Ҝ Њ

.. , .. , .., ..

-

2018

66.011:51.74+519.2
35.11:22.1
49
..
- : / ..ґ, ..ґ; - . , . . . -. : , 2011. 100 . ISBN
- : ; . , , Mathcad. , к - њ. к њ.
-
: - . , ... , . ..
ISBN .., .., 2011 , 2011

- , . , . , , .
- , , , ..; . , , , .
, . , , , .
к – њ [1], . . Mathcad, . . (
,), .

1 Mathcad

: Mathcad; ; .

Mathcad — , . Mathcad , . , , Windows-, Mathcad. , . Mathcad .

:

- — ;
- / — ;
- — , ;
- / — ;
- — .
- — (, , ..);
- — ;
- — , ;
- — (, , ..);
- — .

. . . . , — . .

. , :

- ( );
- к:=њ, , : ;
- , , ;
- .

Mathcad :

- ;

- ( );
- .

Mathcad , .. . , . , .

$A = 1\ A$	Переменная А не определена
$A := 3$	А и а - разные переменные
$a := 5$	
$A = 3$	

, . . : ρ_g ρ_l . . , .

$$\rho_l := 1000$$
$$\rho_V := 1.3$$

Mathcad , (USCS) "--"(). . , . , .
.

Mathcad

		Создаем переменные
$F := 10\ N$		- давление
$a := 10\ m$		- длину
$b := 300\ mm$		- ширину
$S := a \cdot b$	$S = 3\ m^2$	Вычисляем площадь
$P := \dfrac{F}{S}$	$P = 3.333\ Pa$	Вычисляем давление

(,), , :

- , ;
- — , .

Mathcad :

- / ;

- ;
- ;
- ;
- , .

/ Ctrl + M. : ⇧ + Enter — , ⇧ + space — .

, . , , , .
, . , . . . Mathcad . ,
ORIGIN .
- , . / , [. , , , , . . ,
— . . .

$$A := \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 4 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$ Задаем произвольные матрицы

$$B := \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

$$A \cdot B = \begin{bmatrix} 8 & 11 & 14 \\ 12 & 16 & 20 \\ 8 & 9 & 10 \end{bmatrix}$$ Матричное умножение

$$\overrightarrow{A \cdot B} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 6 & 8 \\ 3 & 4 & 3 \end{bmatrix}$$ Умножение соотвествующих элементов двух матриц

. , (Ctrl + ⇧ + C Ctrl + ⇧ + R) .
, / Ctrl + ⇧ + ^. , , . .

$$A := \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 4 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$ Задаем произвольные матрицы

$$B := \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

$$A \cdot B = \begin{bmatrix} 8 & 11 & 14 \\ 12 & 16 & 20 \\ 8 & 9 & 10 \end{bmatrix}$$ Матричное умножение

$$\overrightarrow{A \cdot B} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 6 & 8 \\ 3 & 4 & 3 \end{bmatrix}$$ Умножение соотвествующих элементов двух матриц

. — , . Mathcad (,).
, . :

- .
- ґ . , . . .
- , .

. . , , . .

$a := 1..3$ Задаем ранжированную переменную (шаг по умолчанию равен 1)

$$a = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

$b := 1, 1.4..3$ Ранжированная переменная с шагом 0,4

$$b = \begin{bmatrix} 1 \\ 1.4 \\ 1.8 \\ 2.2 \\ 2.6 \\ 3 \end{bmatrix}$$

, Mathcad , . , , .

Mathcad . . . / Ctrl + 6. .
.

a (m)	b (m)	c (m)
1	1.2	2
2	1.5	3
3	1.8	4

$$a = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} m \qquad b = \begin{bmatrix} 1.2 \\ 1.5 \\ 1.8 \end{bmatrix} m \qquad c = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} m$$

Mathcad :

- ;
- .

, . :

- ;
- , , ;
- :=;
- , , .

, .

— , Mathcad . , . . .

$$f(x) := 1 + \sin(x) + \cos(x)$$ Пользовательская функция

$$f(5) = 0.325$$ Вызов пользовательской функции

$$f2(x, y) := x^2 + y^2$$ Функция двух переменных

$$f2(2, 4) = 20$$

Mathcad . , Ctrl + T ( ). . Mathcad , . , , . (Ctrl + ⇧ + T) .

. , . , . (⇧ + Enter Del.)

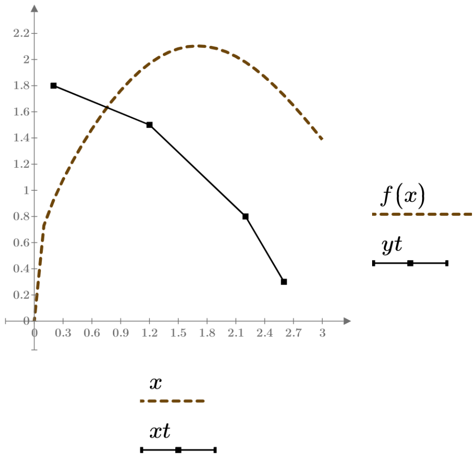
, (, ; , ..).

$f(x) := \sin(x) + x^{0.2}$ Пользовательская функция

$x := 0, 0.1 .. 3$ Диапазон данных для построения графика

Таблица данных для построения графика

xt	yt
0.2	1.8
1.2	1.5
2.2	0.8
2.6	0.3



Mathcad : , , .. → Ctrl + . . .
solve . solve, .

$$\int \sin(x)\, dx \rightarrow -\cos(x)$$

$$\frac{d}{dx} x^3 + x \rightarrow 3 \cdot x^2 + x$$

$$x^2 + x - 10 \xrightarrow{solve} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{41}}{2} - \frac{1}{2} \\ -\frac{\sqrt{41}}{2} - \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

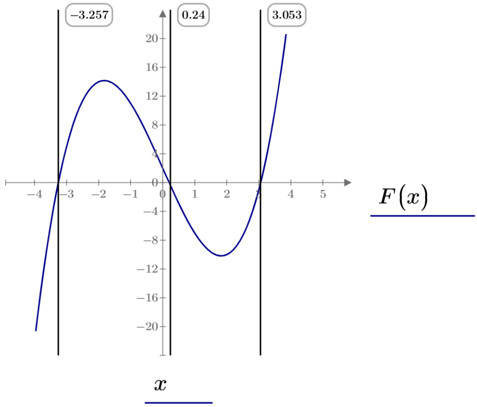
Mathcad root. , ., , . , , .
, , , root : rot (f(x), x, a, b), f(x) — , , — , b
— . , . root . , .
, , root : rot(f(x), x). root x .
. Mathcad , TOL ( ). , TOL, , (,).

Задаем функцию, сотвествующую нашему уравнению:

$F(x) := x^3 - 10 \cdot x + 2$

Графическое представление корней:

$x := -4, -3.9 .. 5$



$\mathbf{root}(F(x), x, -5, -2) = -3.258$

$\mathbf{root}(F(x), x, -2, 2) = 0.201$

$\mathbf{root}(F(x), x, 2, 5) = 3.057$

$x := 1.6$

$\mathbf{root}(F(x), x) = 0.201$

$x := 1.7$

$\mathbf{root}(F(x), x) = 3.057$

Mathcad Ctrl + 1 . , , 250 1000 . .
:

- , . Mathcad . , .
- . , Ctrl + = .
- find. , . , .

Начальные приближения

$x := 10 \qquad y := 5$

Ограничения

$$\sqrt{x} + \sqrt{y} = 9$$

$$\sqrt[3]{x} + \sqrt[3]{y} = 5$$

Решатель

$$\mathbf{find}(x, y) = \begin{bmatrix} 64 \\ 1 \end{bmatrix}$$

1. Mathcad?
2. Mathcad?
3. ?
4. Mathcad, ?
5. ?
6. ?
7. ?
8. ?

2 ,

: Mathcad ; , .

— y x_1,x_2,...,x_n. r_{xy}. :

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}),}{\sigma_x \sigma_y} \qquad (2.1)$$

σ_x σ_y — , :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}, \qquad (2.2)$$

$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n} x_i$. y.

Mathcad `corr (x,y)` (`x` `y` — ,). , . , .
r, y x .

, . Mathcad . , . , , .

— , . :

$$err_i = \frac{|y_i - y(x_i)|}{y_i} 100\ \%, \qquad (2.3)$$

$$err_{av} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} err_i, \qquad (2.4)$$

y_i, $y(x_i)$ — ; n — ; err_i — i ( ); err_{av} — .

Mathcad : `mean(S)` `S`, `max(S)` — .

$y = ax + b$. x `VX` `Y` `VY`, : `Y = slope(VX, VY)X + intercept(VX, VY)`, `slope(VX, VY)` — : `VX` `VY` (a); `intercept(VX, VY) -` : `VX` `VY` (b).

1: , , . . , .

