

# Брюсселятор

## Содержание

<b>1 Нераспределенный случай</b>	<b>1</b>
1.1 Исследование на устойчивость нераспределенного случая . . . . .	1
1.2 Предварительный анализ нераспределенного случая в Wolfram Mathematica . . . . .	2
1.3 Анализ нераспределенного случая на С . . . . .	3
<b>2 Распределенный случай</b>	<b>5</b>
2.1 Явная реализация . . . . .	5
2.2 Подготовительные расчеты . . . . .	7
2.3 Метод Кранка-Николсона . . . . .	9
2.4 Граничные условия . . . . .	10
2.5 Исследование устойчивости разностной схемы . . . . .	11
2.5.1 Признак максимума . . . . .	11
2.5.2 Энергетический критерий устойчивости . . . . .	12
2.6 Исследование на устойчивость распределенного случая . . . . .	12
2.7 Неустойчивость Тьюринга . . . . .	13
2.8 Реализация на С . . . . .	15
2.9 Анализ распределенного случая на Wolfram . . . . .	19

## 1 Нераспределенный случай

### 1.1 Исследование на устойчивость нераспределенного случая

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

Линеаризуем эту систему:

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

Предположим, что коэффициенты А и В 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  $\delta$ : 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  $\delta$ : при  $\delta > 0$  устойчивый узел, при  $\delta < 0$  неустойчивый узел
- $\sigma < 0$ , тогда корни действительные, но разных знаков, реализуется случай седла

$\delta = 0$  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.

## 1.2 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 A и B, а также смотреть на картинку с течением времени.

Прикрепим также зависимость  $x(t)$  и  $y(t)$ :

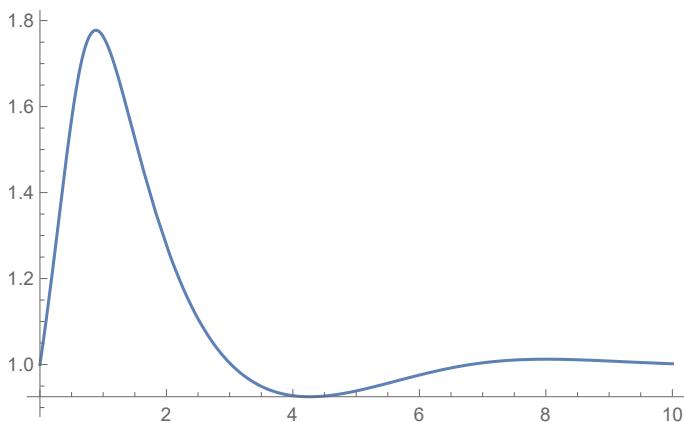


Рис. 1: Зависимость  $x(t)$

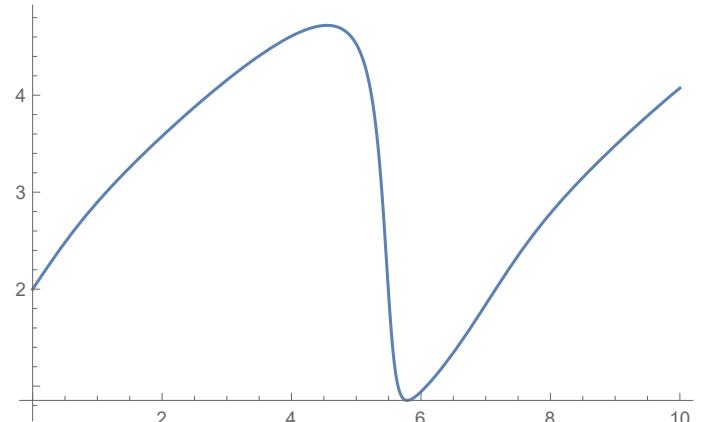


Рис. 2: Зависимость  $y(t)$

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.

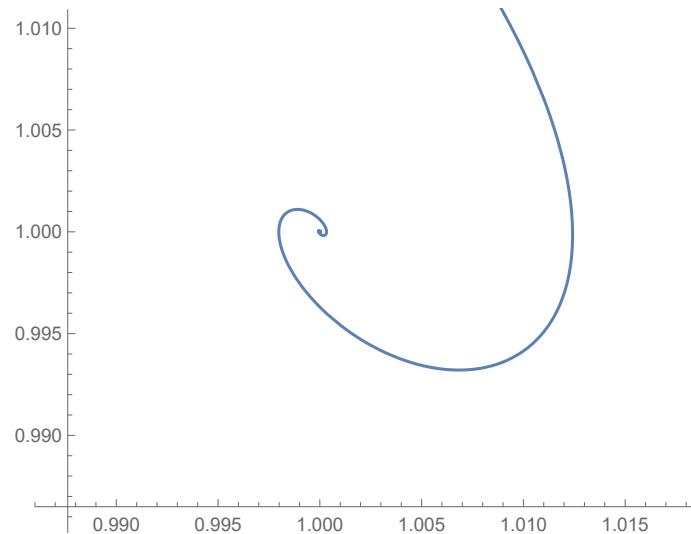


Рис. 3: A=1, B=1

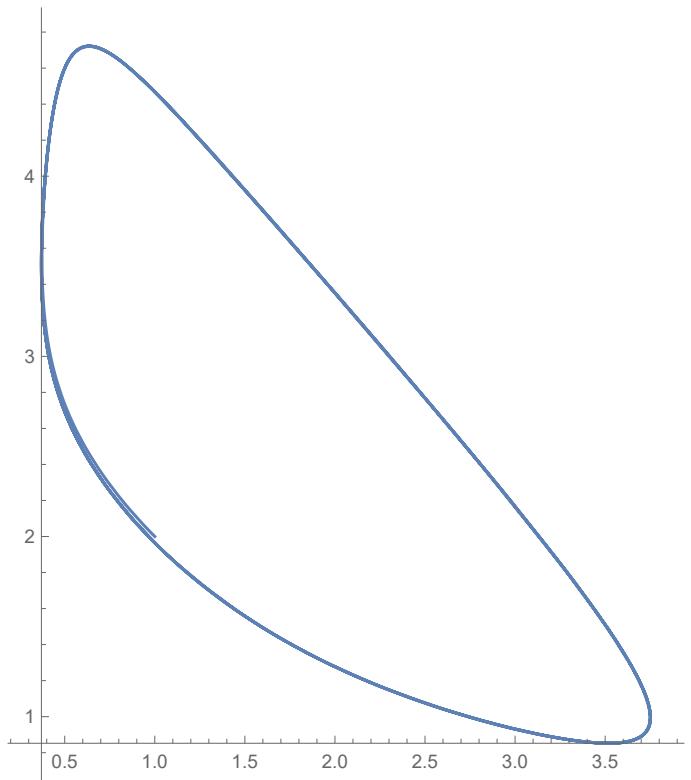


Рис. 4: A=1, B=3

### 1.3 Анализ нераспределенного случая на С

Будем использовать метод Рунге-Кутты.

