

Брюсселятор

Исследование на устойчивость

$$\begin{cases} \dot{u} = A + u^2v - (B + 1)u + D_u\Delta u, \\ \dot{v} = -u^2v + Bu + D_v\Delta v. \end{cases} \quad (1)$$

Линеаризуем эту систему:

$$\begin{cases} A + u^2v - (B + 1)u = 0, \\ u(B - uv) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Предположим, что коэффициенты A и B больше нуля, тогда решение этой системы:

$$\begin{cases} \bar{u} = A, \\ \bar{v} = \frac{B}{A}. \end{cases} \quad (3)$$

Линеаризуем систему вблизи этой особой точки:

$$\xi = u - \bar{u}, \quad \eta = v - \bar{v}. \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi} = (B - 1)\xi + A^2\eta, \\ \dot{\eta} = -B\xi - A^2\eta. \end{cases} \quad (5)$$

Найдем собственные значения матрицы коэффициентов:

$$\begin{vmatrix} B - 1 - \lambda & A^2 \\ -B & -A^2 - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

$$\lambda^2 + (A^2 + 1 - B)\lambda + A^2 = 0. \quad (7)$$

Решения этого уравнения:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2}(A^2 + 1 - B) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(A^2 + 1 - B)^2 - 4A^2}. \quad (8)$$

Введем обозначения: $\delta = (A^2 + 1 - B)$ и $\sigma = A^2$, тогда уравнение перепишется

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2}\delta \pm \frac{1}{2}\sqrt{\delta^2 - 4\sigma}. \quad (9)$$

Проанализируем возможные случаи:

- $\delta = 0$, тогда $\lambda_{1,2}$ чисто мнимые и решение является центром
- $\delta^2 < 4\sigma$, тогда корни мнимые и устойчивость зависит от знака δ : при $\delta > 0$ устойчивый фокус, при $\delta < 0$ неустойчивый фокус
- $\delta^2 > 4\sigma$, значит, корни действительные и простой анализ показывает, что знак $\lambda_{1,2}$ также зависит от знака δ : при $\delta > 0$ устойчивый узел, при $\delta < 0$ неустойчивый узел

$\delta = 0$ точка, в которой происходит смена характера поведения решения с устойчивости на неустойчивость, происходит бифуркация. Если $Re(\lambda_{1,2}) = 0$, а $Im(\lambda_{1,2}) \neq 0$, то происходит бифуркация Андронова-Хопфа или бифуркация рождения (исчезновения) предельного цикла. Из устойчивого фокуса при изменении параметров A, B может родиться предельный цикл.

Предварительный анализ нераспределенного случая в Wolfram Mathematica

Прежде чем программировать задачу на C или Python, проанализируем ее, используя Wolfram Mathematica.

```

Export[FileNameJoin@{NotebookDirectory[], "animation a=1 b=1.gif"}, 
Animate[
A = 1; B = 1;
sol = NDSolve[{x'[t] == A + x[t]^2 y[t] - (B + 1) x[t], 
y'[t] == x[t]^2 y[t] + B x[t], x[0] == 1, y[0] == 2}, {x[t], 
y[t]}, {t, 0, T}];
ParametricPlot[{x[t], y[t]} /. sol, {t, 0, T}], {T, 1, 100}
], "GIF"]

```

В коде можно менять параметры А и В, а также смотреть на картинку с течением времени. Прикрепим также зависимость $x(t)$ и $y(t)$:

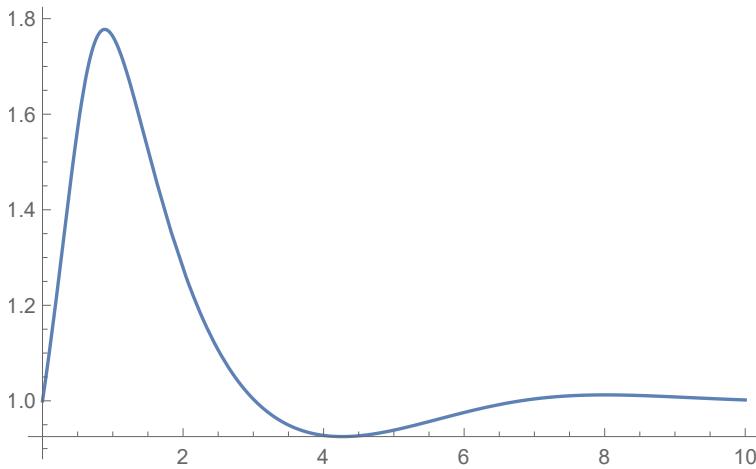


Рис. 1: Зависимость $x(t)$

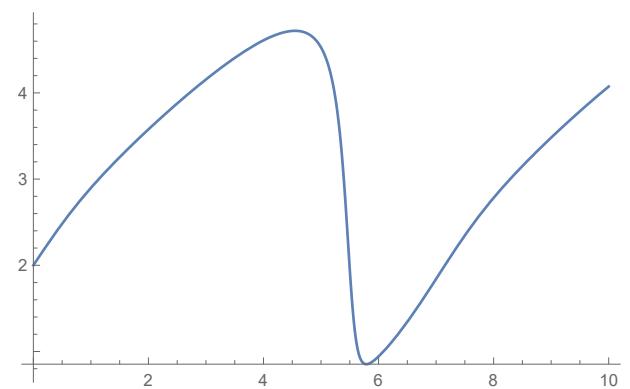


Рис. 2: Зависимость $y(t)$

Приведем характерные параметрические графики для случая $A=1$, $B=1$ и $A=1$, $B=3$. Как видно, в первом случае система устойчива, а во втором неустойчива. Это подтверждает пункт 1 отчета.