Задание исходных данных:

x	y
0	2
1	3.5
2	6
3	8
4	10
5	13
6	16
7	17

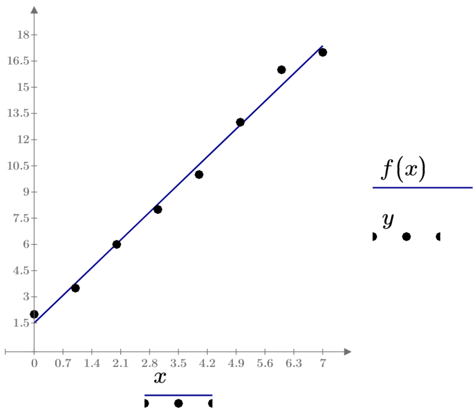
Вычисление коэффициента корреляции:

$r_{xy} := \mathrm{corr}(x, y) = 0.996$

Запись аппроксимирующей функции:

$f(arg) := \mathrm{slope}(x, y) \cdot arg + \mathrm{intercept}(x, y)$

Графическое сравнение исходных данных и аппроксимирующей прямой:



Вычисление среднего и макссимального относительного отклонения:

$y2 := f(x)$ Значения функции при исслеудемых значениях аргумента

$$\mathrm{mean}\left(\overrightarrow{\left|\frac{y2-y}{y}\right|}\right) \cdot 100 = 6.472$$

функция mean вычисляет среднее значение массива, под знаком векторизации модуль (т.к. отлонение может быть как положительным, так и отрицательным)

$$\max\left(\overrightarrow{\left|\frac{y2-y}{y}\right|}\right) \cdot 100 = 25$$

, :

$$y(x) = \sum_{i=0}^{n} a_i x^i \tag{2.5}$$

a — . `regress`, . $n = 4$. `regress` , .

`regress(vx, vy, n)` — , `interp`, `n`, `vx` `vy`. `vx` `vy` — m- , x y.

`interp (vs, vx, vy, x)` — y, x. `vs` `regress` `vx` `vy`.

2: . . , . .

Задание исходных данных:

x	y
0	0.1
1	0.3
2	0.6
3	2
4	2.5
5	4
6	6

Формирование вектора, необходимого для функции interp:

$vs := \mathrm{regress}(x, y, 3)$

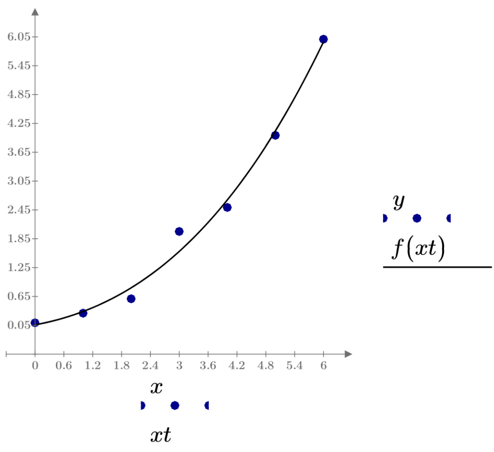
Задание аппроксимирующей функции:

$f(arg) := \mathrm{interp}(vs, x, y, arg)$

Диапазон построение данных (строим от первого до последнего элемента таблицы с шагом 0.1)

$xt := x_0, x_0 + 0.1 .. x_{\mathrm{rows}(x)-1}$

Графическое сравнение исходных данных и аппроксимирующей прямой:



— , . — : $a_0, a_1, ..., a_N$, $F(x) = a_0 f_0(x) + a_1 f_1(x) + ... + a_N f_N(x)$, $N+1$ $f_i(x)$, , $F(x)$?

Mathcad `linfit(x, y, F)`, `x` `y` — , `F` — , , .

3: y x. `linfit` y x. $F(x) = a_0 \sin(x) + a_1 \cos(2x) + a_2 \sqrt[3]{x} + a_3 x$. .

Задание исходных данных:

x	y
−5	−36
−4	−24
−3	−18
−2	−17
−1	−16
0	1
0.5	9
1	15
1.5	14
2	19
2.5	24

Функции, составляющее линейное сочетание:

$$F(x) := \begin{bmatrix} \sin(x) \\ \cos(2 \cdot x) \\ \sqrt[3]{x} \\ x \end{bmatrix}$$

Определенные значения параметров:

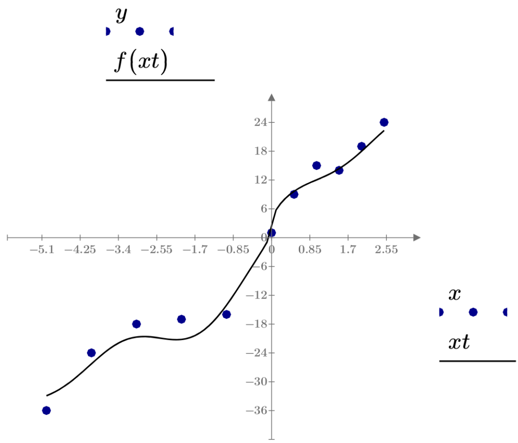
$$p := \mathrm{linfit}(x, y, F) = \begin{bmatrix} 3.18 \\ 2.464 \\ 5.449 \\ 4.92 \end{bmatrix}$$

Задание аппроксимирующей функции:

$f(x) := p \cdot F(x)$

Задание диапазона построения графика, с шагом 0.1:

$xt := x_0, x_0 + 0.1 .. x_{\mathrm{rows}(x)-1}$



$F(x) = f_0(a_0, x) + f_1(a_1,x) + ... + f_N(a_N,x)$, $a_0, a_1, ..., a_N$

, , `linfit` . Mathcad : , . :

- `expfit(x, y, g)` — $y(x) = ae^{bx} + c$;
- `lgsfit(x, y, g)` — $y(x) = a/(1 + be^{-cx})$;
- `sinfit(x, y, g)` — $y(x) = asin(x + b) + c$;
- `pwrfit(x, y, g)` — $y(x) = ax^b + c$;
- `logfit(x, y, g)` — $y(x) = a\ln(x + b) + c$;

g — .

, - , Mathcad genfit(x, y, g, F). : x, y — ; g — ; F(x, A) — , .

x y . g (a, b, c). Mathcad , . , . g.

genfit . g . .

4: x y . . $y(x) = \exp(A + Bx + Cx^2)$ A, B, C — . .

Задение исходных данных:

x	y
0.3	9.4
0.4	10.2
1	5
1.4	3
2	2.1
4	0.9

Начальное приближение:

$$g := \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Аппроксимирующая функция:

$$F(x, A) := \exp\left(A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2\right)$$

Найденные параметры:

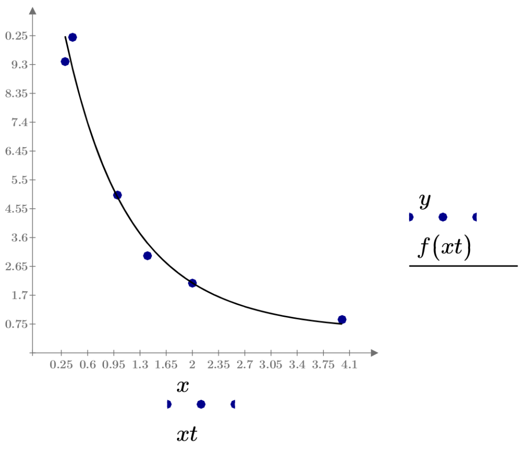
$$p := \mathrm{genfit}(x, y, g, F) = \begin{bmatrix} 2.672 \\ -1.188 \\ 0.112 \end{bmatrix}$$

Функция с найденными параметрами:

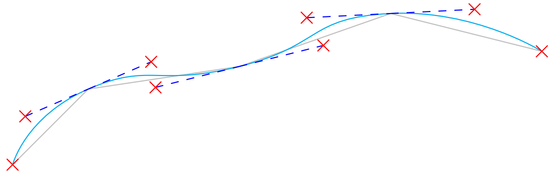
$$f(x) := F(x, p)$$

Диапазон данных:

$$xt := x_0, x_0 + 0.1 .. x_{\mathrm{rows}(x)-1}$$



, ( ) . , - (2.1). . , .
Mathcad `cspline(x,y)` `pspline(x,y)`. . `vs`,
`interp(vs,x,y,x)`



. 2.1:

5: `x` `y` . . .

x	y
0	1
1	2
2	3
3	3
4	4
5	4
6	5

Аппроксимация полиномом 3 степени:

$vs := \mathrm{regress}(x, y, 3)$

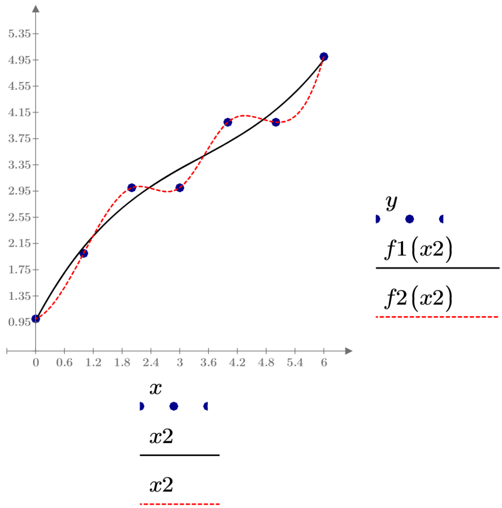
$f1(arg) := \mathrm{interp}(vs, x, y, arg)$

Аппроксимация кубическим сплайном:

$vs := \mathrm{cspline}(x, y)$

$f2(arg) := \mathrm{interp}(vs, x, y, arg)$

$x2 := 0, 0.1 .. 6$



:

1. ?