Приведем исполняемый код:

```

1 #include <stdio.h>
2 #include<math.h>
3 #include<stdlib.h>
4
5 const float A = 1;
6 const float B = 3;
7
8 float F1(float u, float v)
9 {
10    return (A + u*u*v*(B+1)*u);
11 }
12
13 float F2(float u, float v)
14 {
15    return (u*u*v + B*u);
16 }
17
18 void runge_kutt(float h, float* u, float* v, int N)
19 {
20 FILE* fp;
21 fp = fopen("brus", "w");
22
23 for(int i = 0; i < N; i++)
24 {
25    float k11 = 0, k12 = 0, k13 = 0, k14 = 0;
26    float k21 = 0, k22 = 0, k23 = 0, k24 = 0;
27    k11 = h*F1(u[i], v[i]);
28    k21 = h*F2(u[i], v[i]);
29    k12 = h*F1(u[i] + k11/2, v[i] + k21/2);
30    k22 = h*F2(u[i] + k11/2, v[i] + k21/2);
31

```

```

32 k13 = h*F1(u[i] + k12/2, v[i] + k22/2);
33 k23 = h*F2(u[i] + k12/2, v[i] + k22/2);
34 k14 = h*F1(u[i] + k13/2, v[i] + k23/2);
35 k24 = h*F2(u[i] + k13/2, v[i] + k23/2);
36 u[i+1] = u[i] + (k11 + 2*k12 + 2*k13 + k14)/6;
37 v[i+1] = v[i] + (k21 + 2*k22 + 2*k23 + k24)/6;
38 fprintf(fp, "%f, %f, %f \n", h, u[i], v[i]);
39 }
fclose(fp);
40 }
41
42 int main()
43 {
44 int n = 100000;
45 float u[n];
46 float v[n];
47 float t[n];
48
49 u[0] = 1;
50 v[0] = 2;
51 t[0] = 0;
52 t[100] = 20;
53 float tau = 0.001;
54 int N = (t[100] - t[0])/tau;
55 runge_kutt(tau, &u[0], &v[0], N);
56 return 0;
57 }

```

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

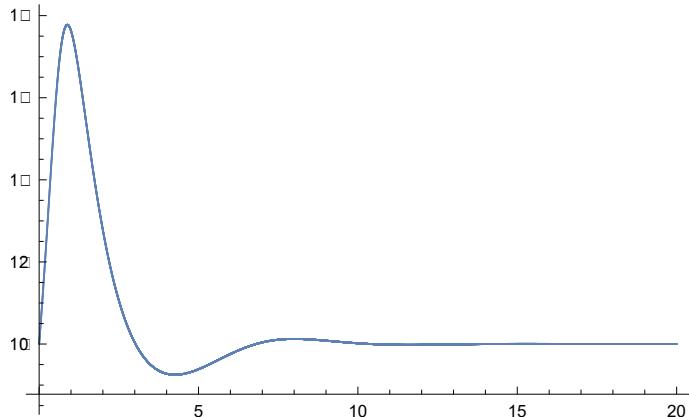


Рис. 5:  $u(t)$  A=1, B=11 цвцв

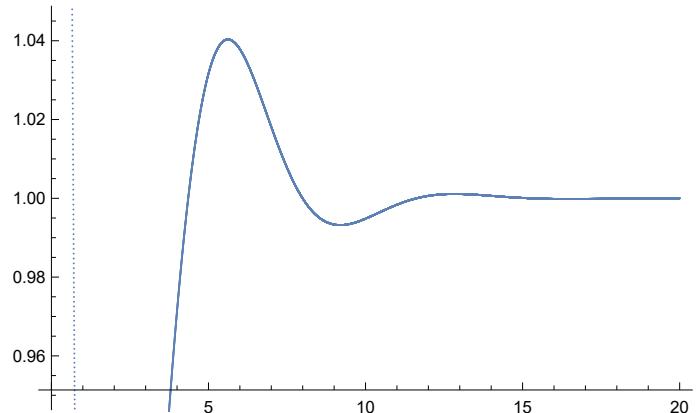


Рис. 6:  $v(t)$  A=1, B=1

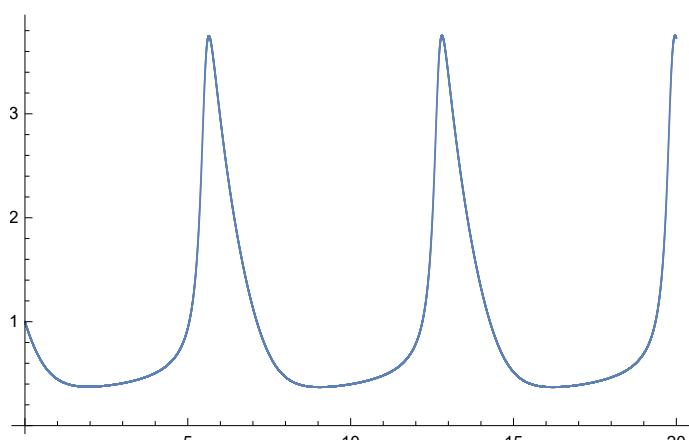


Рис. 7:  $u(t)$  A=1, B=3

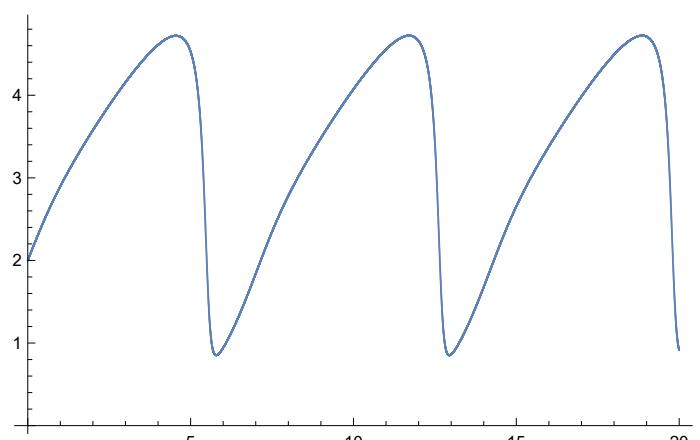


Рис. 8:  $v(t)$  A=1, B=3

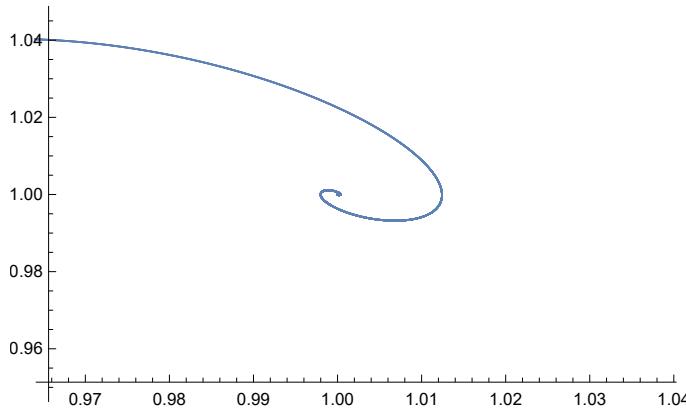


Рис. 9:  $A=1, B=1$

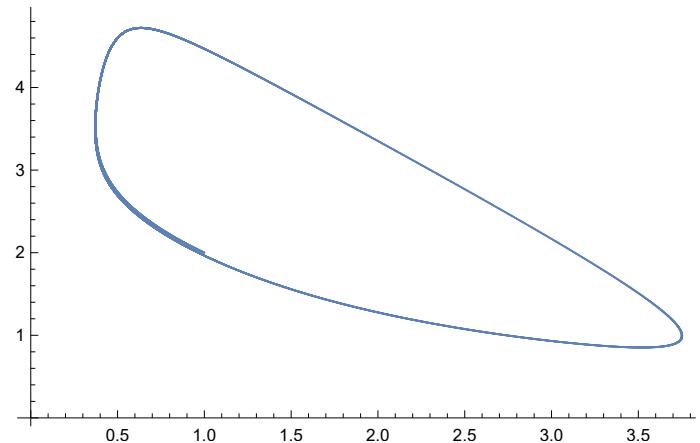


Рис. 10:  $A=1, B=3$

Результаты совпадают с полученными в пункте 2.