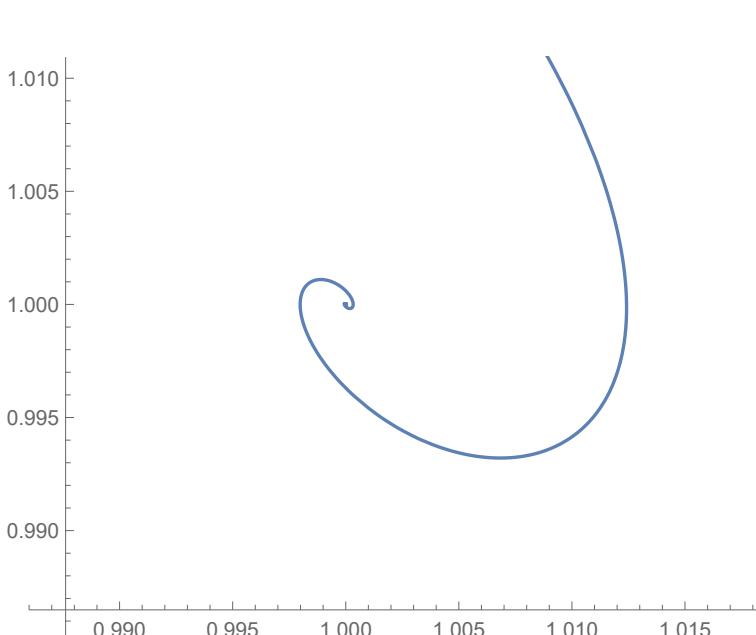


Рис. 3: $A=1$, $B=1$

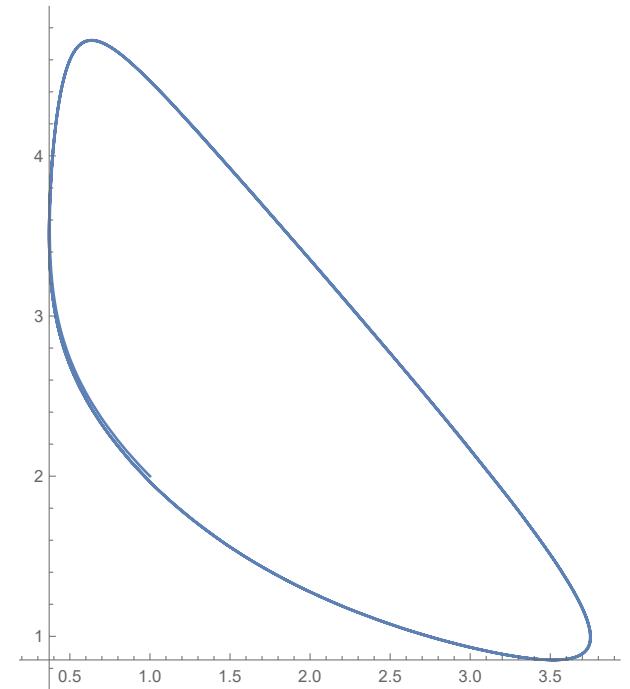


Рис. 4: $A=1$, $B=3$

Анализ нераспределенного случая на С

Будем использовать метод Рунге-Кутты.

Приведем исполняемый код:

```
#include <stdio.h>
#include<math.h>
#include<stdlib.h>

const float A = 1;
const float B = 3;

float F1(float u, float v)
{
    return (A + u*u*v (B+1)*u);
}

float F2(float u, float v)
{
    return ( u*u*v + B*u);
}

void runge_kutt(float h, float* u, float* v, int N)
{
FILE* fp ;
fp = fopen("brus" , "w") ;

    for( int i = 0; i < N; i++)
    {
        float k11 = 0, k12 = 0, k13 = 0, k14 = 0;
        float k21 = 0, k22 = 0, k23 = 0, k24 = 0;
        k11 = h*F1(u[ i] , v[ i]);
        k21 = h*F2(u[ i] , v[ i]);
        k12 = h*F1(u[ i] + k11/2, v[ i] + k21/2);
        k22 = h*F2(u[ i] + k11/2, v[ i] + k21/2);
        k13 = h*F1(u[ i] + k12/2, v[ i] + k22/2);
        k23 = h*F2(u[ i] + k12/2, v[ i] + k22/2);
        k14 = h*F1(u[ i] + k13/2, v[ i] + k23/2);
        k24 = h*F2(u[ i] + k13/2, v[ i] + k23/2);
        u[ i+1] = u[ i] + (k11 + 2*k12 + 2*k13 + k14)/6;
        v[ i+1] = v[ i] + (k21 + 2*k22 + 2*k23 + k24)/6;
        fprintf(fp , "%f ,%f ,%f \n" , h, u[ i] , v[ i] );
    }
fclose(fp );
}

int main()
{
int n = 100000;
float u[n];
float v[n];
float t[n];

u[0] = 1;
v[0] = 2;
t[0] = 0;
```

```

t [100] = 20;
float tau = 0.001;
int N = (t [100] - t [0]) / tau;
runge_kutt(tau, &u [0], &v [0], N);
return 0;
}

```

Построим три графика: $u(t)$, $v(t)$ и параметрический график u, v для двух случаев:

