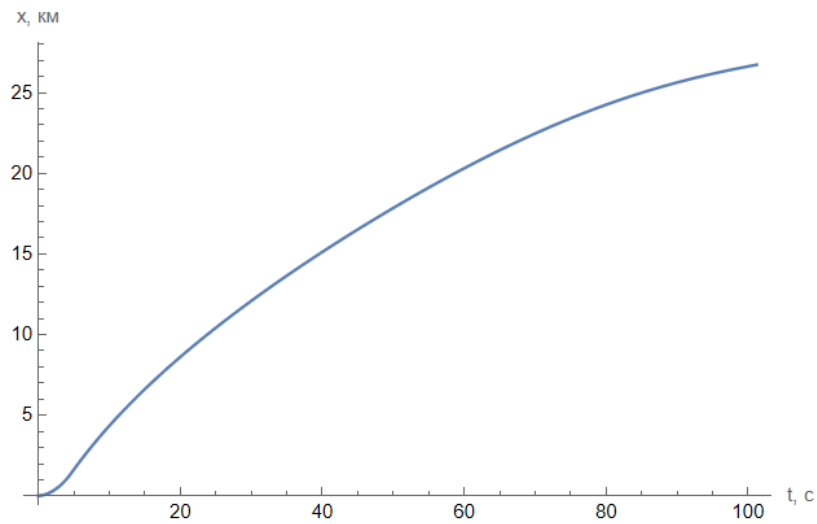


Рис. 4.21 График зависимости  $x(t)$  при  $\Delta t = 0,001$

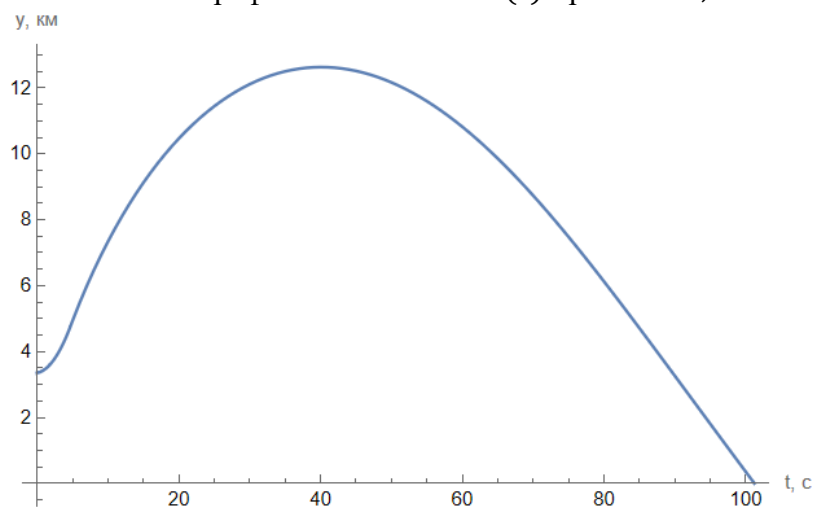


Рис. 4.22 График зависимости  $y(t)$  при  $\Delta t = 0,001$

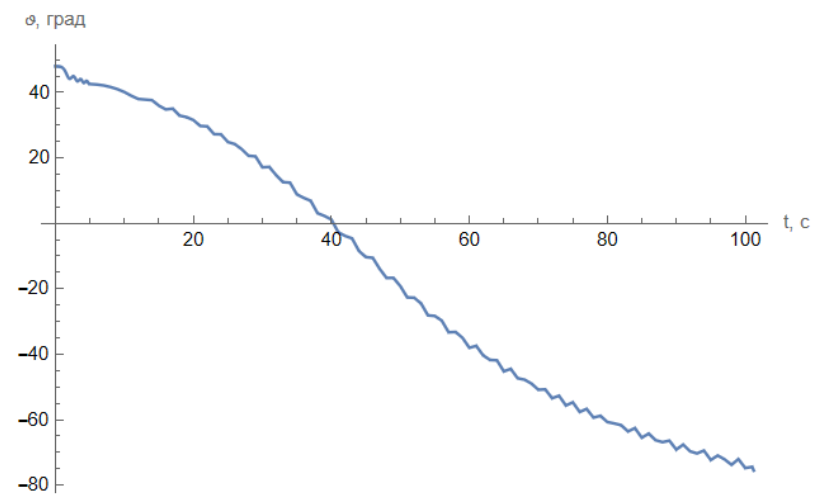


Рис. 4.23 График зависимости  $\vartheta(t)$  при  $\Delta t = 0,001$

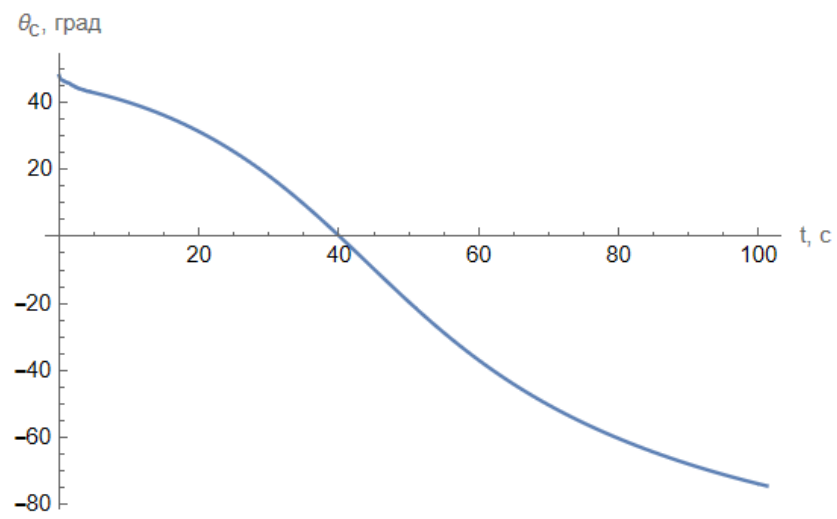


Рис. 4.24 График зависимости  $\theta_c(t)$  при  $\Delta t = 0,001$

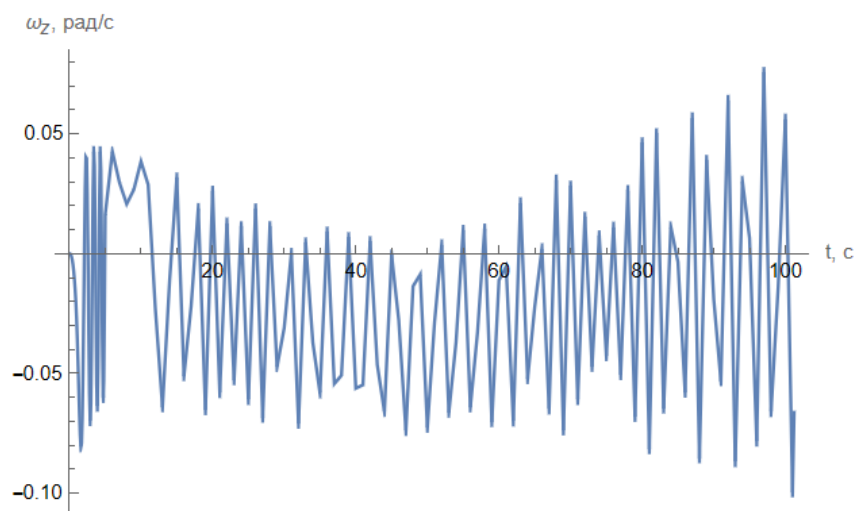


Рис. 4.25 График зависимости  $\omega_z(t)$  при  $\Delta t = 0,001$

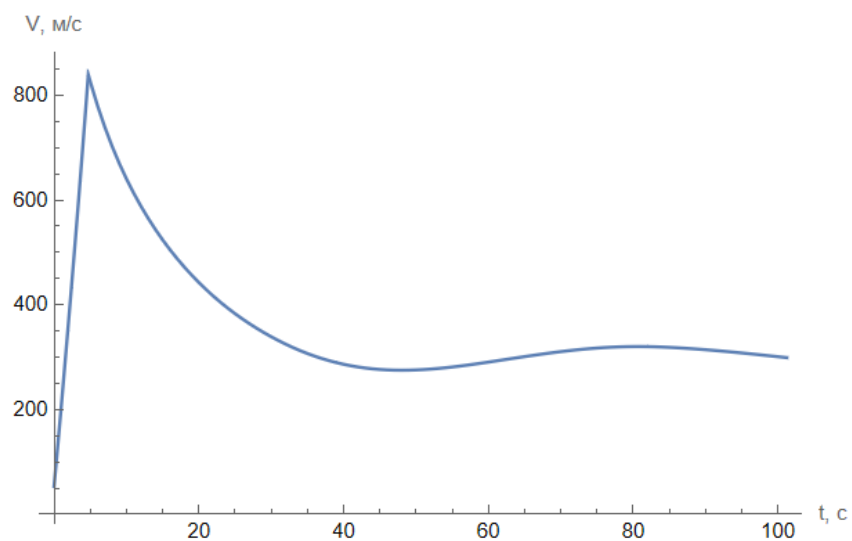


Рис. 4.26 График зависимости  $V(t)$  при  $\Delta t = 0,001$

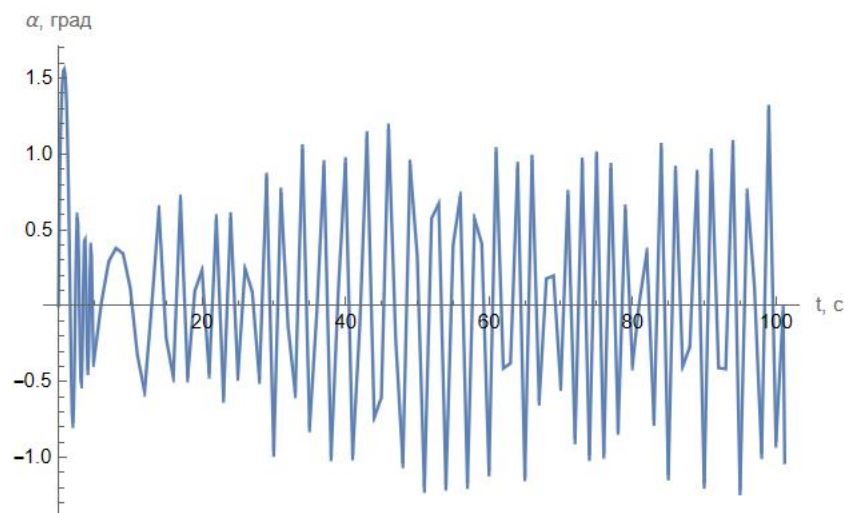


Рис. 4.27 График зависимости  $\alpha(t)$  при  $\Delta t = 0,001$