## 2 Распределенный случай

### 2.1 Явная реализация

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 const float A = 1;
5 const float B = 1;
6 const float Du = 1;
7 const float Dv = 100;
8
9 int main(){
10
11 float a = 0;
12 float b = 1;
13 float T = 1;
14 float t0 = 0;
15 float h = 0.01;
16 float tau = 0.01;
17 int Nx = (b - a) / h;
18 int Nt = (T - t0) / tau;
19
20 float ru = Du*tau/2/h/h;
21 float rv = Dv*tau/2/h/h;
22
23 float fu[Nt+1][Nx+1];
24 float fv[Nt+1][Nx+1];
25
26 for( int j = 0; j < Nt; j++){
27     for( int i = 0; i < Nx; i++){
28         fu[j][i] = 0.;
29         fv[j][i] = 0.;
30     }
31 }
32
33 double noiseu = 0.005*(rand()%100);
34 double noisev = 0.005*(rand()%100);
35 for( int i = 0; i <= Nx; i++){
36     fv[0][i] = B/A + noisev;
37     fu[0][i] = A + noiseu;
38 }
39
40 for( int j = 1; j <= Nt; j++){

```

```

42 for( int i = 1; i <Nx; i++){
43   fu[j][i] = fu[j-1][i] + tau*(A+fu[j-1][i]*fu[j-1][i]*fv[j-1][i] - (B+1)*fu[j-1][i] + Du/h/h*(fu[j-1][i+1]+fu[j-1][i-1] 2* fu[j-1][i]));
44   fv[j][i] = fv[j-1][i] + tau*(- fu[j-1][i]*fu[j-1][i]*fv[j-1][i] + B*fu[j-1][i] + Dv/h/h*(fv[j-1][i] +1)+fv[j-1][i-1] 2* fv[j-1][i]));
45 }
46   fu[j][0] = fu[j][1];
47   fv[j][0] = fv[j][1];
48   fv[j][Nx] = fv[j][Nx-1];
49   fu[j][Nx] = fu[j][Nx-1];
50 }
51
52 FILE* fp ;
53 fp = fopen("brus.dat", "w");
54 for( int j = 0; j <= Nt; j++){
55   for( int i = 0; i <= Nx; i++){
56     fprintf(fp, "%f %f %f %f \n", j*tau, i*h, fu[j][i], fv[j][i]);
57   }
58 }
59 fclose(fp);
60 return 0;
61 }

```

Приведем результат выполнения программы:

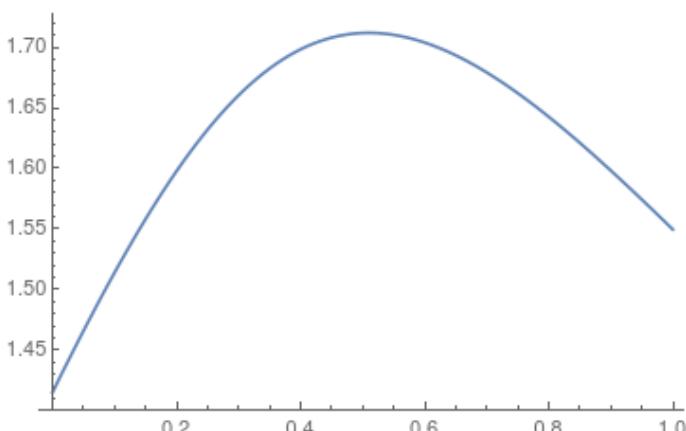


Рис. 11: Явная схема  $u(t)$ ,  $A=1$ ,  $B=1$ ,  $Du = 1$ ,  $Dv = 100$

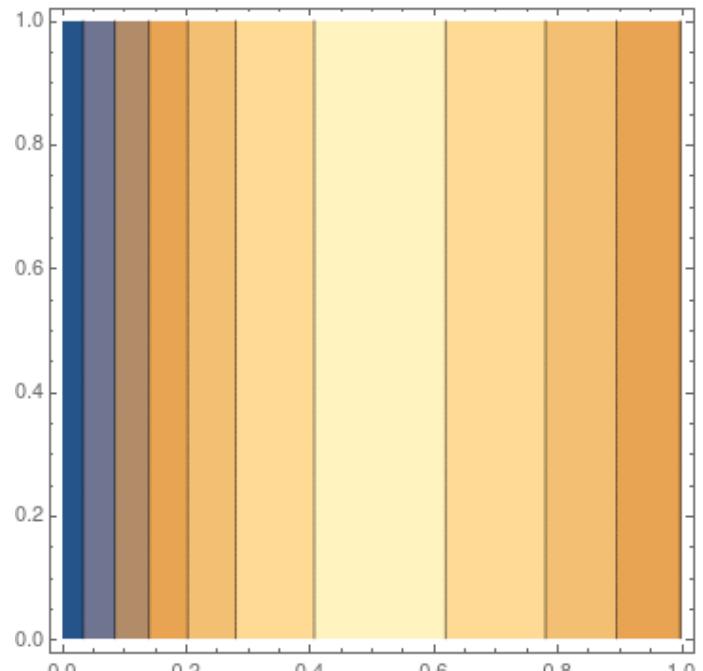


Рис. 12: Явная схема  $u(t,x)$   $A=1$ ,  $B=1$ ,  $Du = 1$ ,  $Dv = 100$

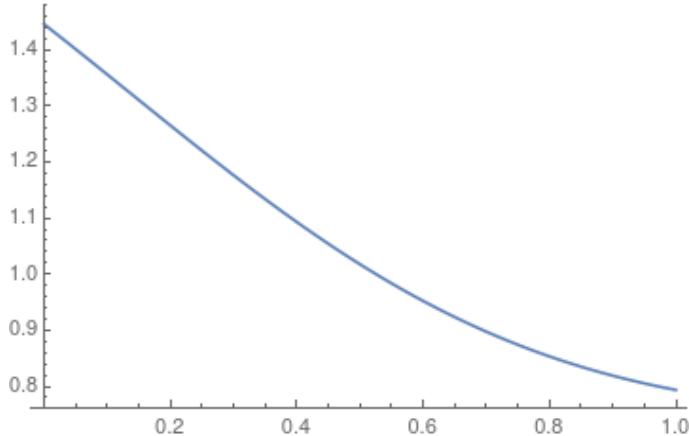


Рис. 13: Явная схема  $v(t)$ ,  $A=1$ ,  $B=1$ ,  $D_u = 1$ ,  $D_v = 100$

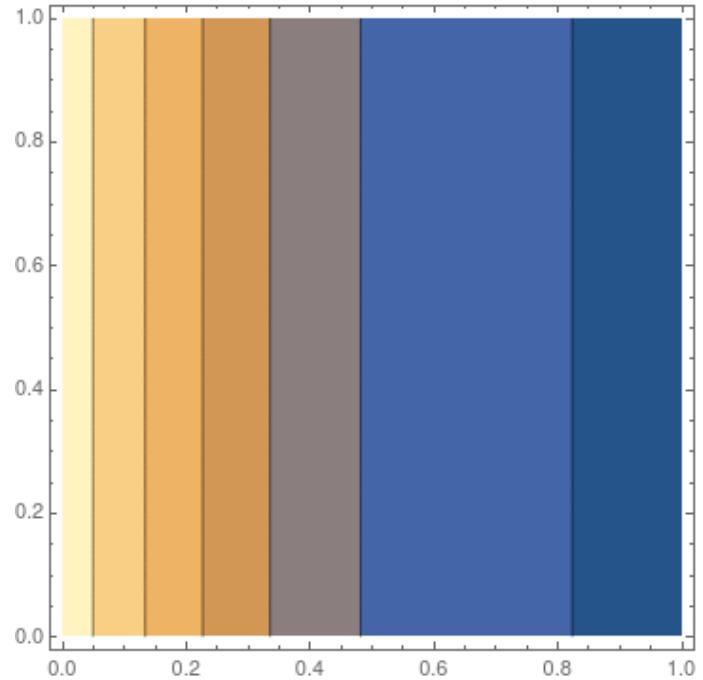


Рис. 14: Явная схема  $v(t,x)$   $A=1$ ,  $B=1$ ,  $D_u = 1$ ,  $D_v = 100$

## 2.2 Подготовительные расчеты

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

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):

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

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 уравнения 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

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

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

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

где

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

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

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

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

### 2.3 Метод Кранка-Николсона

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

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: р - 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  $\tau$  - 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:

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

Так как граничным условием является нулевой поток,  $u_{-1}^{(q)} = u_1^{(q)}$  и уравнение перепишется в виде

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

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

Аналогично для второй границы и второй переменной.

Запишем в виде матрицы:

$$\begin{pmatrix} (1+2r_u) & -2r_u & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -r_u & (1+2r_u) & -r_u & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -r_u & (1+2r_u) & -r_u & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_u & (1+2r_u) & -r_u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2r_u & (1+2r_u) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_0^{q+1} \\ u_1^{q+1} \\ u_2^{q+1} \\ \vdots \\ u_{n-1}^{q+1} \\ u_n^{q+1} \end{pmatrix} = \quad (48)$$

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

Аналогичные выражения можно получить и для  $v$ .

$$\begin{pmatrix} (1+2r_v) & -2r_v & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -r_v & (1+2r_v) & -r_v & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -r_v & (1+2r_v) & -r_v & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_v & (1+2r_v) & -r_v \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2r_v & (1+2r_v) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_0^{q+1} \\ v_1^{q+1} \\ v_2^{q+1} \\ \vdots \\ v_{n-1}^{q+1} \\ v_n^{q+1} \end{pmatrix} = \quad (50)$$

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

Так как обе матрицы имеют диагональное преобладание, то их можно решать методом прогонки.

## 2.4 Границные условия

Первый способ записать граничные условия:

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

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:

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

Отсюда

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