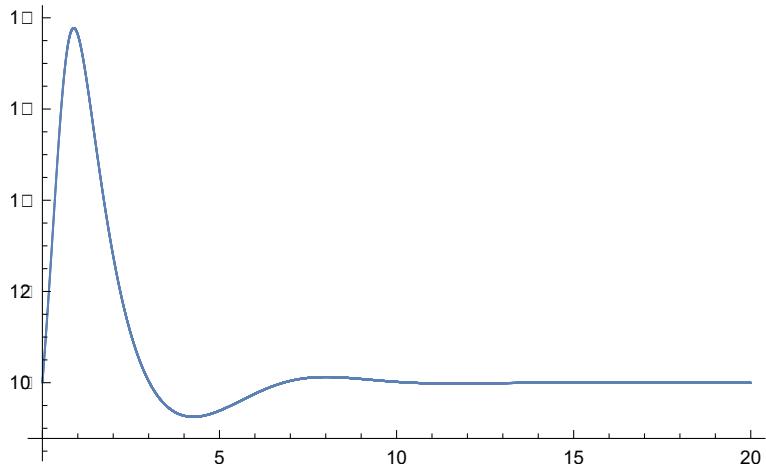


Рис. 5: $u(t)$ $A=1$, $B=1$

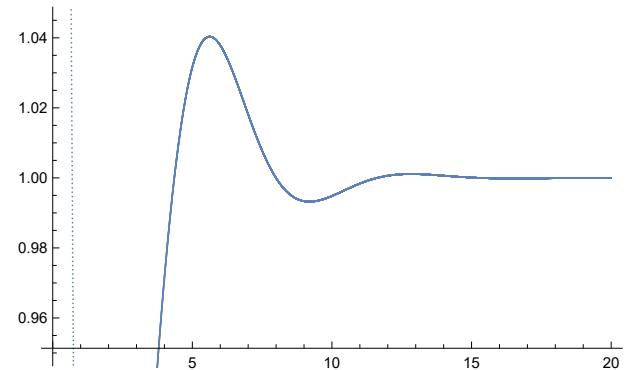


Рис. 6: $v(t)$ $A=1$, $B=3$

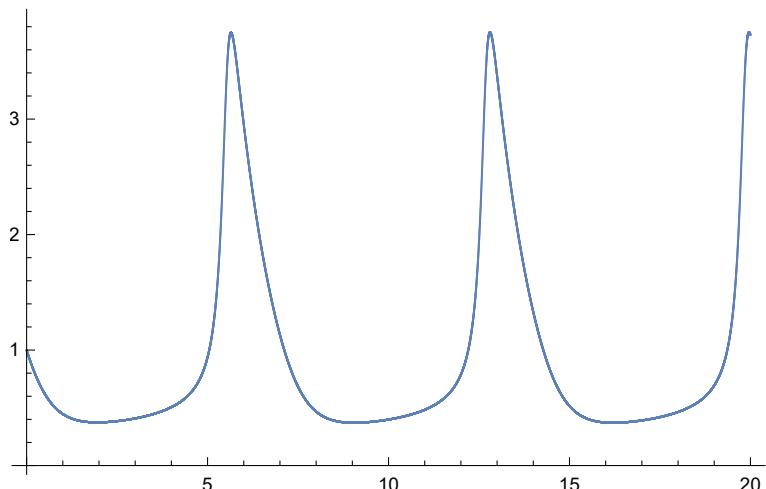


Рис. 7: $u(t)$ $A=1$, $B=3$

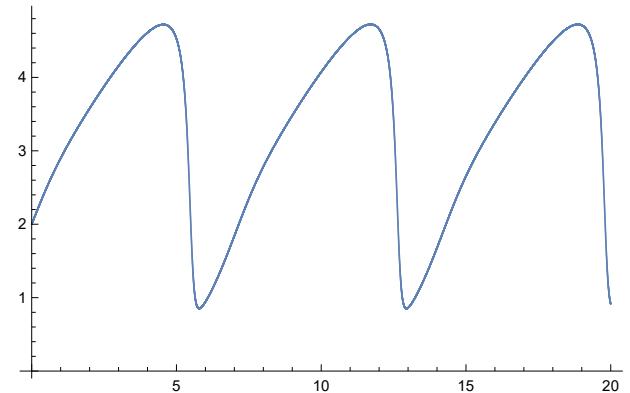


Рис. 8: $v(t)$ $A=1$, $B=3$

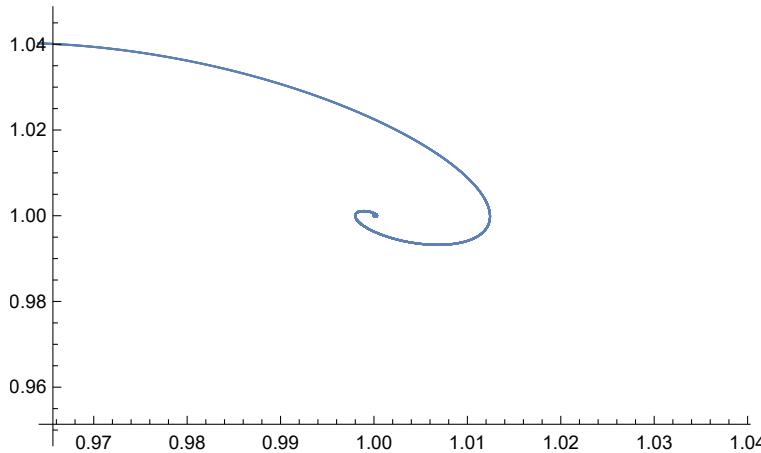


Рис. 9: A=1, B=1

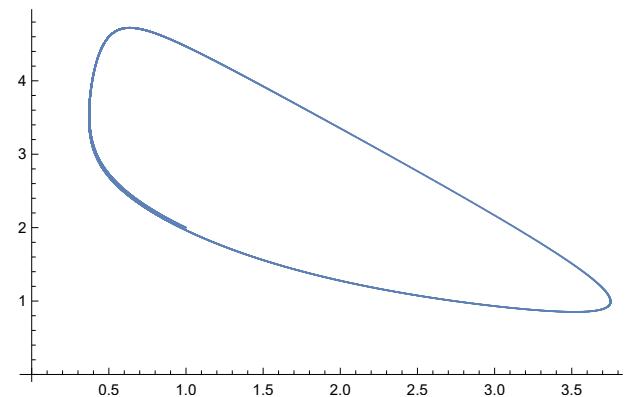


Рис. 10: A=1, B=3

Результаты совпадают с полученными в пункте 2.

Распределенный случай, подготовительные расчеты

$$\begin{cases} \dot{u} = A + u^2 v - (B + 1)u + D_u \Delta u, \\ \dot{v} = -u^2 v + Bu + D_v \Delta v. \end{cases} \quad (10)$$

Границные условия:

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = \frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = \frac{\partial v}{\partial x}(0, t) = \frac{\partial v}{\partial x}(l, t) = 0. \quad (11)$$

Начальные условия:

$$u(x, 0) = A, \quad v(x, 0) = \frac{B}{A}. \quad (12)$$

$$u_1^{(k+1)} = u_0^{(k+1)} + \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_0^{(k+1)} h + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_0^{(k+1)} \frac{h^2}{2} \quad (13)$$

Выразим из первого уравнения брюсселятора 10 вторую производную по координате и подставим в предыдущее уравнение 13 (k - временная координата, j - пространственная):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{D_u} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - A - u^2 v + (B + 1)u \right) \quad (14)$$

$$u_1^{(k+1)} = u_0^{(k+1)} + \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_0^{(k+1)} h + \frac{h^2}{2D_u} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_0^{(k+1)} - A - u^2 v \Big|_0^{(k+1)} + (B + 1)u_0^{(k+1)} \right) \quad (15)$$

Выразим из 15 первую производную и приравняем ее нулю, так как граничным условием является нулевой поток.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{h} (u_1^{(k+1)} - u_0^{(k+1)}) - \frac{h^2}{2D_u} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_0^{(k+1)} - A - u^2 v \Big|_0^{(k+1)} + (B + 1)u_0^{(k+1)} \right) = 0. \quad (16)$$

Разложим $(u^2 v) \Big|_0^{(k+1)}$ по формуле Тейлора:

$$(u^2 v) \Big|_0^{(k+1)} = (u^2)_0^{(k)} v_0^{(k+1)} + 2u_0^{(k)} v_0^{(k)} u_0^{(k+1)} - 2(u^2)_0^{(k)} v_0^{(k)}. \quad (17)$$

При этом

$$\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_0^{(k+1)} = \frac{u_0^{(k+1)} - u_0^{(k)}}{\tau} \quad (18)$$

Подставим 17 и 18 в 16 и сгруппируем члены при $u_1^{(k+1)}$ и $u_0^{(k+1)}$.