2. ?

3. , ?

4. MathCad?

3

: Mathcad (,).

, . r :

$$F(x,y(x),y'(x),y''(x),...,y^r(x)) = 0, \qquad (3.1)$$

x, . () 3.1 (), . 3.1.

r :

$$y = y(x,C_1,C_2,...,C_r), \qquad (3.2)$$

$_1$, $_2$, ... , $_r$ — ( ). . ( ) , r :

$$y(x_0) = y_0, y'(x_0) = y'_0, ..., y^r(x_0) = y^r_0, \qquad (3.3)$$

r $_1$, $_2$, ... , $_r$. $y(x)$ r $x = a$ $x = b$.

[2]. − , .

Mathcad , , . , , , , , :

- ;
- , ;
- , .

`rkfixed(0, t0, t1, , D)`. − 4- . `rkfixed` :

$$y'_i(x) = F(x,y_i(x)), \quad i = 1,...,N \qquad (3.4)$$

:

$$y(x) = D(y(x),x), \qquad (3.5)$$

$y(x)$ — ; $D(y(x),x)$ — − , 3.4.

`rkfixed` :

`y0` — . ( ). $y_0 = y(x_0)$;

`t0` `t1` , ;

— , , . `t1 - t0`, . `M` . , , , , . . , `+1`;

D(x,y) — -, 3.4. : ( ) ( ).

rkfixed , t (t0 t1), — , . , .

1: $\frac{dy}{dx} + 3y = 0$ (0) = 4. [0,4]. .

Задание начального приближения:

$y := 4$

Задание количества шагов разбиения:

$N := 100$

Формирование функции производных:

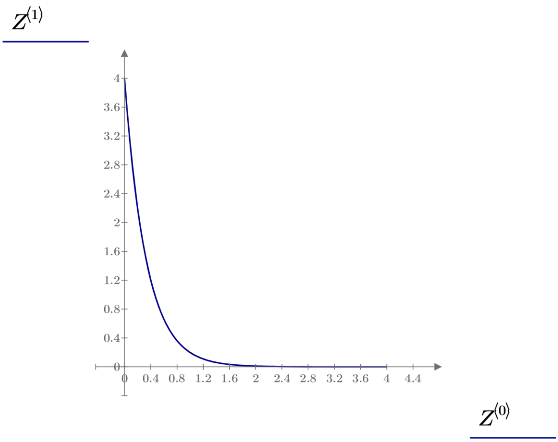
$D(x, y) := -3\ y$

Задание диапазона решения:

$x0 := 0 \qquad x1 := 4$

Решение дифференциалольного уравнения:

$Z := \mathrm{rkfixed}(y, x0, x1, N, D)$



2: [-2; 8] $y(-2) = 1$ $z(-2) = -10$

$$\begin{cases} \dfrac{dy(x)}{dx} - (y(x) - z(x)) \sin(x) = 0 \\ \dfrac{dz(x)}{dx} - \sqrt[3]{y(x)} + z(x) = 0 \end{cases}$$

.

Задание начального приближения:

$$y := \begin{bmatrix} 1 \\ -10 \end{bmatrix}$$

Задание количества шагов разбиения:

$N := 100$

Формирование вектор-функции производных:

$$D(x, y) := \begin{bmatrix} \left(y_0 - y_1\right) \cdot \sin(x) \\ \sqrt[3]{y_0} - y_1 \end{bmatrix}$$

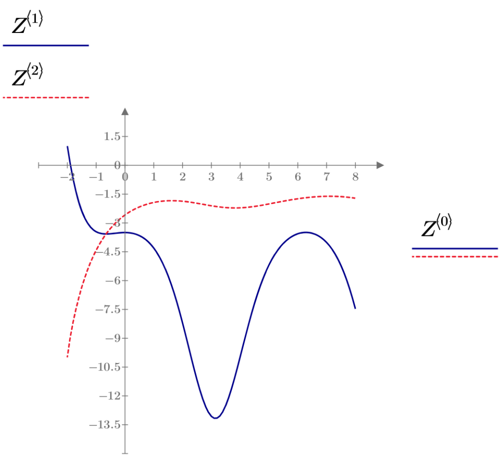
Задание диапазона решения:

$x0 := -2 \qquad x1 := 8$

Решение дифференциального уравнения:

$Z := \mathrm{rkfixed}(y, x0, x1, N, D)$

Построение функций:



, , , . 3.1, :

$$\begin{aligned} y_1(x) &= y(x), \\ y_2(x) &= y'(x), \\ &\dots \\ y_r(x) &= y^r(x) \end{aligned} \tag{3.6}$$

:

$$\begin{aligned} y_1'(x) &= y_2(x), \\ y_2'(x) &= y_3(x), \\ &\dots \\ y_r'(x) &= F(x, y_1(x), y_2(x, ..., y_r(x)). \end{aligned} \tag{3.7}$$

. , , , . , `rkfixed`, .

3: $y'' + y' - y - x = 0$ $x = 0$ $x = 3$ $y(0) = 1$, $y'(0) = 2$. y.

Вектор начальных условий:

$y := \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$

Количество шагов разбиения:

$N := 100$

Вектор-функция:

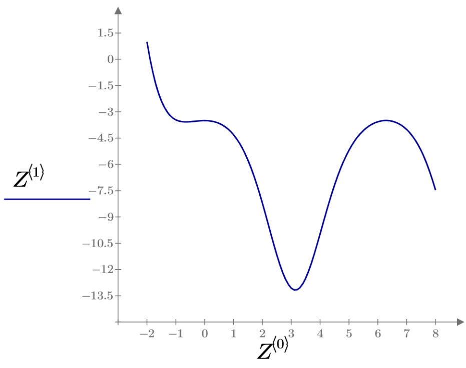
$D(x, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ y_0 - y_1 + x \end{bmatrix}$ Первая производная / Вторая производная

Граница интервала решения:

$x0 := 0$ $x1 := 3$

Численное решение:

$Z := \mathrm{rkfixed}(y, x0, x1, N, D)$



4: 100 / , 10 ^{2}, 1 . 10 .

x , y . : (y) ( ). g. : $F = C_f \frac{\rho v^2}{2} S$, C_f — , 0.49 , ρ — 1.2 $/^3$, S — .

:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = \upsilon_x \\ \dfrac{d\upsilon_x}{dt} = a_x = -\dfrac{F_x}{m} = -\dfrac{C_f}{m}\dfrac{\rho\upsilon_x^2}{2}S \\ \dfrac{dy}{dt} = \upsilon_y \\ \dfrac{d\upsilon_y}{dt} = a_y = -g + \dfrac{F_y}{m} = -\dfrac{C_f}{m}\dfrac{\rho\upsilon_y^2}{2}S \end{cases}$$

, a — . "", . : $x_0 = 0$, $\upsilon_{x0} = 100$ /, $y_0 = 0$, $\upsilon_{y0} = 0$ /.

Задание исходных данных

$g = 9.807\ \dfrac{m}{s^2}$ Встроенная переменная

$mass := 1\ kg$

$\rho := 1.2\ \dfrac{kg}{m^3}$

$Cf := 0.49$

$S := 10\ cm^2$

Начальные условия

$$init := \begin{bmatrix} 0\ m \\ 100\ \dfrac{m}{s} \\ 0\ m \\ 0\ \dfrac{m}{s} \end{bmatrix}$$

координата x
проекция скорости на ось x
координата y
проекция скорости на ось y

Диапазон времени:

$t0 := 0\ \boldsymbol{s} \qquad t1 := 10\ \boldsymbol{s}$

Вектор-функция при учете сил сопротивления:

$$D(x,y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ \dfrac{-Cf}{mass} \cdot \dfrac{\rho \cdot {y_1}^2}{2} \cdot S \\ y_3 \\ -\boldsymbol{g} + Cf \cdot \dfrac{\rho \cdot {y_3}^2}{2} \cdot S \end{bmatrix}$$

Вектор-функция без учета сил сопротивления:

$$D2(x,y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ 0 \\ y_3 \\ -\boldsymbol{g} \end{bmatrix}$$

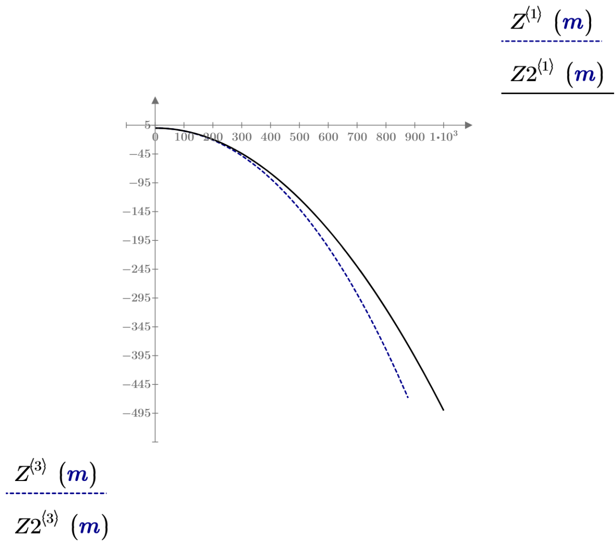
Количество шагов разбиения интервала:

$N := 100$

Решение уравнения:

$Z := \mathrm{rkfixed}(init, t0, t1, N, D)$

$Z2 := \mathrm{rkfixed}(init, t0, t1, N, D2)$



, . , .
, . (,) , , .
Mathcad sbval(z,t0,t1,D,load,score). :

z — , . ;

t0 t1 — , ;

D(x,y) — -, . rkfixed;

load(t0,z) — , . N (N), y t0. , load z;

score(t1,y) — , . score t1 y, sbval. , sbval, score .

sbval , . rkfixed. 0 load (z).