Третий способ записи граничных условий - метод фиктивного узла - реализован в предыдущем пункте.

## 2.5 Исследование устойчивости разностной схемы

### 2.5.1 Признак максимума

Рассмотрим первое уравнение брюсселятора:

$$\frac{u_p^{(q+1)} - u_p^{(q)}}{\tau} = D(u_p^{(q+1)} + u_p^{(q)}) + f_u. \quad (62)$$

Здесь  $D$  - оператор второй производной, равный  $Du_p = \frac{u_{p+1} - 2u_p + u_{p-1}}{2h^2}$ . Так же это уравнение можно записать

$$\sum_{Q \in O(P)} M_h(P, Q)u(Q) = f_u(P). \quad (63)$$

Мы рассматриваем сетку с шагом  $h$  окрестности точки  $P$ . Приведем к каноническому виду:

$$A(p)u(P) = \sum_{Q \in O(P) \setminus P} B(P, Q)u(Q) + f_u(P). \quad (64)$$

В качестве центрального узла шаблона  $P$  выберем точку  $P(x_p, t_{q+1})$ , тогда

$$O(P) \setminus P = \{Q_1(x_p, t_q), Q_2(x_{p-1}, t_q), Q_3(x_{p+1}, t_q), Q_4(x_{p-1}, t_{q+1}), Q_5(x_{p+1}, t_{q+1})\}. \quad (65)$$

Из предыдущих вычислений:

$$(1 + 2r_u)u_p^{q+1} = r_u(u_{p+1}^{q+1} + u_{p-1}^{q+1}) + r_u(u_{p+1}^{(q)} + u_{p-1}^{(q)}) + (1 - 2r_u)u_p^{(q)} + \tau f_u. \quad (66)$$

Тогда коэффициенты канонической формы разностного уравнения будут иметь вид:

$$A(P) = 1 + 2r_u, \quad B(P, Q_1) = (1 - 2r_u), \quad B(P, Q_2) = B(P, Q_3) = B(P, Q_4) = B(P, Q_5) = r_u. \quad (67)$$

Воспользуемся принципом максимума. Для устойчивости разностной схемы достаточно, чтобы  $A(P) > 0$ ,  $B(P, Q_m) \geq 0 \quad \forall m$  и  $D(P) = A(P) - \sum_{Q \in O(P) \setminus P} B(P, Q) \geq 0$ . В нашем случае эти условия выполняются:  $A(P) = 1 + 2r_u > 0$

всегда,  $B(P, Q_1) = (1 - 2r_u) \geq 0$ , если  $r_u < \frac{1}{2}$ ,  $B(P, Q_2) = B(P, Q_3) = B(P, Q_4) = B(P, Q_5) = r_u \geq 0$  всегда и  $D(P) = 1 + 2r_u - (1 - 2r_u) - 4r_u = 0$  всегда. Аналогичные условия можно написать для второго уравнения брюсселятора. Однако это условие является достаточным, но не необходимым. Его отсутствие неизбежно влечет к потери устойчивости.

## 2.5.2 Энергетический критерий устойчивости

Воспользуемся энергетическим критерием устойчивости. Рассмотрим первое уравнение брюсселятора:

$$\frac{u_p^{(q+1)} - u_p^{(q)}}{\tau} = \frac{D_u}{2} \Lambda_{xx}(u_p^{(q+1)} + u_p^{(q)}) + f_u. \quad (68)$$

Здесь  $\Lambda_{xx}$  - оператор второй производной, равный  $\Lambda_{xx}u_p = \frac{u_{p+1}-2u_p+u_{p-1}}{h^2}$ . Приведем к каноническому виду:

$$(E - \frac{D_u \tau}{2} \Lambda_{xx}) \frac{u_p^{(q+1)} - u_p^{(q)}}{\tau} - D_u \Lambda_{xx} u_p^{(q)} = f_u. \quad (69)$$

Необходимым и достаточным условием устойчивости будет  $E - \frac{D_u \tau}{2} \Lambda_{xx} \geq -\frac{\tau D_u}{2} \Lambda_{xx}$  или  $E \geq 0$ , что верно при любых шагах по пространству и времени. Аналогично для второго уравнения брюсселятора. То есть наша схема Кранка-Николсона абсолютно устойчива.

## 2.6 Исследование на устойчивость распределенного случая

Рассмотрим более общий случай:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = P(u, v, x) + D_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} = Q(u, v, x) + D_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \end{cases} \quad (70)$$

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

$$\begin{cases} \frac{\partial \xi}{\partial t} = a\xi + b\eta + D_u \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} = c\xi + d\eta + D_v \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (71)$$

где

$$a = \frac{\partial P}{\partial u}, \quad b = \frac{\partial P}{\partial v}, \quad c = \frac{\partial Q}{\partial u}, \quad d = \frac{\partial Q}{\partial v}. \quad (72)$$

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:

$$\begin{cases} \bar{A}p = a\bar{A} + b\bar{B} - D_u k^2 \bar{A}, \\ \bar{B}p = c\bar{A} + d\bar{B} - D_v k^2 \bar{B}. \end{cases} \quad (73)$$

$\bar{A}$  и  $\bar{B}$  не равны нулю, если

$$(p - a + k^2 D_u)(p - d + k^2 D_v) - bc = 0. \quad (74)$$

$$p^2 + p((D_u + D_v)k^2 - a - d) + (a - k^2 D_u)(d + k^2 D_v) + bc = 0. \quad (75)$$

Решения этого уравнения:

$$p_{1,2} = \frac{a + d - (D_u + D_v)k^2 \pm \sqrt{(a + d - k^2(D_u + D_v))^2 - 4(a - k^2 D_u)(d + k^2 D_v) - 4bc}}{2}. \quad (76)$$

Или, вводя обозначения  $\Delta = (D_u + D_v)k^2 - a - d$ ,  $\Sigma = (a - k^2 D_u)(d + k^2 D_v) + bc$ ,

$$p^2 + \Delta p + \Sigma = 0. \quad (77)$$

$$p_{1,2} = \frac{-\Delta \pm \sqrt{\Delta^2 - 4\Sigma}}{2}. \quad (78)$$

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

В нашем случае

$$a = \frac{\partial P}{\partial u} = B - 1, \quad b = \frac{\partial P}{\partial v} = A^2, \quad c = \frac{\partial Q}{\partial u} = -B, \quad d = \frac{\partial Q}{\partial v} = -A^2. \quad (79)$$

и дисперсионное уравнение имеет вид:

$$(p - B + 1 + k^2 D_u)(p + A^2 + k^2 D_v) + BA^2 = 0. \quad (80)$$

$$p_{1,2} = \frac{B - 1 - A^2 - (D_u + D_v)k^2 \pm \sqrt{(B - 1 - A^2 - k^2(D_u + D_v))^2 - 4A^2B + 4(B - 1 - k^2D_u)(A^2 + k^2D_v)}}{2}. \quad (81)$$

Построим график  $p_{1,2}(k)$ :