$$b_0 u_0^{(k+1)} + c_0 u_1^{(k+1)} = d_0, \quad j = 0, \quad (19)$$

где

$$a_0 = 0, \quad b_0 = -\frac{1}{h} - \frac{h}{2D_u}((B+1) + \frac{1}{\tau} - 2u_0^{(k)}v_0^{(k)}), \quad c_0 = \frac{1}{h}, \quad d_0 = \frac{h^2}{2D_u}(-\frac{1}{\tau}u_0^{(k)} - A - (u^2)_0^{(k)}v_0^{(k+1)} + 2(u^2)_0^{(k)}v_0^{(k)}). \quad (20)$$

Аналогично поступим для второй граници.

$$u_{N-1}^{(k+1)} = u_N^{(k+1)} + \frac{\partial u}{\partial x}\Big|_N^{(k+1)} h + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\Big|_N^{(k+1)} \frac{h^2}{2} \quad (21)$$

$$u_N^{(k+1)} = u_N^{(k+1)} + \frac{\partial u}{\partial x}\Big|_N^{(k+1)} h + \frac{h^2}{2D_u}(\frac{\partial u}{\partial t}\Big|_N^{(k+1)} - A - u^2 v\Big|_N^{(k+1)} + (B+1)u_N^{(k+1)}) \quad (22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{h}(u_{N-1}^{(k+1)} - u_N^{(k+1)} - \frac{h^2}{2D_u}(\frac{\partial u}{\partial t}\Big|_N^{(k+1)} - A - u^2 v\Big|_N^{(k+1)} + (B+1)u_N^{(k+1)})) = 0. \quad (23)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}\Big|_N^{(k+1)} = \frac{u_N^{(k+1)} - u_N^{(k)}}{\tau} \quad (24)$$

$$a_N u_{N-1}^{(k+1)} + b_N u_N^{(k+1)} = d_N, \quad j = N, \quad (25)$$

где

$$a_N = \frac{1}{h}, \quad b_N = -\frac{1}{h} - \frac{h}{2D_u}((B+1) + \frac{1}{\tau} - 2u_N^{(k)}v_N^{(k)}), \quad c_N = 0, \quad d_N = \frac{h}{2D_u}(-\frac{1}{\tau}u_N^{(k)} - A - (u^2)_N^{(k)}v_N^{(k+1)} + 2(u^2)_N^{(k)}v_N^{(k)}). \quad (26)$$

Припишем к граничным конечно-разностным уравнениям 10 в виде:

$$\frac{u_j^{(k+1)} - u_j^{(k)}}{\tau} = \frac{D_u}{h^2}(u_{j+1}^{(k+1)} - 2u_j^{(k+1)} + u_{j-1}^{(k+1)}) + A + (u^2)_j^{(k)}v_j^{(k+1)} + 2u_j^{(k)}v_j^{(k)}u_j^{(k+1)} - 2(u^2)_j^{(k)}v_j^{(k)} - (B+1)u_j^{(k+1)}, \quad j = \overline{1, N-1}. \quad (27)$$

$$a_j u_{j-1}^{(k+1)} + b_j u_j^{(k+1)} + c_j u_{j+1}^{(k+1)} = d_j, \quad j = \overline{1, N-1}, \quad (28)$$

где

$$a_j = \frac{D_u}{h^2}, \quad b_j = -\frac{1}{\tau} - \frac{2D_u}{h^2} - (B+1) + 2u_j^{(k)}v_j^{(k)}, \quad c_j = \frac{D_u}{h^2}, \quad d_j = -(\frac{u_j^{(k)}}{\tau} + A + (u^2)_j^{(k)}v_j^{(k+1)} - 2(u^2)_j^{(k)}v_j^{(k)}). \quad (29)$$

По изложенному алгоритму поступим и со вторым уравнением брюсселятора.

$$b_0 v_0^{(k+1)} + c_0 v_1^{(k+1)} = d_0, \quad j = 0, \quad (30)$$

где

$$a_0 = 0, \quad b_0 = -\frac{1}{h} - \frac{h^2}{2D_v}(\frac{1}{\tau} + (u^2)_0^{(k)}), \quad c_0 = \frac{1}{h}, \quad d_0 = \frac{h^2}{2D_u}(-\frac{1}{\tau}v_0^{(k)} + 2u_0^{(k)}v_0^{(k)}u_0^{(k+1)} - 2(u^2)_0^{(k)}v_0^{(k)} - Bu_0^{(k+1)}). \quad (31)$$

$$a_N v_{N-1}^{(k+1)} + b_N v_N^{(k+1)} = d_N, \quad j = N, \quad (32)$$

где

$$a_0 = \frac{1}{h}, \quad b_0 = -\frac{1}{h} - \frac{h}{2D_v}(\frac{1}{\tau} + (u^2)_N^{(k)}), \quad c_N = 0, \quad d_N = \frac{h}{2D_v}(-\frac{1}{\tau}v_N^{(k)} + 2u_N^{(k)}v_N^{(k)}u_N^{(k+1)} - 2(u^2)_N^{(k)}v_N^{(k)} - Bu_N^{(k+1)}). \quad (33)$$

$$\frac{v_j^{(k+1)} - v_j^{(k)}}{\tau} = \frac{D_v}{h^2}(v_{j+1}^{(k+1)} - 2v_j^{(k+1)} + v_{j-1}^{(k+1)}) - (u^2)_j^{(k)}v_j^{(k+1)} - 2u_j^{(k)}v_j^{(k)}u_j^{(k+1)} + 2(u^2)_j^{(k)}v_j^{(k)} + Bu_j^{(k+1)}, \quad j = \overline{1, N-1}. \quad (34)$$

$$a_j v_{j-1}^{(k+1)} + b_j v_j^{(k+1)} + c_j v_{j+1}^{(k+1)} = d_j, \quad j = \overline{1, N-1}, \quad (35)$$

где

$$a_j = \frac{D_v}{h^2}, \quad b_j = -\frac{1}{\tau} - \frac{2D_u}{h^2} + (u^2)_j^{(k)}, \quad c_j = \frac{D_v}{h^2}, \quad d_j = -\left(\frac{v_j^{(k)}}{\tau} + 2(u^2)_j^{(k)}v_j^{(k)} + 2u_j^{(k)}v_j^{(k)}u_j^{(k+1)} + Bu_j^{(k+1)}\right). \quad (36)$$

Для каждого из уравнений получаем СЛАУ с трехдиагональной матрицей, решаемой методом прогонки:

$$A_j = -\frac{c_j}{b_j + a_j A_{j-1}}, \quad B_j = \frac{d_j - a_j B_{j-1}}{b_j + a_j A_{j-1}}, \quad A_0 = -\frac{c_0}{b_0}, \quad B_0 = \frac{d_0}{b_0}, \quad A_N = 0, j = \overline{0, N}; \quad (37)$$

$$u_j^{(k+1)} = A_j u_{j+1}^{(k+1)} + B_j, \quad u_N^{(k+1)} = B_N, j = N, N-1, \dots, 0. \quad (38)$$

Распределенный случай методом Кранка-Николсона, вторая попытка

$$\begin{cases} \dot{u} = A + u^2 v - (B + 1)u + D_u \Delta u, \\ \dot{v} = -u^2 v + Bu + D_v \Delta v. \end{cases} \quad (39)$$

Границные условия:

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = \frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = \frac{\partial v}{\partial x}(0, t) = \frac{\partial v}{\partial x}(l, t) = 0. \quad (40)$$

Начальные условия:

$$u(x, 0) = A, \quad v(x, 0) = \frac{B}{A}. \quad (41)$$

Введем: p - пространственная координата, q - времененная.

