

Курсовая работа по курсу "Математическое моделирование и вычислительный эксперимент"

Тояков Артем М8О-407Б-18

Вариант

gamma = 9/7

alpha = 0.05

n = 8

M = 2

rho3 = 10

Параметры разбиения

Nx, Ny = 20, 40

Nt = 30

T = 0.075

В какие три момента времени строить графики

plot_time1, plot_time2, plot_time3 = 1, 9, 29

Смоделируем развитие гидродинамической неустойчивости с помощью численных методов. Модель описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \left(\rho \left(\varepsilon + \frac{u^2 + v^2}{2} \right) \right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\rho \left(\varepsilon + \frac{u^2 + v^2}{2} \right) + p \right) u \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\rho \left(\varepsilon + \frac{u^2 + v^2}{2} \right) + p \right) v \right) = 0. \end{array} \right.$$

Задача решается на прямоугольнике $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 2$.

Краевые условия заданы следующим образом:

- На левой, правой и нижней границе задан нулевой поток,
- На верхней границе задан равномерный поток.

Начальные условия заданы следующим образом: прямоугольник разбивается на три области

- Первая область: $y > 1.5$,

- Вторая область: $\alpha \cos(n\pi x) + 0.7 < y < 1.5$,
- Третья область: $y < \alpha \cos(n\pi x) + 0.7$.

$y=1.5$ - ударная волна. Число Маха M данной волны задано. $\alpha \cos(n\pi x) + 0.7$ - контактный разрыв.

α и n - заданные параметры. В каждой области гидродинамические величины константны и равны $\rho_1, u_1, v_1, \varepsilon_1, \rho_2, u_2, v_2, \varepsilon_2, \rho_3, u_3, v_3, \varepsilon_3$. Величины u_1, u_2, u_3, v_2, v_3 равны нулю, величины ρ_2, ε_2 равны единице, ρ_3 задана. Значение ε_3 можно выразить из условия равенства давления.

$$p_2 = p_3$$

$$(\gamma - 1) \rho_2 \varepsilon_2 = (\gamma - 1) \rho_3 \varepsilon_3$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\rho_2 \varepsilon_2}{\rho_3}$$

Значения $\rho_1, u_1, v_1, \varepsilon_1$ выражаются из соотношений Гюгонио.

$$\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2 = D(\rho_1 - \rho_2),$$

$$\rho_1 v_1^2 + p_1 - \rho_2 v_2^2 - p_2 = D(\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2),$$

$$v_1 \left(\rho_1 \varepsilon_1 + \rho_1 \frac{v_1^2}{2} + p_1 \right) - v_2 \left(\rho_2 \varepsilon_2 + \rho_2 \frac{v_2^2}{2} + p_2 \right) = D \left(\rho_1 \varepsilon_1 + \rho_1 \frac{v_1^2}{2} - \rho_2 \varepsilon_2 - \rho_2 \frac{v_2^2}{2} \right)$$

Скорость движения ударной волны равна $D = c_2 M$, $c_2 = \sqrt{\gamma(\gamma - 1) \varepsilon_2}$.

Если подставить $v_2 = 0$ в соотношения, то они значительно упрощаются:

$$\rho_1 v_1 = D(\rho_1 - \rho_2),$$

$$\rho_1 v_1^2 + p_1 - p_2 = D \rho_1 v_1,$$

$$v_1 \left(\rho_1 \varepsilon_1 + \rho_1 \frac{v_1^2}{2} + p_1 \right) = D \left(\rho_1 \varepsilon_1 + \rho_1 \frac{v_1^2}{2} - \rho_2 \varepsilon_2 \right)$$