```

Assuming[{k \[Element] Reals, k > 0},
Block[{B = 3, A = 1, Du = 1, Dv = 100},
p1[k_] := 0.5*(B - 1 - A^2 - (Du + Dv) k^2 + Sqrt[(B - 1 - A^2 - (Du + Dv) k^2)^2 - 4 A^2 B + 4 (B - 1 - k^2 D_u) (A^2 + k^2 D_v)]];
p2[k_] := 0.5*(B - 1 - A^2 - (Du + Dv) k^2 - Sqrt[(B - 1 - A^2 - (Du + Dv) k^2)^2 - 4 A^2 B + 4 (B - 1 - k^2 D_u) (A^2 + k^2 D_v)]);
realp1[k_] := Re@p1[k];
realp2[k_] := Re@p2[k];
Show[Plot[{realp1[k], realp2[k]}, {k, 0, 2}, PlotRange > {{0, 2}, {2, 2}}]]
]

```

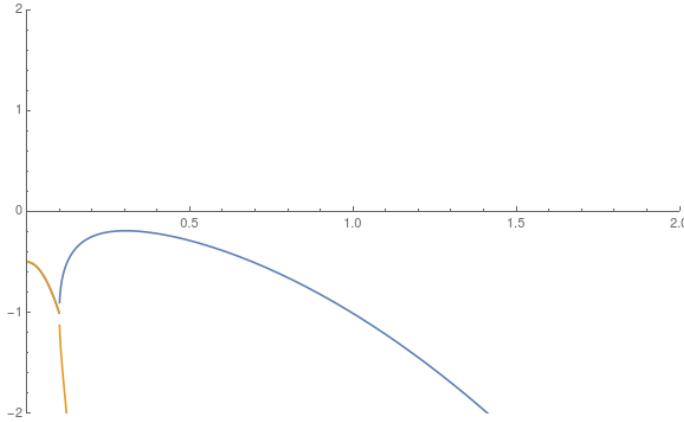


Рис. 15: Дисперсионная кривая  $A=1$ ,  $B=1$ ,  $D_u = 1$ ,  $D_v = 100$

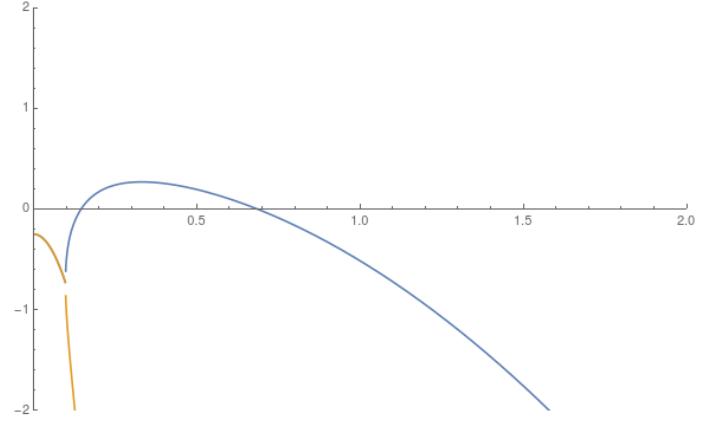


Рис. 16: Дисперсионная кривая  $A=1$ ,  $B=1.5$ ,  $D_u = 1$ ,  $D_v = 100$

## 2.7 Неустойчивость Тьюринга

Определим условия возникновения диффузионной неустойчивости (обусловленной только процессами диффузии). Это означает, что однородное стационарное состояние будет устойчивым по отношению к малым однородным возмущениям (соответствующая точечная система устойчива) и не устойчива по отношению к малым пространственно неоднородным возмущениям.

В нераспределенном случае дисперсионное уравнение 7 выглядит так:

$$\lambda^2 + \delta\lambda + \sigma = 0, \quad (82)$$

где  $\delta = -a - d$  и  $\sigma = ad - bc$ . Решение устойчиво, если  $\delta > 0$  и  $\sigma > 0$ .

Распределенный случай 83:

$$p^2 + \Delta p + \Sigma = 0, \quad (83)$$

где  $\Delta = (D_u + D_v)k^2 - a - d$ ,  $\Sigma = k^4 D_u D_v - k^2(aD_v + dD_u) + ad - bc$ . Решение неустойчиво, если либо  $\Delta < 0$ , либо  $\Sigma < 0$ . Так как  $\delta > 0$ , то  $\Delta = (D_u + D_v)k^2 + \delta$  так же будет больше нуля. Значит, для наблюдения неустойчивости, необходимо, чтобы  $\Sigma < 0$ .

Таким образом для возникновения неустойчивости Тьюринга необходимо, чтобы

$$\begin{cases} a + d < 0, \\ ad - bc > 0, \\ k^4 D_u D_v - k^2(aD_v + dD_u) + ad - bc < 0. \end{cases} \quad (84)$$

В случае брюсселятора

$$\begin{cases} B - 1 - A^2 < 0, \\ A^2 > 0, \\ k^4 D_u D_v - k^2(aD_v + dD_u) + A^2 < 0. \end{cases} \quad (85)$$

Рассмотрим третье условие. Так как  $k^4 D_u D_v$  и  $ad - bc$  больше нуля, то  $\Sigma$  может стать меньше нуля только засчет  $-k^2(aD_v + dD_u)$ . То есть для неустойчивости необходимо, чтобы  $aD_v + dD_u > 0$ . Получили систему:

$$\begin{cases} a + d < 0, \\ aD_v + dD_u > 0. \end{cases} \quad (86)$$

Чтобы она выполнялась, необходимо, чтобы  $a$  и  $d$  были разных знаков. В случае брюсселятора  $d = -A^2 < 0$ , то есть  $a = B - 1 > 0$ . То есть  $B > 1$ .

Чтобы было  $a + d < 0$ , нужно, чтобы  $|a| < |d|$ . Иными словами  $\frac{B-1}{A^2} < 1$ .

$$aD_v + dD_u > 0 \quad (87)$$

$$D_u(a\frac{D_v}{D_u} + d) > 0 \quad (88)$$

Другими словами необходимо, чтобы  $\frac{D_v}{D_u} > 1$ ,  $D_v > D_u$ . Разница коэффициентов диффузии является необходимым условием наличия неустойчивости Тьюринга.

Теперь проанализируем  $f(k^2) = k^4 D_u D_v - k^2(aD_v + dD_u) + ad - bc$ . Дискриминант  $D = (aD_v + dD_u)^2 - 4D_u D_v + \sigma$ . Чтобы парабола  $f(k^2)$  пересекала ось абсцисс, нужно, чтобы  $D \geq 0$ . Критическое состояние  $D = 0$ , решим его относительно  $D_{cr} = \frac{D_v}{D_u}$ :

$$(aD_v + dD_u)^2 - 4D_u D_v + \sigma = 0, \quad (89)$$

$$(aD_{cr} + d)^2 - 4D_{cr}\sigma = 0, \quad (90)$$

$$a^2 D_{cr}^2 + 2(da - 2\sigma)D_{cr} + d^2 = 0. \quad (91)$$

Его решения:

$$D_{cr1,2} = \frac{2\sigma - ad \pm 2\sqrt{\sigma}\sqrt{\sigma - ad}}{a^2}. \quad (92)$$

Так как отношение концентраций должно быть числом положительным, то подходит только корень с плюсом. Делаем вывод, что для наблюдения диффузной неустойчивости необходимо, чтобы

- $a + d < 0$ ,  $a > 0, d < 0$
- $ad - bc > 0$
- $\frac{D_v}{D_u} > \frac{2\sigma - ad + 2\sqrt{\sigma}\sqrt{\sigma - ad}}{a^2}$

При этом

$$k_{cr}^2 = \frac{aD_{cr} + d}{2D_u D_{cr}}. \quad (93)$$

А число диссипативных структур будет равно  $[\frac{k_{cr}}{2\pi}]$ .

В случае брюсселятора:

$$D_{cr} = \frac{A^2}{(\sqrt{B} - 1)^2}, \quad k_{cr}^2 = \frac{\sqrt{B} - 1}{D_u}, \quad n = \frac{k_{cr}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sqrt{B} - 1}{D_u}} \quad (94)$$

## 2.8 Реализация на С

Напишем программу, подсчитывающую значения концентраций, используя метод разделения по физическим процессам. Разностную схему приблизим шеститочечной схемой Кранка-Николсона.

Опишем алгоритм подбора параметров пространственно-временной сетки:

1. Зафиксируем параметры брюсселятора: коэффициенты  $A, B, D_u$  и  $D_v$ .
2. Строим график зависимости  $Re(p_{1,2}(k))$  для данных параметров.
3. Находим  $k_{min}$  и  $k_{max}$ , соответствующие смене знака реальной части  $p_{1,2}$  и, соответственно, наступлению зоны седловой неустойчивости.
4.  $\lambda_{min} = \frac{2\pi}{k_{max}}, \lambda_{max} = \frac{2\pi}{k_{min}}$  - границы интерала длин волн, которые будут неустойчивы.
5.  $\lambda_{max}$  должна войти в пространственную область несколько раз, поэтому  $b \approx 5\lambda_{max}$ .
6. В волну должно укладываться несколько шагов сетки, тогда  $h \approx \frac{\lambda_{min}}{10}$ .
7. Всего шагов по пространству будет  $\frac{b}{h} \approx 50 \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}} \approx 100$ .
8. Исходя из  $h$  подберем шаг временной сетки так, чтобы  $\frac{D_v \tau}{h^2} < \frac{1}{2}$ , то есть  $\tau < \frac{h^2}{2D_v}$ .

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <string.h>
4
5 #define PREF "brus"
6 #define SUFF ".dat"
7
8 const float A = 1;
9 const float B = 1.5;
10 const float Du = 1;
11 const float Dv = 100;
12
13 float F1( float u, float v)
14 {
15     return (A + u*u*v * (B+1)*u);
16 }
17
18 float F2( float u, float v)
19 {
20     return ( u*u*v + B*u );
21 }
22
23
24 float runge_kutt( float h, float u, float v, int f)
25 {
26     float k11 = 0, k12 = 0, k13 = 0, k14 = 0;
27     float k21 = 0, k22 = 0, k23 = 0, k24 = 0;
28     k11 = h*F1(u, v);
29     k21 = h*F2(u, v);
30     k12 = h*F1(u + k11/2, v + k21/2);
31     k22 = h*F2(u + k11/2, v + k21/2);
32     k13 = h*F1(u + k12/2, v + k22/2);
33     k23 = h*F2(u + k12/2, v + k22/2);
34     k14 = h*F1(u + k13/2, v + k23/2);
35     k24 = h*F2(u + k13/2, v + k23/2);
36     u = u + (k11 + 2*k12 + 2*k13 + k14)/6;
37     v = v + (k21 + 2*k22 + 2*k23 + k24)/6;
38
39     if(f==1) return u;
40     if(f==2) return v;
41 }
42
43 void solve_tridiagonal( float * x, int X, float * a, float * b, float * c, float* d) {