Приблизим вторую производную в уравнениях разностной схемой Кранка-Николсона, перегруппируем члены и введем обозначения $r_u = \frac{D_u \tau}{2h^2}$, $r_v = \frac{D_v \tau}{2h^2}$, $f_u = f_u(u_p^{(q)}, v_p^{(q)}) = A + (u_p^{(q)})^2 v_p^{(q)} - (B + 1)u_p^{(q)}$, $f_v = f_v(u_p^{(q)}, v_p^{(q)}) = -(u_p^{(q)})^2 v_p^{(q)} - Bu_p^{(q)}$ (здесь τ - шаг времененной сетки, а h - пространственной):

$$u_p^{(q+1)} - u_p^{(q)} = \frac{D_u \tau}{2h^2} (u_{p+1}^{(q+1)} - 2u_p^{(q+1)} + u_{p-1}^{(q+1)}) + \frac{D_u \tau}{2h^2} (u_{p+1}^{(q)} - 2u_p^{(q)} + u_{p-1}^{(q)}) + \tau f_u = r_u (u_{p+1}^{(q+1)} - 2u_p^{(q+1)} + u_{p-1}^{(q+1)}) + r_u (u_{p+1}^{(q)} - 2u_p^{(q)} + u_{p-1}^{(q)}) + \tau f_u. \quad (42)$$

$$u_p^{(q+1)} (1 + 2r_u) - r_u (u_{p+1}^{(q+1)} + u_{p-1}^{(q+1)}) = u_p^{(q)} + r_u (u_{p+1}^{(q)} - 2u_p^{(q)} + u_{p-1}^{(q)}) + \tau f_u. \quad (43)$$

$$\begin{cases} (1 + 2r_u)u_p^{q+1} - r_u (u_{p+1}^{q+1} + u_{p-1}^{q+1}) = u_p^{(q)} + r_u (u_{p+1}^{(q)} - 2u_p^{(q)} + u_{p-1}^{(q)}) + \tau f_u, \\ (1 + 2r_v)v_p^{q+1} - r_v (v_{p+1}^{q+1} + v_{p-1}^{q+1}) = v_p^{(q)} + r_v (v_{p+1}^{(q)} - 2v_p^{(q)} + v_{p-1}^{(q)}) + \tau f_v. \end{cases} \quad (44)$$

В левой части стоят три неизвестных величины, а в правой три известных. Получили тридиагональную матрицу. Учтем граничные условия:

$$u_1^{(q+1)} - u_1^{(q)} = r_u (u_2^{q+1} - 2u_1^{(q+1)} + u_0^{(q+1)}) + r_u (u_2^{(q)} - 2u_1^{(q)} + u_0^{(q)}) + \tau f_u. \quad (45)$$

Так как граничным условием является нулевой поток, $u_2^{(q)} = u_0^{(q)}$ и уравнение перепишется в виде

$$u_1^{(q+1)} - u_1^{(q)} = 2r_u (u_0^{q+1} - u_1^{(q+1)}) + 2r_u (u_0^{(q)} - u_1^{(q)}) + \tau f_u. \quad (46)$$

$$(1 + 2r_u)u_1^{q+1} - 2r_u u_0^{q+1} = u_1^{(q)} + 2r_u (u_0^{(q)} - u_1^{(q)}) + \tau f_u. \quad (47)$$

Аналогично для второй границы и второй переменной.

Запишем в виде матрицы:

$$\begin{pmatrix} (1 + 2r_u) & -2r_u & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -r_u & (1 + 2r_u) & -r_u & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -r_u & (1 + 2r_u) & -r_u & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_u & (1 + 2r_u) & -r_u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2r_u & (1 + 2r_u) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1^{q+1} \\ u_2^{q+1} \\ u_3^{q+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ u_{n-2}^{q+1} \\ u_{n-1}^{q+1} \end{pmatrix} = \quad (48)$$

$$\begin{pmatrix} u_1^{(q)} + r_u(u_2^{(q)} - 2u_1^{(q)} + u_0^{(q)}) + \tau f_u \\ u_2^{(q)} + r_u(u_3^{(q)} - 2u_2^{(q)} + u_1^{(q)}) + \tau f_u \\ u_3^{(q)} + r_u(u_4^{(q)} - 2u_3^{(q)} + u_2^{(q)}) + \tau f_u \\ \vdots \\ u_{n-2}^{(q)} + r_u(u_{n-1}^{(q)} - 2u_{n-2}^{(q)} + u_{n-3}^{(q)}) + \tau f_u \\ u_{n-1}^{(q)} + r_u(u_n^{(q)} - 2u_{n-1}^{(q)} + u_{n-2}^{(q)}) + \tau f_u \end{pmatrix} \quad (49)$$

Аналогичные выражения можно получить и для v .

$$\begin{pmatrix} (1+2r_v) & -2r_v & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -r_v & (1+2r_v) & -r_v & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -r_v & (1+2r_v) & -r_v & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_v & (1+2r_v) & -r_v \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2r_v & (1+2r_v) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_1^{q+1} \\ v_2^{q+1} \\ v_3^{q+1} \\ \vdots \\ v_{n-2}^{q+1} \\ v_{n-1}^{q+1} \end{pmatrix} = \quad (50)$$

$$\begin{pmatrix} v_1^{(q)} + r_v(v_2^{(q)} - 2v_1^{(1)} + v_0^{(q)}) + \tau f_v \\ v_2^{(q)} + r_v(v_3^{(q)} - 2v_2^{(1)} + v_1^{(q)}) + \tau f_v \\ v_3^{(q)} + r_v(v_4^{(q)} - 2v_3^{(1)} + v_2^{(q)}) + \tau f_v \\ \vdots \\ v_{n-2}^{(q)} + r_v(v_{n-1}^{(q)} - 2v_{n-2}^{(1)} + v_{n-3}^{(q)}) + \tau f_v \\ v_{n-1}^{(q)} + r_v(v_n^{(q)} - 2v_{n-1}^{(1)} + v_{n-2}^{(q)}) + \tau f_v \end{pmatrix} \quad (51)$$