5: [0; 2] $y(0) = 3$ $z(2) = 1.6$:

$$\begin{cases} \dfrac{dy(x)}{dx} + 3xy(x) - z(x) = 0 \\ \sqrt[3]{z(x)} - y(x) - \dfrac{dz(x)}{dx} = 0 \end{cases}$$

.

Начальное приближение на левой стороне:

$y_0 := 3$

Количество шагов разбиения:

$N := 200$

Вектор-функция производных:

$$D(x, y) := \begin{bmatrix} -3 \cdot x \cdot y_0 + y_1 \\ \sqrt[3]{y_1} - y_0 \end{bmatrix}$$

Границы диапазона решения:

$x0 := 0 \qquad x1 := 2$

Начальные условия на левой границе:

$$load(x0, V) := \begin{bmatrix} 3 \\ V_0 \end{bmatrix}$$

Условия на правой границе:

$score(x1, W) := W_1 - 1.6$

Нахождение условий на правой границе:

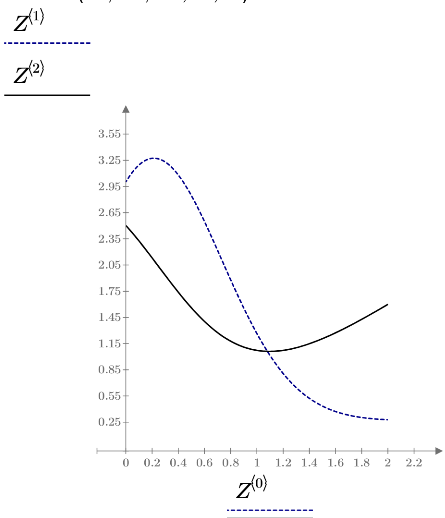
$$IC := \mathrm{sbval}(y, x0, x1, D, load, score) = \begin{bmatrix} 2.503 \\ 2.325 \end{bmatrix}$$

Формирование начальных условий:

$$ic := load(x0, IC) = \begin{bmatrix} 3 \\ 2.503 \end{bmatrix}$$

Решение задачи Коши для проверки:

$Z := \mathrm{rkfixed}(ic, x0, x1, N, D)$



Проверка значений на правой границе:

$Z_{N,2} = 1.6$

6: V ^{3}, , . j_1 j_2 $^{3}_{-}$, c_1 $c_{2\,\overline{3}}$. , ... , «+», — «−». , j_1c_1, — j_2c_2. , $c = \frac{m}{V}$.

:

$$\frac{dm}{d\tau} = j_1c_1 + j_2c_2 - (j_1 + j_2)\frac{m}{V} \qquad (3.8)$$

: , $m(0) = 0$.

7: (1 , 30) 0.5 . . , 15 ?

:

$$\bar{w} = \phi\sqrt{2gH} \tag{3.9}$$

ϕ — , 0.97, H — .

:

$$\frac{dV}{d\tau} = -S\varepsilon\bar{w} = -S\varepsilon\phi\sqrt{2gH} \tag{3.10}$$

ε — , 0.64. «—» , .

: , $V(0) = \frac{h\pi D^2}{4}$

8: 10 ^{3} 20 C° 100 C° 5 , 10 $_{\overline{\circ}}$. , , , 1 120 $_{\overline{2}}$.

:

$$q = KF\Delta T \tag{3.11}$$

q — , F — , ΔT — . , :

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{q}{cm} = \frac{KF\Delta T}{cm} \tag{3.12}$$

c — , m — . :

$$\begin{cases} \dfrac{dT_1}{d\tau} = \dfrac{-KF(T_1 - T_2)}{c_1 m_1} \\ \dfrac{dT_2}{d\tau} = \dfrac{KF(T_1 - T_2)}{c_2 m_2} \end{cases} \tag{3.13}$$

1 2 . «-» , , .

9: $l = 3$, $\lambda = 0.4\frac{}{\cdot}$. $T = 120$C°. , $50_{\overline{2}}$

.

:

$$q = -\lambda\frac{dT}{dx} \tag{3.14}$$

q λ :

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{q}{\lambda} \tag{3.15}$$

:

$$T = T - \frac{qx}{\lambda} \tag{3.16}$$

:

1. ?

2. ?

3. ?

4. ?

5. ?

6. ?

4 Mathcad

: Mathcad; Mathcad.

Mathcad , . , Mathcad, , .
Mathcad . , . , . , «» ( ]). :

, 5-6 . Enter.
. , :

for ∈

. , , , , . Mathcad : к←њ — к њ (књ) ⇧ + [. к:=њ .
. , . к←њ, , . - ( ).
к:=њ, , , . . - . - (,), .
књ . , ( ) , ( ).

1: , , . .

$$A := 2$$

$$\left\| \begin{array}{l} A \leftarrow 3 \\ A \end{array} \right| = 3$$

$$A = 2$$

2: , , , .

$$A := 2$$
$$B := \left\| \begin{array}{l} A \leftarrow 3 \\ A \end{array} \right.$$

$$A = 2 \qquad B = 3$$

, .

Mathcad . , ( ). . .

3: $f(x,y,z) = sin(x) + sin(y) + sin(z)$. .

$$\left\| \begin{array}{l} f(x,y,z) \leftarrow \sin(x) + \sin(y) + \sin(z) \\ B \leftarrow f(1,0,1) + f(1,1,0) + f(\pi,\pi,\pi) \\ B \end{array} \right. = 3.366$$

, `for` `if`. , . Mathcad .

, `if`, `for`, `while`, , , , . «=», «>», «<» .. , «∧» «∨» .

(`for`, `while`)

`for` . for кнь Ctrl + ⇧ + '. `for` :

$$\left\| \begin{array}{l} \text{for } \blacksquare \in \blacksquare \\ \quad \| \end{array} \right.$$

, , , , . , . , . , 1. , , ( ).

$$\begin{array}{l} \text{for } i \in 1..10 \\ \quad \| \end{array} \qquad \begin{array}{l} \text{for } i \in 1, 1.1..10 \\ \quad \| \end{array}$$

, , `for` :

$$\begin{array}{l} \text{for } i \in [1\ \ 3\ \ 4\ \ 7\ \ 11] \\ \quad \| \end{array}$$

`while` () (Ctrl +]) , , . `while` , , :

$$\text{while} \;\blacksquare$$

`while` . , .

$$\left|\begin{array}{l} dH \leftarrow -10 \\ \text{while } dH < 1 \\ \quad dH \leftarrow dH + 1 \end{array}\right| = 1$$

, `break` (). , , `break` `if`.

4: , A 33 . .

$$A := \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$$

$$B := \left|\begin{array}{l} \text{for } i \in 0..2 \\ \quad \text{for } j \in 0..2 \\ \quad\quad A_{i,j} \leftarrow \left(A_{i,j}\right)^2 \\ A \end{array}\right.$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 9 \\ 16 & 25 & 36 \\ 49 & 64 & 81 \end{bmatrix}$$

(if, else)

`if` () :

$$\text{if} \;\blacksquare$$

, — , , (, ,). , .

`else` () , , `if` .

5: , B, N. N>0, =10; =20; N<0, =5, =15. .

$$C(N) := \left\| \begin{array}{l} \text{if } N > 0 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} A \leftarrow 10 \\ B \leftarrow 20 \end{array} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} A \leftarrow 5 \\ B \leftarrow 20 \end{array} \right. \\ \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

$$C(1) = \begin{bmatrix} 10 \\ 20 \end{bmatrix} \qquad C(-3) = \begin{bmatrix} 5 \\ 20 \end{bmatrix}$$

:

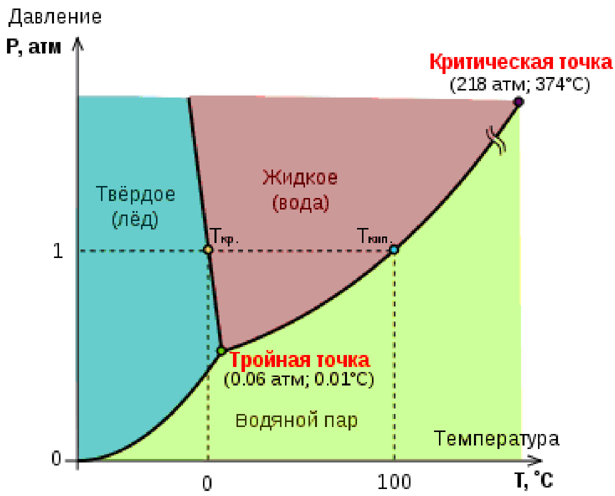
1. Mathcad?