```

```

44 /*
45 solves Ax = d where A is a tridiagonal matrix consisting of vectors a, b, c
46 x contains the input vector x indexed from 0 to X - 1 inclusive
47 X number of equations (length of vector x)
48 a subdiagonal (means it is the diagonal below the main diagonal), indexed from 1 to X - 1
49 inclusive
50 b the main diagonal, indexed from 0 to X - 1 inclusive
51 c superdiagonal (means it is the diagonal above the main diagonal), indexed from 0 to X - 2
52 inclusive
53 d right part of equation, indexed from 0 to X - 1
54 */
55
56 float q[X];
57 float p[X];
58
59 p[0] = c[0] / b[0];
60 q[0] = d[0] / b[0];
61
62 for (int ix = 1; ix <= X; ix++) {
63     float m = 1.0 / (b[ix - 1] - a[ix - 1] * p[ix - 1]);
64     p[ix] = c[ix - 1] * m;
65     q[ix] = (d[ix - 1] + a[ix - 1] * q[ix - 1]) * m;
66 }
67 x[X - 1] = q[X];
68
69 for (int ix = X - 2; ix >= 0; ix)
70     x[ix] = q[ix + 1] + p[ix + 1] * x[ix + 1];
71 }
72
73 int main() {
74     float a = 0;
75     float b = 230;
76     float T = 1000;
77     float t0 = 0;
78     float h = 0.9;
79     float tau = 0.001;
80     int Nx = (b - a) / h;
81     int Nt = (T - t0) / tau;
82     int count = 0;
83
84     float ru = Du*tau/2/h/h;
85     float rv = Dv*tau/2/h/h;
86
87     float au[Nx+1]; float bu[Nx+1]; float cu[Nx+1];
88     float av[Nx+1]; float bv[Nx+1]; float cv[Nx+1];
89     au[0] = 0.; av[0] = 0.;
90     au[Nx] = 2*ru;
91     av[Nx] = 2*rv;
92
93     for (int i=1; i<Nx; i++){
94         av[i] = rv;
95         au[i] = ru;
96     }
97     for (int i=0; i<=Nx; i++){
98         bu[i] = 1+2*ru;
99         bv[i] = 1+2*rv;
100    }
101
102    cu[Nx] = 0.;
103    cv[Nx] = 0.;
104    cu[0] = 2*ru;
105    cv[0] = 2*rv;
106    for (int i=1; i<Nx; i++){
107        cv[i] = rv;
108        cu[i] = ru;
109    }