Границные условия Первый способ записать граничные условия - воспользоваться методом из предпредыдущего пункта.

$$\dot{u} = A + u^2 v - (B + 1)u + D_u \Delta u. \quad (52)$$

Так как на границе нулевой поток, то

$$u_1^{(k)} = u_0^{(k)} + \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_0^{(k)} h + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_0^{(k)} \frac{h^2}{2} = u_0^{(k)} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_0^{(k)} \frac{h^2}{2}. \quad (53)$$

Подставляем вторую производную из 53 в 52.

$$\dot{u} = A + u^2 v - (B + 1)u + \frac{2Du}{h^2}(u_1^{(k)} - u_0^{(k)}). \quad (54)$$

Производная по времени

$$u_0^{(k+1)} = u_0^{(k)} + \tau \dot{u} \Big|_0^k. \quad (55)$$

Значит,

$$u_0^{(k+1)} = u_0^{(k)} + \tau(A + (u_0^{(k)})^2 v_0^{(k)} - (B + 1)u_0^{(k)} + \frac{2Du}{h^2}(u_1^{(k)} - u_0^{(k)})). \quad (56)$$

Аналогично:

$$u_{N-1}^{(k+1)} = u_{N-1}^{(k)} + \tau(A + (u_{N-1}^{(k)})^2 v_{N-1}^{(k)} - (B + 1)u_{N-1}^{(k)} + \frac{2Du}{h^2}(u_{N-2}^{(k)} - u_{N-1}^{(k)})). \quad (57)$$

$$v_0^{(k+1)} = v_0^{(k)} + \tau(-(u_0^{(k)})^2 v_0^{(k)} + Bu_0^{(k)} + \frac{2Du}{h^2}(v_1^{(k)} - v_0^{(k)})). \quad (58)$$

$$v_{N-1}^{(k+1)} = v_{N-1}^{(k)} + \tau(-(u_{N-1}^{(k)})^2 v_{N-1}^{(k)} + Bu_{N-1}^{(k)} + \frac{2Du}{h^2}(v_{N-2}^{(k)} - v_{N-1}^{(k)})). \quad (59)$$

Второй более простой способ записать граничные условия:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0}^q = 0 = \frac{u_1^q - u_0^q}{h}. \quad (60)$$

Отсюда

$$u_1^q = u_0^q, \quad u_n^q = u_{n-1}^q, \quad v_1^q = v_0^q, \quad v_n^q = v_{n-1}^q. \quad (61)$$

Реализация на C

```
#include <stdio.h>
```

```
void solve_tridiagonal(double * restrict const x, const int X, const double * restrict
    const a, const double * restrict const b, double * restrict const c) {
/*
solves Ax = v where A is a tridiagonal matrix consisting of vectors a, b, c
x initially contains the input vector v, and returns the solution x. indexed
from 0 to X-1 inclusive
X number of equations (length of vector x)
a subdiagonal (means it is the diagonal below the main diagonal), indexed from 1
to X-1 inclusive
b the main diagonal, indexed from 0 to X-1 inclusive
c superdiagonal (means it is the diagonal above the main diagonal), indexed from
0 to X-2 inclusive
```

*Note: contents of input vector c will be modified, making this a one time use
function (scratch space can be allocated instead for this purpose to make it
reusable)*

*Note 2: We don't check for diagonal dominance, etc.; this is not guaranteed stable
/

```
c[0] = c[0] / b[0];
x[0] = x[0] / b[0];
```

```
/* loop from 1 to X-1 inclusive, performing the forward sweep */
for (int ix = 1; ix < X; ix++) {
    const double m = 1.0f / (b[ix] - a[ix] * c[ix - 1]);
    c[ix] = c[ix] * m;
    x[ix] = (x[ix] - a[ix] * x[ix - 1]) * m;
}
```

```
/* loop from X-2 to 0 inclusive (safely testing loop condition for an unsigned
integer), to perform the back substitution */
for (int ix = X - 2; ix >= 0; ix--)
    x[ix] = c[ix] * x[ix + 1];
}
```

```
const double A = 1;
const double B = 1;
const double Du = 1;
const double Dv = 100;
```

```
int main() {
```

```
double a = 0;
```

```

double b = 1;
double T = 1;
double t0 = 0;
double h = 0.01;
double tau = 0.01;
int Nx = (b - a) / h;
int Nt = (T - t0) / tau;

double ru = Du*tau/2/h/h;
double rv = Dv*tau/2/h/h;

double au[Nx 2]; double bu[Nx 2]; double cu[Nx 2];
double av[Nx 2]; double bv[Nx 2]; double cv[Nx 2];
au[0] = 0.; av[0] = 0.;
for(int i=1; i<Nx 2; i++){
    av[i] = rv;
    au[i] = ru;
}
for(int i=0; i<Nx 2; i++){
    bu[i] = 1+2*ru;
    bv[i] = 1+2*rv;
}
cu[Nx 2] = 0.;
cv[Nx 2] = 0.;
for(int i=0; i<Nx 3; i++){
    cv[i] = rv;
    cu[i] = ru;
}

double fu[Nt][Nx];
double fv[Nt][Nx];

for(int j = 0; j < Nt; j++){
    for(int i = 0; i < Nx; i++){
        fu[j][i] = 0.;
        fv[j][i] = 0.;
    }
}

for(int i = 0; i < Nx; i++){
    fv[0][i] = B/A;
    fu[0][i] = A;
}

double urightpart[Nx 2];
double vrightpart[Nx 2];

for(int j = 1; j < Nt; j++){
    for(int i = 1; i < Nx 1; i++){
        urightpart[i] = (1 - tau*(B+1) - 2*ru)*fu[j-1][i] + ru*(fu[j-1][i-1] + fu[j-1][i+1]) /*+ tau*fu[j-1][i]*fu[j-1][i]*fv[j-1][i]*/ + tau*A;
        vrightpart[i] = (1 - 2*rv)*fv[j-1][i] + tau*B*fu[j-1][i] /*- tau*fu[j-1][i]*fu[j-1][i]*fv[j-1][i]*/;
    }
    if(j == 3) for(int i=1; i < Nx 1; i++){ printf("%f ", urightpart[i]); }
    solve_tridiagonal(urightpart, Nx 2, au, bu, cu);
}