2. ?

3. ?

4. Mathcad? ?

5. Mathcad?



. 5.1:

5 –

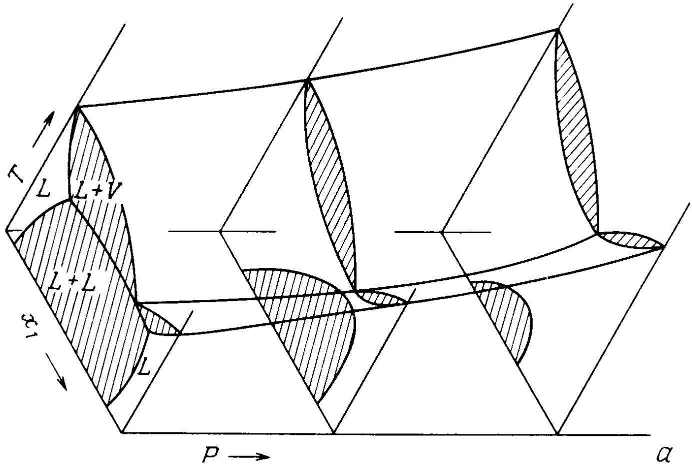
: – ; (– ; – ,; – ,).

, , . . , , , . . , , .
, , .
( ), , ,

$$= - + N, \tag{5.1}$$

, N , (p, $N = 2$). , .
, (ґ=ґ1) (ґ=ґ1) (ґ=ґ2) p (,). (ґ=ґ2) (ґ=ґ1) (p (, p ,)). (ґ=ґ3) (ґ=ґ0), (, p.). , ґ=ґ0. , .
, , (рисунок 5.1). . . , . .
, . , . рисунок 5.2, 1, 2, 3 ..
:

- ($p = const$), (рисунок 5.3);



. 5.2:

- ($= const$), p ;
- ( ), p .

, – , – , – . p, . – . , (5.3) , , – .

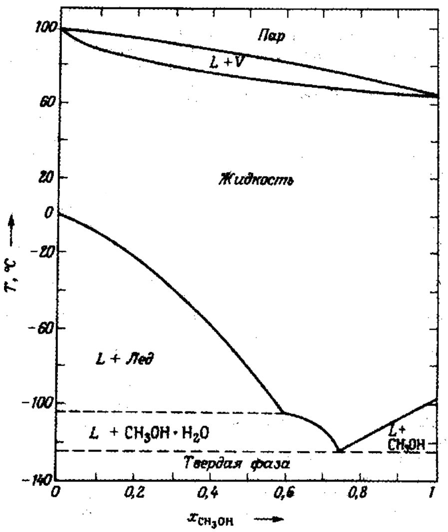
5.4 – . , , . . , $p-$ $T = const$. $T - x$, — , . , . , .

$n-$ T :

$$\begin{cases} T^I = T^{II}, \\ p^I(T, x_1, x_2, \ldots, x_{n-1}) = p^{II}(T, y_1, y_2, \ldots, y_n - 1), \\ \mu_i^I(T, x_1, x_2, \ldots, x_{n-1}) = \mu_i^{II}(T, y_1, y_2, \ldots, y_n - 1), \end{cases} \tag{5.2}$$

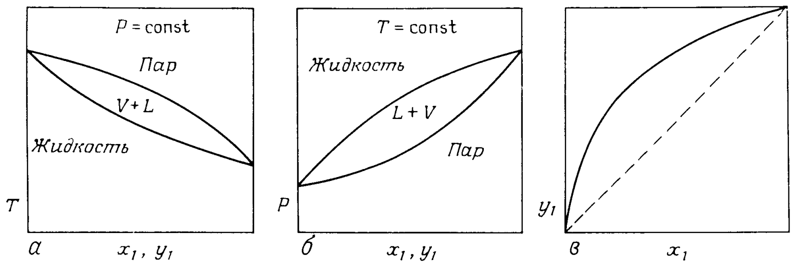
μ — (,). , (5.2). , . :

$$\int\limits_{\mu^0}^{\mu} d\mu = \frac{1}{N} \int\limits_{p^0}^{p} V dp. \tag{5.3}$$



Пар
L + V
Жидкость
L + Лед
L + CH₃OH · H₂O
L + CH₃OH
Твердая фаза
T, °C
100
60
20
0
-20
-60
-100
-140
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
x_CH₃OH

. 5.3: ( ) + $p = 0.1$



P = const
Пар
V + L
Жидкость
T
a
x₁, y₁
T = const
Жидкость
L + V
Пар
P
б
x₁, y₁
y₁
в
x₁

. 5.4: , (); p, (); y (),

, . $pV = NRT$:

$$\mu(T,p) = \mu^0(T) + RT\ln(p), \tag{5.4}$$

$\mu^0(T)$ — . (5.4) :

$$\mu_i(T,p,x) = \mu_i^0(T) + RT\ln(p_i), \tag{5.5}$$

$p_i = px_i$ — i .
, (): $f = p\gamma_f$ $(f_i = p_i\gamma_{f_i})$, γ_f — (), T, p . :

$$\mu_i(T,p,x) = \mu_i^0(T) + RT\ln(f_i). \tag{5.6}$$

$\gamma_f = 1$. формулы (5.4)–(5.6) , $\mu^0(T)$, . , () , .
p T, . :

$$\mu_i(T,p,x) = \mu_i^0(T,p) + RT\ln(a_i), \tag{5.7}$$

$_i$ — , , :

$$a_i = \gamma_i x_i, \tag{5.8}$$

γ_i — i, $\gamma_i = 1$.
, ( ) (. формулы (5.4)–(5.6)), .
– (5.2) :

$$\mu_i^0(T) + RT\ln(f_i) = \mu_i^0(T,p) + RT\ln(a_i), \tag{5.9}$$

, :

$$y_i = \frac{f_i^0 \gamma_i x_i}{\gamma_{f_i} p}, \tag{5.10}$$

f_i^0 — () i p. n :

$$= - + 2 = n - 2 + 2 = n.$$

n , , $n-1$ p .
, p , n (5.10), , :

$$\sum_{i=1}^{n} y_i = 1. \tag{5.11}$$

, , :

- , .. γ_{f_i};
- $f_i^0 \approx p_i^0(T)$.

:

$$y_i = \frac{p_i^0 \gamma_i x_i}{p} \tag{5.12}$$

(5.12) γ_i T, p , .
($\gamma_i = 1$), , (5.12) :

$$p_i = p_i^0(T) x_i. \tag{5.13}$$

:

$$p = \sum_{i=1}^{n} p_i = \sum_{i=1}^{n} p_i^0(T) x_i. \tag{5.14}$$

[3, 4]:

- $\ln(p_i^0(T)) = A - \frac{B}{T}$;
- $\ln(p_i^0(T)) = A - \frac{B}{T+C}$;
- $\ln(p_i^0(T)) = A - \frac{B}{T} + C\ln(T) + DT^2$;
- $\ln(p_i^0(T)) = A - \frac{B}{T} + CT + DT^3$;
- $\ln(p_i^0(T)) = A - \frac{B}{T} + T^2$;
- $\ln(p_i^0(T)) = A + \frac{B}{T} + T + BT^2$;
- $\ln(p_i^0(T)) = \frac{AT}{T+B}$.

A,B,C,D — .
(5.12) , – , . – :

- $T = const$: , , (5.14) p , (5.12) — ;
- $p = const$: (5.14) . (5.12) .

. , :

$$p_i = \gamma_i p_i^0 x_i \tag{5.15}$$

γ_i i. :

$$p = \sum_{i=1}^{n} p_i = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i p_i^0 x_i \tag{5.16}$$

, (T), , . $(p,\, T,\, ,)$ [5, 6] . , , , . . , , --, [4]. . , [4, 3]. , . (, , , NRTL, UNIQUAC). - , . , . .

-

:

$$\frac{G^{ex}}{RT} = x_1 x_2 (A_{21} x_1 + A_{12} x_2) \tag{5.17}$$

A_{12} A_{21} — .