```

```

111 float fu [ 2 ][ Nx+1];
112 float fv [ 2 ][ Nx+1];
113
114 for( int j = 0; j < 2; j++){
115     for( int i = 0; i <= Nx; i++){
116         fu [ j ][ i ] = 0. ;
117         fv [ j ][ i ] = 0. ;
118     }
119 }
120     float noiseu = 0.005*(rand()%100);
121     float noisev = 0.005*(rand()%100);
122 for( int i = 0; i <= Nx; i++){
123     fv [ 0 ][ i ] = B/A + noisev;
124     fu [ 0 ][ i ] = A + noiseu;
125 }
126
127 float urightpart [Nx+1];
128 float vrightpart [Nx+1];
129 float u[Nx+1];
130 float v[Nx+1];
131
132 for( int i = 0; i <= Nx; i++){
133     v[ i ] = 0;
134     u[ i ] = 0;
135 }
136 int number_of_files = Nt+1;
137
138
139 char buf[BUFSIZ];
140 FILE* fp ;
141
142 while( count*tau<T){
143
144     for( int i = 0; i<=Nx; i++){
145         fu [ 1 ][ i ] = runge_kutt(tau , fu [ 0 ][ i ] , fv [ 0 ][ i ] , 1);
146         fv [ 1 ][ i ] = runge_kutt(tau , fu [ 0 ][ i ] , fv [ 0 ][ i ] , 2);
147     }
148
149     urightpart [ 0 ] = fu [ 1 ][ 0 ] + 2*ru*(fu [ 0 ][ 1 ] - fu [ 0 ][ 0 ]) ;
150     vrightpart [ 0 ] = fv [ 1 ][ 0 ] + 2*rv*(fv [ 0 ][ 1 ] - fv [ 0 ][ 0 ]) ;
151     urightpart [ Nx ] = fu [ 1 ][ Nx ] + 2*ru*(fu [ 0 ][ Nx-1 ] - fu [ 0 ][ Nx ]) ;
152     vrightpart [ Nx ] = fv [ 1 ][ Nx ] + 2*rv*(fv [ 0 ][ Nx-1 ] - fv [ 0 ][ Nx ]) ;
153
154     for( int i = 1; i < Nx; i++){
155         urightpart [ i ] = fu [ 1 ][ i ]+ru*(fu [ 0 ][ i+1 ] - 2*fu [ 0 ][ i ] + fu [ 0 ][ i-1 ]) ;
156         vrightpart [ i ] = fv [ 1 ][ i ]+rv*(fv [ 0 ][ i+1 ] - 2*fv [ 0 ][ i ] + fv [ 0 ][ i-1 ]) ;
157     }
158
159 solve_tridiagonal(u, Nx+1, au, bu, cu, urightpart);
160 solve_tridiagonal(v, Nx+1, av, bv, cv, vrightpart);
161 for( int i = 0; i < Nx+1; i++){
162     fu [ 1 ][ i ] = u[ i ];
163     fv [ 1 ][ i ] = v[ i ];
164 }
165 count++;
166
167     sprintf(buf, "%s%d%s", PREF, (count-1), SUFF);
168 if(count%1000==0){
169     fp = fopen(buf, "w");
170     for( int i = 0; i <= Nx; i++){
171         fprintf(fp, "%f %f %f %f \n", (count-1)*tau, i*h, fu [ 1 ][ i ], fv [ 1 ][ i ]);
172     }
173     fclose(fp);
174 }
175     for( int i = 0; i <= Nx; i++){
176         fu [ 0 ][ i ] = fu [ 1 ][ i ];
177         fv [ 0 ][ i ] = fv [ 1 ][ i ];
178     }
179 }
```

```

180 for( int i= 0; i <BUFSIZ; i++){
181     buf[ i ] = 0;
182 }
183 }
184
185 return 0;
186 }
```

Результатом исполнения кода является пакет данных, на каждый временной помежуток свой файл. Далее в gnuplot строятся графики зависимостей концентраций от координаты и объединяются в gif файл.

Приведем исполняемый скрипт:

```

set term gif animate
set output "animate.gif"
set yr [0.0:8.0]
do for [t=999:999999:1000] {
    outfile = sprintf('data%d.png', t)
    infile = sprintf('brus%d.dat', t)
    plot infile u 2:3 w l lt rgb "#0480ad", infile u 2:4 w l lt rgb "#7c00ad"
}
set output
```

Приведем примеры слайдов:

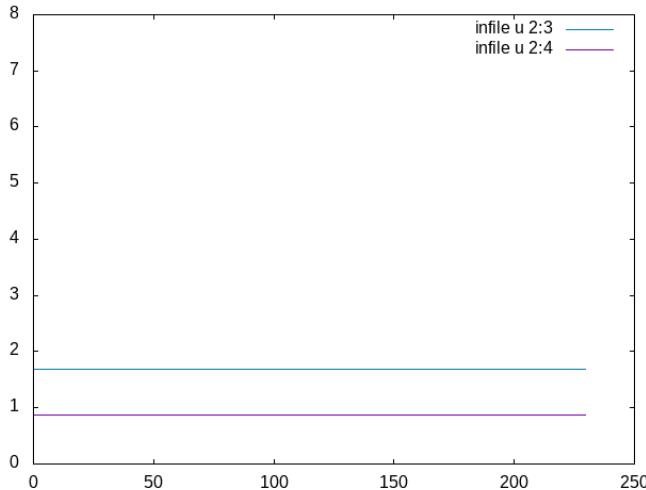


Рис. 17:  $A = 1$ ,  $B=1.5$ ,  $D_u = 1$ ,  $D_v = 100$ ,  $T=999$ , график зависимости концентраций от  $x$

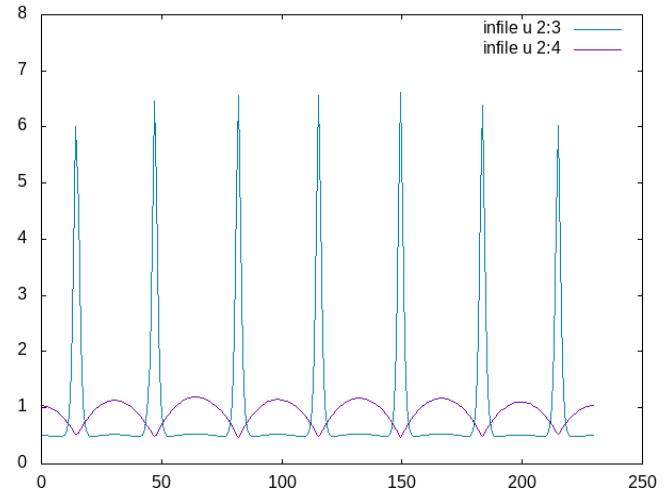


Рис. 18:  $A = 1$ ,  $B=1.5$ ,  $D_u = 1$ ,  $D_v = 100$ ,  $T=999999$ , график зависимости концентраций от  $x$

Также можно построить 3D графики зависимости концентраций от  $x, t$ :