```

```

solve_tridiagonal(vrightpart, Nx 2, av, bv, cv);
if(j == 3) for(int i=1; i < Nx 1; i++){ printf("%f ", urightpart[i]); }
for(int i = 1; i < Nx 1; i++){
    fu[j][i] = urightpart[i];
    fv[j][i] = vrightpart[i];
}
fu[j][0] = fu[j][1];
fu[j][Nx 1] = fu[j][Nx 2];
fv[j][0] = fv[j][1];
fv[j][Nx 1] = fv[j][Nx 2];
/*
fu[j][0] = fu[j][0] + tau*(A + fu[j][0]*fu[j][0]*fv[j][0] - (B+1)*fu[j][0] +
2*Dv/h/h*(fu[j][1] - fu[j][0]));
fu[j][Nx 1] = fu[j][Nx 1] + tau*(A + fu[j][Nx 1]*fu[j][Nx 1]*fv[j][Nx 1] - (B
+1)*fu[j][Nx 1] + 2*Dv/h/h*(fu[j][Nx 2] - fu[j][Nx 1]));
fv[j][0] = fv[j][0] + tau*( fu[j][0]*fu[j][0]*fv[j][0] + B*fu[j][0] + 2*Dv/h/
h*(fv[j][1] - fv[j][0]));
fv[j][Nx 1] = fv[j][Nx 1] + tau*( fu[j][Nx 1]*fu[j][Nx 1]*fv[j][Nx 1] + B*fu[
j][Nx 1] + 2*Dv/h/h*(fv[j][Nx 2] - fv[j][Nx 1]));*/
}

FILE* fp;
fp = fopen("brus.dat", "w");
for(int j = 0; j < Nt; j++){
    for(int i = 0; i < Nx; i++){
        fprintf(fp, "%f %f %f %f\n", j*tau, i*h, fu[j][i], fv[j][i]);
    }
}
fclose(fp);
return 0;
}

```

Данный код выдает слишком большие значения u и v.

Возможные проблемы:

- Нелинейные члены в правой части
- Границные условия
- Соотношение констант

Приведем результаты исполнения кода при разных условиях:

```

data = Import["/home/homa/brusselator/brus.dat", "Table"];
srezdata =
Cases[data, {__ (*t_ /; (t>=0.03)&&(t<0.04)*),
x_ /; x == a_, __} /. a > 0.40];
tdata = srezdata[[All, 1]];
udata = srezdata[[All, 3]];
listTU = Transpose[{tdata, udata}];
ListLinePlot[listTU]
ListContourPlot[data[[All, 1 ;; 3]]]

```

```

Export["/home/homa/brusselator/plots/b=3nonlinsimplex040.png",
ListLinePlot[listTU]];
Export["/home/homa/brusselator/plots/b=3nonlinsimplex0043d.png",
ListContourPlot[data[[All, 1 ;; 3]]]];