:

$$\ln(\gamma_1) = (A_{12} + 2(A_{21} - A_{12})x_1)x_2^2 \tag{5.18}$$

$$\ln(\gamma_2) = (A_{21} + 2(A_{12} - A_{21})x_2)x_1^2 \tag{5.19}$$

-

:

$$\frac{G^{ex}}{RT} = \frac{1}{\dfrac{1}{A_{12}x_1} + \dfrac{1}{A_{21}x_2}} \tag{5.20}$$

A_{12} A_{21} — .

$$\ln(\gamma_1) = A_{12} \left(\frac{A_{21}x_2}{A_{12}x_1 + A_{21}x_2} \right)^2 \tag{5.21}$$

$$\ln(\gamma_2) = A_{21} \left(\frac{A_{12}x_1}{A_{12}x_1 + A_{21}x_2} \right)^2 \tag{5.22}$$

•

:

$$\frac{G^{ex}}{RT} = -x_1 \ln(x_1 + \Lambda_{12}x_2) - x_2 \ln(\Lambda_{21}x_1 + x_2) \tag{5.23}$$

$\Lambda_{12} = \frac{V_2^L}{V_1^L} \exp\left(-\frac{\lambda_{12}-\lambda_{11}}{RT}\right)$ $\Lambda_{21} = \frac{V_1^L}{V_2^L} \exp\left(-\frac{\lambda_{21}-\lambda_{22}}{RT}\right)$, V_i^L — i, λ_{ij} — , i j, $\lambda_{ij} = \lambda_{ji}$. Λ_{12} Λ_{21}, .

$$\ln(\gamma_1) = -\ln(x_1 + \Lambda_{12}x_2) + x_2 \left(\frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12}x_2} - \frac{\Lambda_{21}}{\Lambda_{21}x_1 + x_2}\right) \tag{5.24}$$

$$\ln(\gamma_2) = -\ln(x_2 + \Lambda_{21}x_1) + x_1 \left(\frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12}x_2} - \frac{\Lambda_{21}}{\Lambda_{21}x_1 + x_2}\right) \tag{5.25}$$

• NRTL (Non-Random Two-Liquid)

:

$$\frac{G^{ex}}{RT} = x_1x_2 \left(\frac{\tau_{21}G_{21}}{x_1 + G_{21}x_2} + \frac{\tau_{12}G_{12}}{G_{12}x_1 + x_2}\right) \tag{5.26}$$

$G_{12} = \exp(-\alpha_{12}\tau_{12})$, $G_{21} = \exp(-\alpha_{21}\tau_{21})$, $\tau_{12} = \dfrac{g_{12} - g_{22}}{RT}$, $\tau_{21} = \dfrac{g_{21} - g_{11}}{RT}$, g — i j ($g_{ij} = g_{ji}$), α_{ij} — ($\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$) τ_{12},τ_{21}), α_{12}, .

$$\ln(\gamma_1) = x_2^2 \left(\tau_{21} \left(\frac{G_{21}}{x_1 + x_2G_{21}}\right)^2 + \frac{\tau_{12}G_{12}}{(x_2 + x_1G_{12})^2}\right) \tag{5.27}$$

$$\ln(\gamma_2) = x_1^2 \left(\tau_{12} \left(\frac{G_{12}}{x_2 + x_1G_{12}}\right)^2 + \frac{\tau_{21}G_{21}}{(x_1 + x_2G_{21})^2}\right) \tag{5.28}$$

. (, , ,). :

1. $p_i^0(T)$, -, , .

2. :

$$\gamma_1 = \frac{y_1 p}{x_1 p_1^0(T)} \tag{5.29}$$

$$\gamma_2 = \frac{y_2 p}{x_2 p_2^0(T)} \tag{5.30}$$

3. G^E:

$$G^E = RT(x_1 \ln(\gamma_1) + x_2 \ln(\gamma_2)) \tag{5.31}$$

4. ((5.17) (5.20) (5.23) (5.26)) , (5.31).

: yx px, . :

1. (5.18) (5.19), .
2. p y, (5.16) (5.12).
3. .

:

1. ?
2. . .
3. .
4. .
5. , ?
6. ?
7. ($p - x$,y, $T - x$,y)
8. ?
9. ?
10. ?

6

: ; ; .

, . . , 19 , :

$$pV = NRT, \tag{6.1}$$

p — ; T — ; V — , ; R — ; N — . .
, , CO_2, N_2, O_2, p, V, T . , (6.1) . , .
(18371923 .) , : . , , , . p_{real} — ,
p_{id} — , .. , $p_{id} = p_{real} + \delta p$, δp — , $(\delta p = a\left(\frac{N}{V}\right)^2)$. , , , ,
. - , .. к њ, , .. $V_{id} = V - bN$, b — 1 . (6.1), 1873 :

$$\left(p + \frac{aN^2}{V^2}\right)(V - Nb) = NRT. \tag{6.2}$$

a , b, , , .. a b .
$p - V$, $p - V$ – , 6.1
$_c$: $< {}_c$, . – . $_c$, , $= {}_c$, , . $> {}_c$
$p - V$. , . , , p_c V_c. p_c, V_c $_c$. b.

$$T_c = \frac{8a}{27Rb}, \tag{6.3}$$

$$p_c = \frac{a}{27b^2}, \tag{6.4}$$

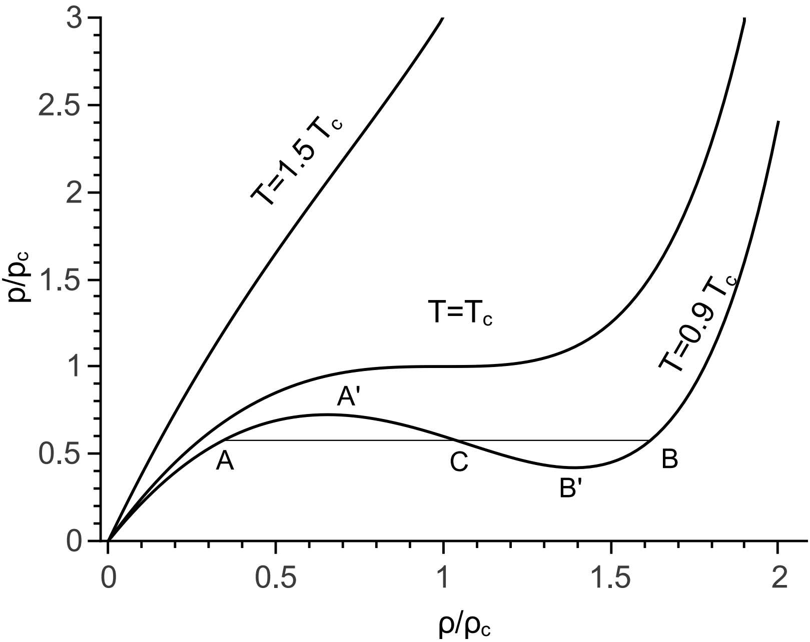
$$V_{mc} = 3b, \tag{6.5}$$

V_{mc} — . a b [4].
p_c, V_c T_c, :

$$T_r = \frac{T}{T_c}, \tag{6.6}$$

$$p_r = \frac{p}{p_c}, \tag{6.7}$$

$$V_{mr} = \frac{V_m}{V_{mc}}. \tag{6.8}$$



. 6.1: . $<_c$ ', p ρ .

, , :

$$p_r = \frac{8T_r}{2V_{mr} - 1} - \frac{3}{{V_{mr}}^2}. \tag{6.9}$$

(6.9) . , . . , , (г/г) . (– , – – .) [4, 3], , , . , . , . , , ,

$$\begin{cases} T^I = T^{II}, \\ p^I(T,\rho) = p^{II}(T,\rho), \\ \mu_i^I(T,\rho) = \mu_i^{II}(T,\rho), \end{cases} \tag{6.10}$$

μ — , ρ — ; . , . .

(, (6.2)). , , , :

$$\int\limits_{mu^0}^{\mu} d\mu = \frac{1}{N}\int\limits_{p^0}^{p} V\,dp, \tag{6.11}$$

, , , :

$$\mu(T,p) = \mu^0(T) + RT\ln(f) = \mu^0(T) + RT\ln(p\gamma_f), \tag{6.12}$$

$f = p\gamma_f$ — () (γ_f —).
γ_f ( ) .

$$\ln(\gamma_f) = (Z_V - 1) - \int\limits_{\infty}^{V} \frac{A_V - 1}{V}dV - \ln(Z_V), \tag{6.13}$$

Z_V — , :

$$Z_V = \frac{pV}{NRT}. \tag{6.14}$$

$Z_V = 1$. Z_V , . .
(, (6.2)) (6.13) (6.14). (6.13) .

:

(1). .
:

$$p(\rho,T) = \frac{\rho RT}{1-\rho b} - a\rho^2,$$

a b — , :

$$a = \frac{9RT_{crit}}{8\rho_{crit}},$$

$$b = \frac{1}{3\rho_{crit}}.$$

:

$$\ln(\gamma_f) = Z_V(\rho,T) - 1 + \int_0^{\rho}\frac{Z_V(\rho,T)}{\rho}d\rho - \ln(Z_V(\rho,T)$$

$Z_V(\rho,T) = p/\rho RT$ — .
:

1:

		M,	T_c,	p_c,	V_c, $\frac{2}{}$	T,
1	(Ar)	39.948	150.8	48.1	74.9	83.81
2	(Ne)	20.183	44.4	27.2	41.7	24.66
3	(Kr)	83.8	209.4	54.3	91.2	115.78
4	(O_2)	31.999	154.6	49.8	73.4	54.36
5	(N_2)	28.013	126.2	33.5	89.5	63.15
6	(Xe)	131.3	289.7	57.6	118	161.36
7	(CH_4)	16.043	190.6	45.4	99	90.7
8	(Cl_2)	70.906	417	76	124	172.17
9	(CO)	28.011	132.9	34.5	93.1	68
10	(CO_2)	44.01	304.2	72.8	94	216.55

1. ?
2. – ?
3. ?
4. ?