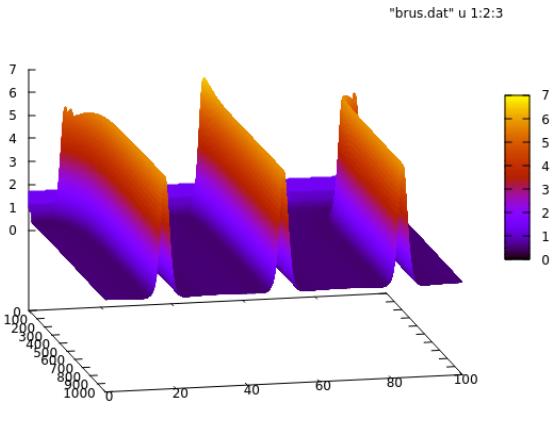


Рис. 19: A =1, B=1.5, Du = 1, Dv = 100,  $u(t, x)$

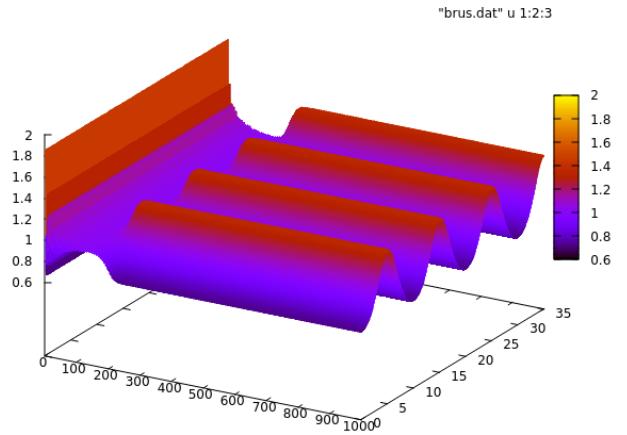


Рис. 20: A =1, B=1.9, Du = 1, Dv = 7,  $u(t, x)$

## 2.9 Анализ распределенного случая на Wolfram

```

noisefunc[const_, nperturb_: 10, noisefract_: 0.1] :=Module[{ipoints, ridx}, ipoints =
  Table[{xi, const}, {xi, 0.0, 1.0, 0.01}];
  ridx = Table[RandomInteger[{10, 90}], {nperturb}];
  Do[ipoints[[ridx[[ri]]]][[2]] += noisefract*RandomReal[{1, 1}], {ri, nperturb}];
  Return[Interpolation[ipoints, Method -> "Spline"]]];
  
nfu = noisefunc[1.0];
nfv = noisefunc[1.0];

soluv = NDSolve[{D[u[x, t], t] == Du *Derivative[2, 0][u][x, t] + a (b + 1) u[x, t] +
  v[x, t] (u[x, t])^2,
  D[v[x, t], t] == Dv *Derivative[2, 0][v][x, t] + b u[x, t] - v[x, t] (u[x, t])^2,
  u[x, 0] == nfu[x],
  v[x, 0] == nfv[x],
  Derivative[1, 0][u][0, t] == 0,
  Derivative[1, 0][u][L, t] == 0,
  Derivative[1, 0][v][0, t] == 0,
  Derivative[1, 0][v][L, t] == 0} /. {L > 50, Du > 1, Dv > 100, a > 1, b > 1}, {
  u, v}, {x, 0, 50}, {t, 0, 0.05 4000}, MaxSteps -> {15, Infinity}]

```

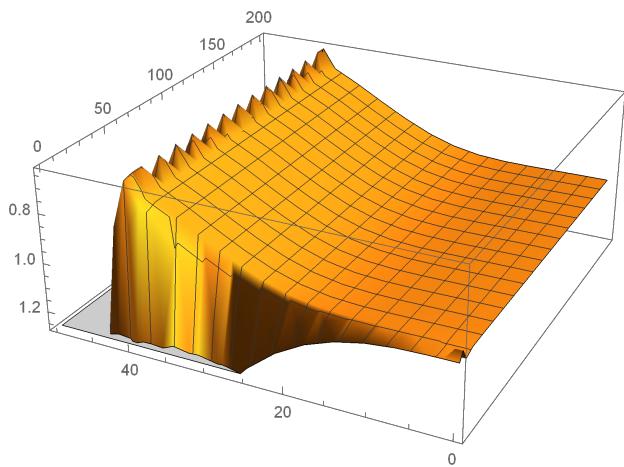


Рис. 21:  $u(x,t)$   $A = B=1$ ,  $Du = 1$ ,  $Dv = 100$

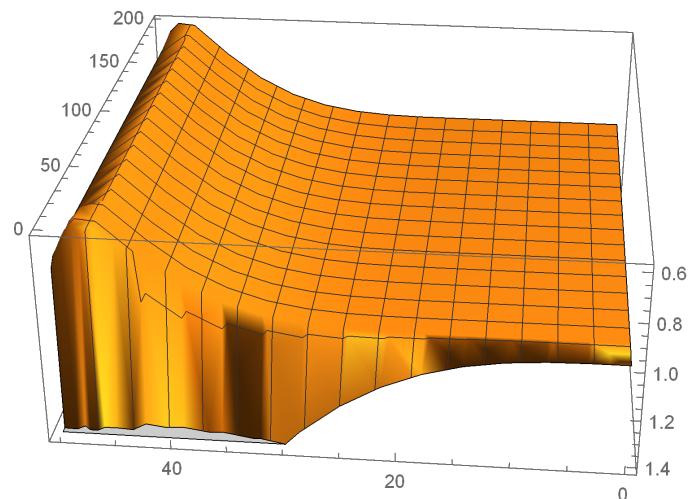


Рис. 22:  $v(x,t)$   $A = B=1$ ,  $Du = 1$ ,  $Dv = 100$

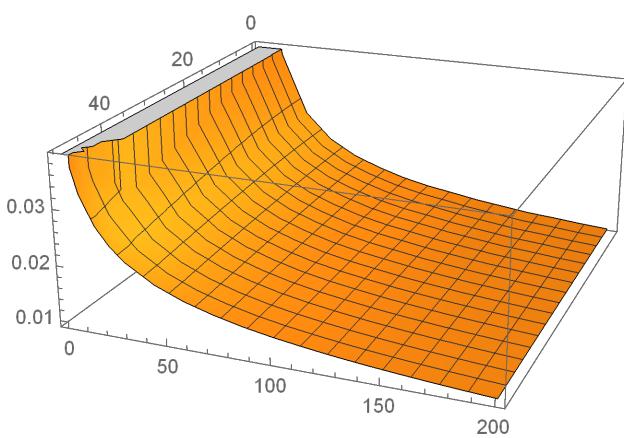


Рис. 23:  $u(t)$   $A =1$ ,  $B=1.5$ ,  $Du = 1$ ,  $Dv = 100$

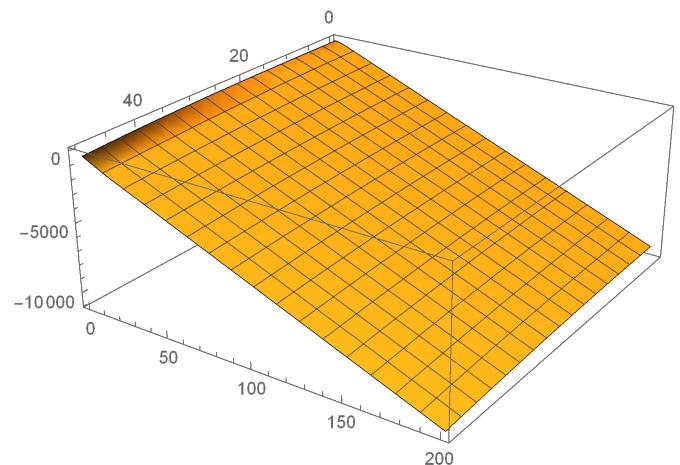


Рис. 24:  $u(t)$   $A =1$ ,  $B=1.5$ ,  $Du = 1$ ,  $Dv = 100$