```

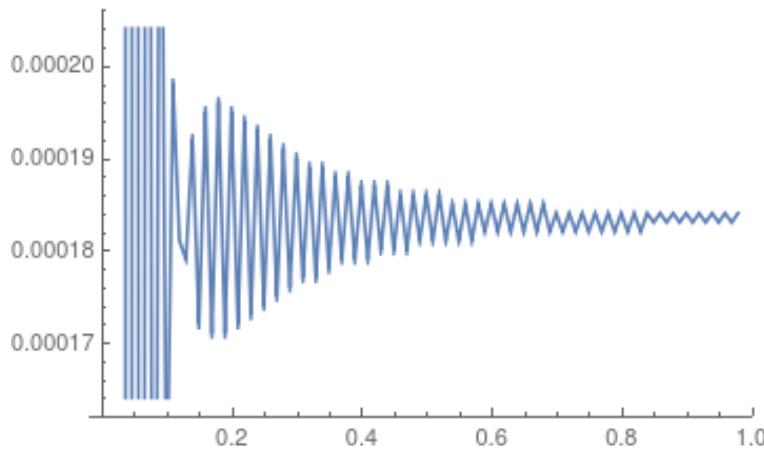


Рис. 11: $u(t)$ $B=1$, lin, simple, $x=004$

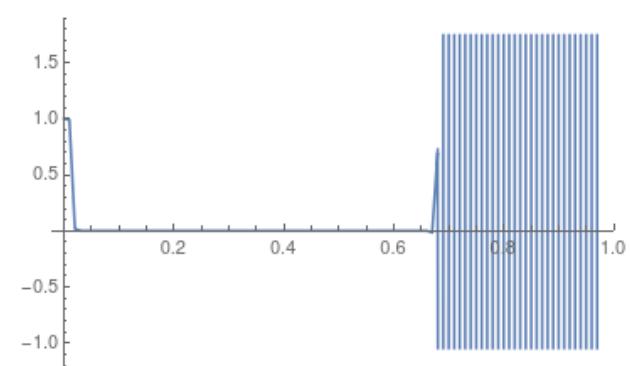


Рис. 12: $u(t)$ $B=1$, lin, simple, $x=040$

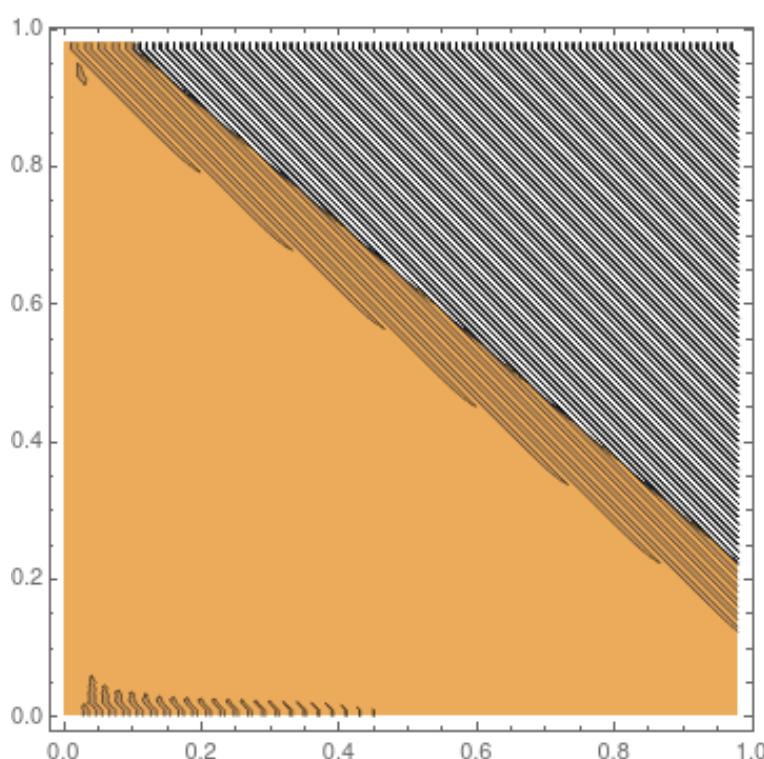


Рис. 13: $u(x,t)$ $B=1$, lin, simple, $x=004$

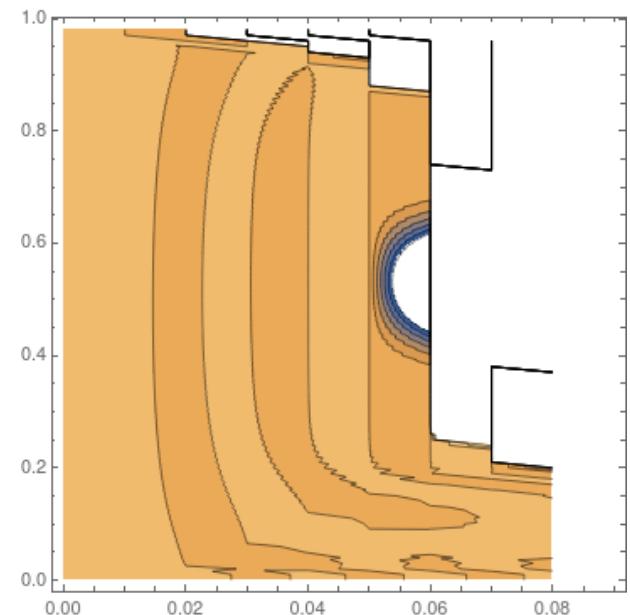


Рис. 14: $u(x,t)$ $B=3$, nonlin, simple, $x=004$

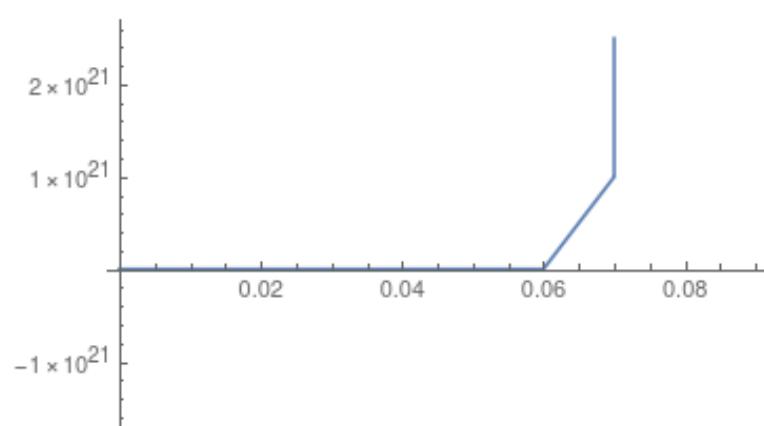


Рис. 15: $u(t)$ $B=3$, nonlin, simple, $x = 0.4$

Исследование на устойчивость распределенного случая

Рассмотрим более общий случай:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = P(u, v, x) + D_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} = Q(u, v, x) + D_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \end{cases} \quad (62)$$

Введем ξ и η - малые отклонения от решений системы $P(u, v) = 0$, $Q(u, v) = 0$. Тогда уравнения перепишутся:

$$\begin{cases} \frac{\partial \xi}{\partial t} = a\xi + b\eta + D_u \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} = c\xi + d\eta + D_v \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (63)$$

где

$$a = \frac{\partial P}{\partial u}, \quad b = \frac{\partial P}{\partial v}, \quad c = \frac{\partial Q}{\partial u}, \quad d = \frac{\partial Q}{\partial v}. \quad (64)$$

Решение будем искать в виде $\xi(t, x) = \bar{A}e^{pt}e^{ikx}$, $\eta(t, x) = \bar{B}e^{pt}e^{ikx}$.

Подставим в систему и сократим на экспоненты, получим:

$$\begin{cases} \bar{A}p = a\bar{A} + b\bar{B} - D_u k^2 \bar{A}, \\ \bar{B}p = c\bar{A} + d\bar{B} - D_v k^2 \bar{B}. \end{cases} \quad (65)$$

\bar{A} и \bar{B} не равны нулю, если

$$(p - a + k^2 D_u)(p - d + k^2 D_v) - bc = 0. \quad (66)$$

Решения этого уравнения:

$$p_{1,2} = \frac{a + d - (D_u + D_v)k^2 \pm \sqrt{(a - d - k^2(D_u - D_v))^2 + 4bc}}{2}. \quad (67)$$

Знак действительной части $p_{1,2}$ показывает, будет ли решением устойчивым.

В нашем случае

$$a = \frac{\partial P}{\partial u} = B - 1, \quad b = \frac{\partial P}{\partial v} = A^2, \quad c = \frac{\partial Q}{\partial u} = -B, \quad d = \frac{\partial Q}{\partial v} = -A^2. \quad (68)$$

и дисперсионное уравнение имеет вид:

$$(p - B - 1 + k^2 D_u)(p + A^2 + K^2 D_v) + BA^2 = 0. \quad (69)$$

$$p_{1,2} = \frac{B - 1 - A^2 - (D_u + D_v)k^2 \pm \sqrt{(B - 1 - A^2 - k^2(D_u - D_v))^2 - 4A^2 B}}{2}. \quad (70)$$

Построим график $p_{1,2}(k)$:

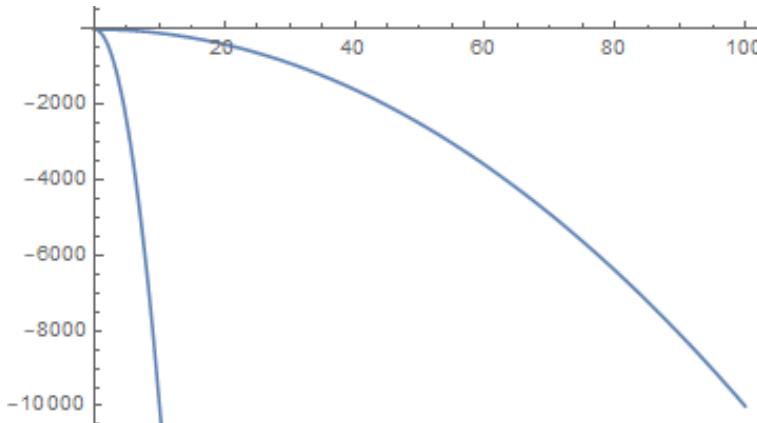


Рис. 16: $\text{Re}(p_{1,2}(k))$, $A=1$, $B=1$, $D_u=1$, $D_v=100$