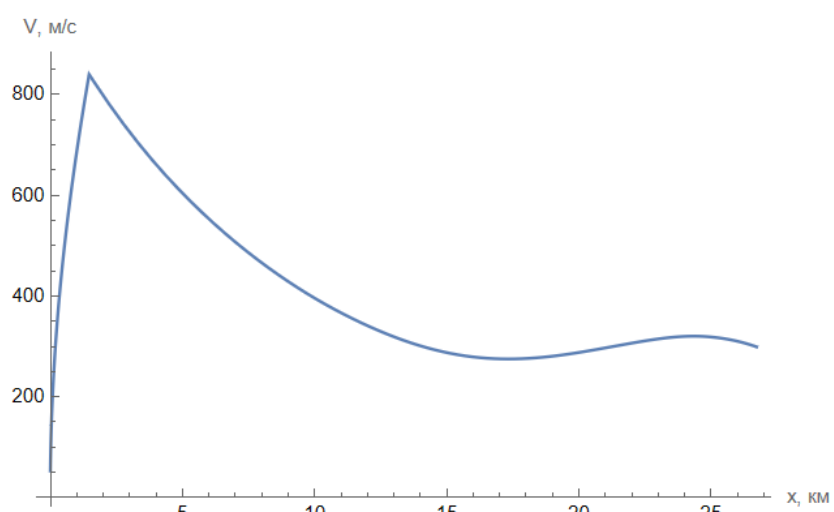


Рис. 4.28 График зависимости  $V(x)$  при  $\Delta t = 0,001$

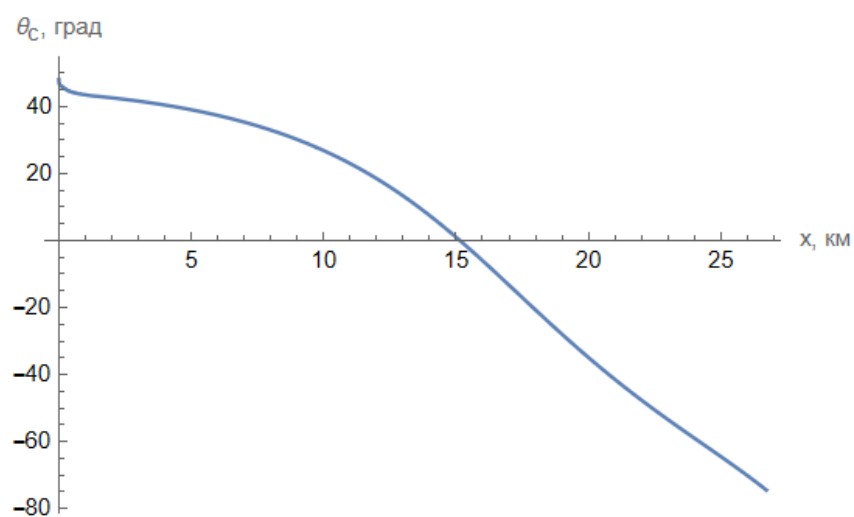


Рис. 4.29 График зависимости  $\theta_c(x)$  при  $\Delta t = 0,001$

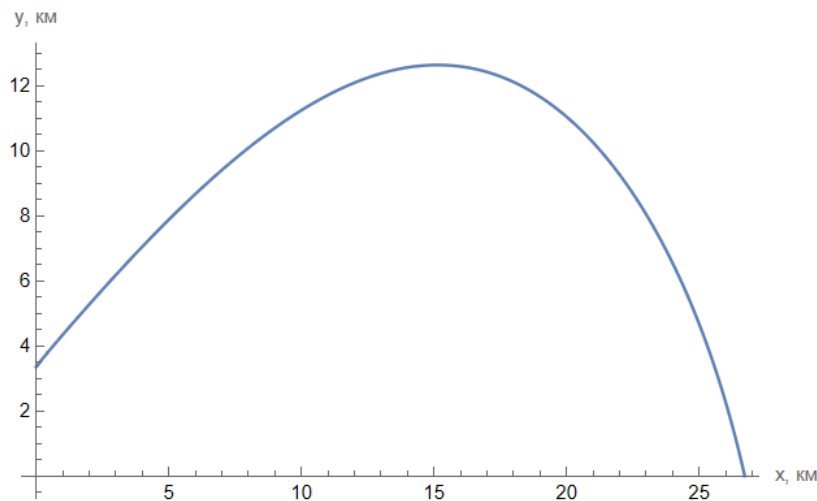


Рис. 4.30 График зависимости  $y(x)$  при  $\Delta t = 0,001$

## 5. Выводы

Недостаточно малый шаг интегрирования не позволяет рассчитать параметры движения ЛА, отвечающие реальным физическим процессам. Это обусловлено тем, что при интегрировании методом Эйлера на каждом шаге есть ошибка интегрирования, которая тем больше, чем больше шаг интегрирования, причём ошибка с каждым шагом накапливается.