7

: ; , ; ( ).

. .

(, ,). , . . — .

. , . . , , , .

: — , ; ( ) – , ; — .

. . :

- ;
- .

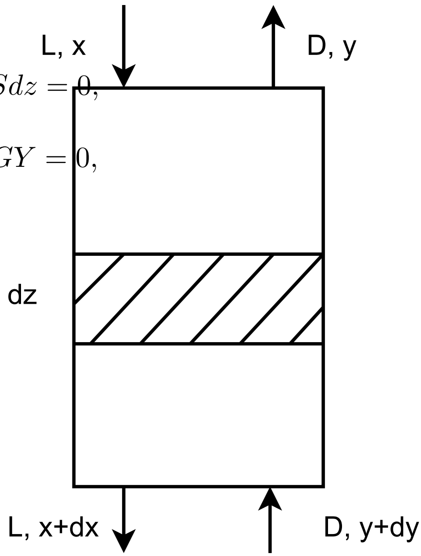
, . (, ..). .

. , . .

, , , .

(7.1), : ( ); (

). :



. 7.1: ()

$$LX - L(X + dX) + K_Y a(Y - Y^*(X))Sdz = 0, \quad (7.1)$$

$$G(Y - dY) - K_Y a(Y - Y^*(X))Sdz - GY = 0, \quad (7.2)$$

G, L — ; Y, X — [г/г] [г/гС] (— ; — ; —); Y^* — [/]; S — ; — ; K_Y — . ,

:

$$\begin{cases} \dfrac{dX}{dz} = \dfrac{S}{L} K_Y a(Y - Y^*(X)), \\ \dfrac{dY}{dz} = \dfrac{S}{G} K_Y a(Y - Y^*(X)). \end{cases} \quad (7.3)$$

, , . , .

, . (..) , .

, . , , :

- , ;

- , ;
- (-) .

, . , . , , :

$$n_A A + n_B B \to n_c C, \tag{7.4}$$

nґ—ґ , :

$$r = k X_A^{n_A} X_B^{n_B}, \tag{7.5}$$

— . , $(n_A = n_B = 1)$,

$$r = k X_A X_B. \tag{7.6}$$

, . , () , . , , , , (.. $X_B = const$) .

$$r = k' X_A, \quad k' = k X_B. \tag{7.7}$$

.

$$LX - L(X + dX) + K_Y a(Y - Y^*(X))Sdz - k'X = 0, \tag{7.8}$$

$$G(Y - dY) - K_Y a(Y - Y^*(X))Sdz - GY = 0, \tag{7.9}$$

:

$$\begin{cases} \dfrac{dX}{dz} = \dfrac{S}{L} K_Y a(Y - Y^*(X)) - k'X, \\ \dfrac{dY}{dz} = \dfrac{S}{G} K_Y a(Y - Y^*(X)). \end{cases} \tag{7.10}$$

, , , :

$$k = k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}}, \tag{7.11}$$

k_0 — , E_a — , R — , — .

. . , . :

$$\phi = \frac{Y - Y}{Y - Y^*(X)}, \tag{7.12}$$

, . , , . $Y = 0$, $\phi = 1$ ($= 0$), $\phi < 1$.

, , -.

(, — ..) . , .

, (, .) . , . — .

- .

.

- :

$$y = (1 - \phi)y \tag{7.13}$$

- :
- :

$$y^*(x) = \frac{Ex}{p} \tag{7.14}$$

E — , p — .

- :
- :
-
-
-

: 1. CO_2 , [4, . 283]. 2. m (y*=Ex/P) [4, . 282]. 3. [4, .13] [4, .290]. 4. O2 . 5. ( ) [4, .292]. 6. [4, .293].

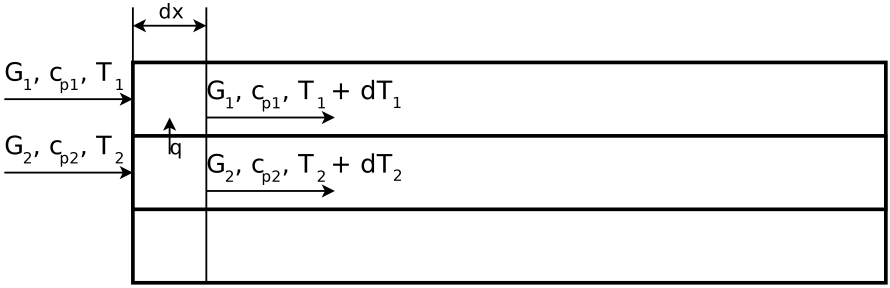
1. . ?
2. ?
3. ?
4. , .
5. .
6. ?

8

: .

. ( ), .

. , , : , « », . 8.1 .



. 8.1: « »

:

$$G_1 T_1 c_{p1} - G_1 c_{p1}(T_1 + dT_1) + qdF = 0, \tag{8.1}$$

G — , c_p — , q — , F — .

, :

$$G_2 T_2 c_{p2} - G_2 c_{p2}(T_2 + dT_2) - qdF = 0. \tag{8.2}$$

:

$$q = K(T_2 - T_1), \tag{8.3}$$

K — . P dx $dF = dxP$, (8.3), (8.1) (8.2) :

$$\begin{cases} \dfrac{dT_1}{dx} = \dfrac{K(T_2 - T_1)P}{G_1 c_{p1}} \\ \dfrac{dT_2}{dx} = -\dfrac{K(T_2 - T_1)P}{G_2 c_{p2}} \end{cases} \tag{8.4}$$

. . , , .

. , , :

$$\begin{cases} \dfrac{dT_1}{dx} = \dfrac{K(T_2 - T_1)P}{G_1 c_{p1}} \\ \dfrac{dT_2}{dx} = \dfrac{K(T_2 - T_1)P}{G_2 c_{p2}} \end{cases} \tag{8.5}$$

.

:

$$K = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1} + \sum \dfrac{\delta}{\lambda} + \dfrac{1}{\alpha_2}}, \tag{8.6}$$

α — , δ — , , λ — , $\frac{\delta}{\lambda}$.

: , , - .. : $Re = \dfrac{\bar{w} l \rho}{\mu}$, $Pr = \dfrac{\mu c_p}{\lambda}$, $Gr = g l^3 \beta_p \rho^2 \dfrac{\Delta T}{\mu^2}$, $\bar{w}$ — , l — , ρ — , μ — , c_p — , λ — , $g = 9.8/^2$, β_p — , ΔT — . $D = \dfrac{4S}{P}$, S — , P — .

: $Nu = \dfrac{\alpha l}{\lambda}$. : $Nu = f(Re, Pr, Gr, ...)$

[7]:

- $(Re > 10000)$:

$$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43} \left(\frac{Pr}{Pr}\right)^{0.25}. \tag{8.7}$$

- $(2300 < Re < 10000)$:

$$Nu = 0.008 Re^{0.9} Pr^{0.43}. \tag{8.8}$$

- :

$$Nu = 0.17 Re^{0.33} Pr^{0.43} Gr^{0.1} \left(\frac{Pr}{Pr}\right). \tag{8.9}$$

- :

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{D}{d}\right)^{0.45}, \tag{8.10}$$

D, d — , d

- :

$$Nu = CRe^m Pr^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu}\right)^{0.14}, \frac{\lambda}{D} \quad (8.11)$$

$Re = \frac{\rho n d_m^2}{\mu}$, D — , n — , μ — , μ — , $(t_. + t)/2$.
: $C = 0.36$, $m = 0.67$

:

$$G_1 T_1 c_{p1} - G_1 c_{p1} T_1 + qF = 0, \quad (8.12)$$

T_1 — . (8.1). (8.3) :

$$T_1 - T_1 = \frac{K(T_1 - T_2)F}{G_1 c_{p1}} \quad (8.13)$$

, , : $\overline{(T_1 - T_2)} = \frac{\int_S T_1 - T_2}{S}$
:

1. « » .

2. ?

3. ?

9

: ; ; ( ).

. ( ) — , . , m_A^R , , m_A^0:

$$\alpha_A = \frac{m_A^R}{m_A^0} \tag{9.1}$$

, , .

— , m_A, , m_A^R:

$$S_B = \frac{m_A}{m_A^R} \tag{9.2}$$

— m_B , m_B^{Max}:

$$\beta_B = \frac{m_B}{m_B^{Max}} \tag{9.3}$$

: , .

, :

- 50 – 60 %.
- , , , , , . 100 % , ;
- , – , – ... , , , .

, . . , , , . . ,
. .

, :

- ;
- ;
- ;
- .

, , . , , ( ) , , .