Выбор избыточно малого шага интегрирования также недопустимо, ведь от этого процесс вычисления занимает ощутимо больше времени (ввиду ограниченной мощности ЭВМ) при несущественно большей точности, что является нерациональным подходом расчёта.

Таким образом, следует выбирать оптимальный шаг интегрирования, при котором параметры движения ЛА на траектории будут достаточно точными и будут соответствовать физической сущности задачи.

По заданным начальным условиям были определены параметры движения ЛА на АУТ и ПУТ, по ним были построены графики зависимостей этих параметров от времени и от координаты  $x$ , была построена траектория полёта ЛА. В верхней точке траектории ускорение точки ц.м. ЛА по оси  $y$  оказалось равным нулю, скоростной угол тангажа тоже оказался равным нулю, ровно как и угол тангажа, который на всём участке траектории стремился к скоростному углу тангажа, отличаясь лишь на малый угол атаки  $\alpha$ , который стремился к нулю за счёт стабилизирующего момента, т.к. центр давления располагается за центром масс относительно носа ЛА.



Сразу после отключения тяги (конец АУТ, начало ПУТ), скорость ЛА стала снижаться за счёт действующих на ЛА аэродинамических сил сопротивления.

Некоторые характерные данные полёта:

- Максимальная высота подъёма ЛА: ~12630 м
- Максимальная скорость ЛА была достигнута в конце АУТ в момент времени  $t_k = 4,73$  с и составила 839,2 м/с или 2,61 Маха (аппарат летел на сверхзвуке)
- Дальность полёта ЛА: 26723 м
- Скорость столкновения ЛА с поверхностью составила 299 м/с
- Время полёта: 101,2 с