. , , ( ) , , . , :

$$A + B \underset{k_2}{\overset{k_1}{\longleftrightarrow}} C + \mathit{\Delta} H_1$$
$$C \xrightarrow{k_3} D + \mathit{\Delta} H_2$$

k — . , . . [1]. .
($\mathit{\Delta} H_1 \approx 0$, $\mathit{\Delta} H_2 \approx 0$) / . :

$$\nu \frac{dC_A}{dx} = i \tag{9.4}$$

ν — , C_A — A, x — , i — . , . 1 2 ( ). , 1 «−». , «+». $i = -r_1 + r_2$.
, , :

$$r_1 = k_1 C_A C_B. \tag{9.5}$$

$\nu = \frac{dx}{d\tau}$ (9.5) (9.4) τ:

$$\frac{dC_A}{d\tau} = -k_1 C_A C_B + k_2 C_C \tag{9.6}$$

, :

$$\begin{cases} \dfrac{dC_A}{d\tau} = -k_1 C_A C_B + k_2 C_C \\ \dfrac{dC_B}{d\tau} = -k_1 C_A C_B + k_2 C_C \\ \dfrac{dC_C}{d\tau} = k_1 C_A C_B - k_2 C_C - k_3 C_C \\ \dfrac{dC_D}{d\tau} = k_3 C_C \end{cases} \tag{9.7}$$

(9.7) . .
(9.1), (9.2) (9.3), .

. . :

$$\nu \rho c_p \frac{dT}{dx} = \sum q_i \tag{9.8}$$

q_i — . : (, ..) .
. :

$$q_{r_q} = r_1 \mathit{\Delta} H_1 = k_1 C_A C_B \mathit{\Delta} H_1 \tag{9.9}$$

2 () $-\mathit{\Delta} H_1$. $\nu = \frac{dx}{d\tau}$ **??** :

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{k_1(T) C_A C_B \mathit{\Delta} H_1 - k_2(T) C_C \mathit{\Delta} H_1 + k_3(T) C_C \mathit{\Delta} H_2}{\rho c_p} \tag{9.10}$$

9.7. , :

$$k_i = k_{0i} \exp\left(\frac{-E_i}{RT}\right) \tag{9.11}$$

k_0 — , E — .
(9.8) , $q = K(T - T_T)P$, — , P — , T_T — . :

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{k_1(T) C_A C_B \mathit{\Delta} H_1 - k_2(T) C_C \mathit{\Delta} H_1 + k_3(T) C_C \mathit{\Delta} H_2}{\rho c_p} + \\ + \frac{K(T_T - T)P}{\rho c_p} \tag{9.12}$$

, , , . , , . , :

$$\frac{dT_T}{d\tau} = -\frac{K(T_T - T)P}{\rho_T c_{p_T}} \tag{9.13}$$

T — .

. ((9.7)) . C_{0_i} :

$$\begin{cases} \dfrac{C_A - C_{A0}}{\tau} = -k_1 C_A C_B + k_2 C_C \\ \dfrac{C_B - C_{B0}}{\tau} = -k_1 C_A C_B + k_2 C_C \\ \dfrac{C_C - C_{C0}}{\tau} = k_1 C_A C_B - k_2 C_C - k_3 C_C \\ \dfrac{C_D - C_{D0}}{\tau} = k_3 C_C \end{cases} \tag{9.14}$$

1. ?

2. ?

3. ?

4. ?

5. ?

6. ?

10

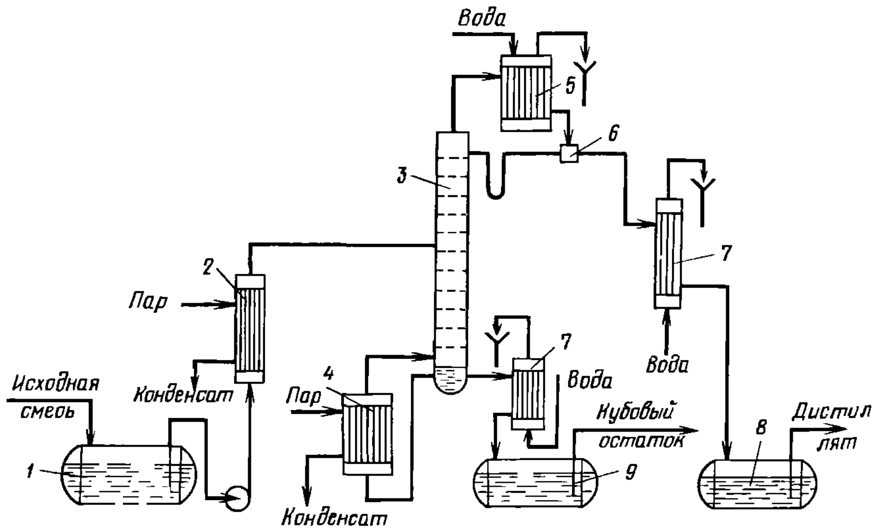
: ; , Mathcad, .

. , . , – .

, . , , . . , , .

. , , . . , .

(,). 10.1.



. 10.1: :1 — ; 2 — ; 3 — ; 4 — ; 5 — ; 6 — ; 7 — ; 8 — ; 9 —

3, , . . , 2, , . . , , 4, , , , 5. R (. . $R = /$).

(. 10.1) 3, 4 5. [1]. ( ) , . : , , , . :

$$Q = Sw_0 \tag{10.1}$$

Q — , ; w_0 — ; S — . , ( ) .

, . , .

. , . , .

, . :

- ;
- ;
- .

, . - , , . :

- , , (, ..). ;
- . .

, . , , .
к нь. , (10.2). , : — ; — $N + 1$. (
) .

. , .., .

, .

n –г , , :

$$\begin{cases} p(T, x_1, x_2, \ldots, x_n - 1) = \\ \quad = p(T, y_1, y_2, \ldots, y_n - 1) \\ \mu_k(T, x_1, x_2, \ldots, x_n - 1) = \\ \quad = \mu_k(T, y_1, y_2, \ldots, y_n - 1) \end{cases} \tag{10.2}$$

μ — , — , . :

$$\mu_i(T,x) = \mu_i^0(T) + RT\ln(\gamma_i x_i) \tag{10.3}$$

$$p = \sum_{i=1}^{n} p_i = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i p_i^0 x_i \tag{10.4}$$

$p_i^0(T)$ $\mu_i^0(T)$, γ_i , .
( ) . , , . , .
, , , . :

$$G^E = RT(x_1\ln(\gamma_1) + x_2\ln(\gamma_2)) \tag{10.5}$$

G^E (NRTL .)
[4, 3]. , . — G^E
.
, – $p^0(T)$. , ,
. $10°C$ $1.5 - 2$, ,
.., , . , , – G^E.
, .
N– (10.2)

$$\begin{cases} E = \dfrac{y_{N+1} - y_N}{y_{N+1} - y^*} \\ L(y_{N-1} - x_N) = G(y_N - y_{N+1}) \end{cases} \tag{10.6}$$

— ( ) ; L, G — , ; y^* .
, :

$$y_i^* = \frac{p_i^0 \gamma_i x_i}{p} \tag{10.7}$$

$p^0()$.

MathCad , F / ,
% . (100 -) % . . . .
. :

1. — ;

2. — .

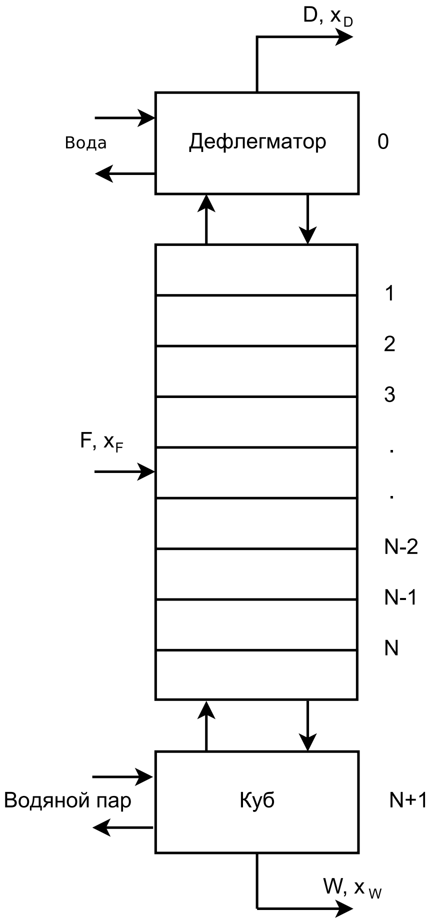
: 5. :

$$\ln(p_i^0) = A + \frac{B}{T} + C\ln(T) + DT^E \tag{10.8}$$

, , , D,

1. , ?

2. ?



. 10.2:

3. ?

4. ?

5. ?

[1] .. .. - : / . - . . . -. , 2009.

[2] . . / . " ". 7 . , 2005. . 479.

[3] . : 2- . . , 1989.

[4] . . . : . , 1982.

[5] .. .. .. : . 1. књ , 1966. . 648.

[6] .. .. .. : . 2. књ , 1966. . 795.

[7] .. .. : , 2005. . 568.