Выразим $\rho_1, v_1, \varepsilon_1$ из данных соотношений. Выразим ρ_1 через v_1 :

$$\rho_1 v_1 = D(\rho_1 - \rho_2)$$

$$\rho_1 v_1 = D \rho_1 - D \rho_2$$

$$D \rho_2 = D \rho_1 - v_1 \rho_1$$

$$(D - v_1) \rho_1 = D \rho_2$$

$$\rho_1 = \frac{D \rho_2}{D - v_1}$$

Выразим ε_1 через v_1 :

$$\begin{aligned}\rho_1 v_1^2 + p_1 - p_2 &= D \rho_1 v_1 \\ \rho_1 v_1^2 + (\gamma - 1) \rho_1 \varepsilon_1 - (\gamma - 1) \rho_2 \varepsilon_2 &= D \rho_1 v_1 \\ (\gamma - 1) \rho_1 \varepsilon_1 &= D \rho_1 v_1 - \rho_1 v_1^2 + (\gamma - 1) \rho_2 \varepsilon_2 \\ (\gamma - 1) \rho_1 \varepsilon_1 &= (D - v_1) \rho_1 v_1 + (\gamma - 1) \rho_2 \varepsilon_2\end{aligned}$$

Подставим выражение ρ_1 :

$$\begin{aligned}\frac{(\gamma - 1) D \rho_2}{D - v_1} \varepsilon_1 &= D \rho_2 v_1 + (\gamma - 1) \rho_2 \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma - 1}{D - v_1} \varepsilon_1 &= v_1 + \frac{\gamma - 1}{D} \varepsilon_2\end{aligned}$$

Переобозначим $B = \frac{\gamma - 1}{D} \varepsilon_2$. Это упростит вычисления в дальнейшем.

$$\begin{aligned}\frac{\gamma - 1}{D - v_1} \varepsilon_1 &= v_1 + B \\ \varepsilon_1 &= \frac{(D - v_1)(v_1 + B)}{\gamma - 1}\end{aligned}$$

Найдём значение v_1 из третьего соотношения:

$$\begin{aligned}v_1 \left(\rho_1 \varepsilon_1 + \rho_1 \frac{v_1^2}{2} + p_1 \right) &= D \left(\rho_1 \varepsilon_1 + \rho_1 \frac{v_1^2}{2} - \rho_2 \varepsilon_2 \right) \\ v_1 \left(\rho_1 \varepsilon_1 + \rho_1 \frac{v_1^2}{2} + (\gamma - 1) \rho_1 \varepsilon_1 \right) &= D \left(\rho_1 \varepsilon_1 + \rho_1 \frac{v_1^2}{2} - \rho_2 \varepsilon_2 \right) \\ v_1 \left(\rho_1 \frac{v_1^2}{2} + \gamma \rho_1 \varepsilon_1 \right) &= D \left(\rho_1 \varepsilon_1 + \rho_1 \frac{v_1^2}{2} - \rho_2 \varepsilon_2 \right)\end{aligned}$$

Подставим ρ_1 и ε_1 :

$$\rho_1 \varepsilon_1 = \frac{D \rho_2}{D - v_1} \frac{(D - v_1)(v_1 + B)}{\gamma - 1} = \frac{D \rho_2 (v_1 + B)}{\gamma - 1}$$

$$\begin{aligned}
v_1 \left(\frac{D \rho_2 v_1^2}{2(D-v_1)} + \frac{\gamma D \rho_2 (v_1+B)}{\gamma-1} \right) &= D \left(\frac{D \rho_2 (v_1+B)}{\gamma-1} + \frac{D \rho_2 v_1^2}{2(D-v_1)} - \rho_2 \varepsilon_2 \right) \\
\frac{D \rho_2 v_1^3}{2(D-v_1)} + \frac{\gamma D v_1 \rho_2 (v_1+B)}{\gamma-1} &= \frac{D^2 \rho_2 (v_1+B)}{\gamma-1} + \frac{D^2 \rho_2 v_1^2}{2(D-v_1)} - D \rho_2 \varepsilon_2 \\
\frac{\gamma D \rho_2 v_1^2}{\gamma-1} + \frac{\gamma B D \rho_2 v_1}{\gamma-1} + D \rho_2 \varepsilon_2 &= \frac{D^2 \rho_2 v_1}{\gamma-1} + \frac{\frac{(\gamma-1) \varepsilon_2}{D} D^2 \rho_2}{\gamma-1} + D \frac{D \rho_2 v_1^2}{2(D-v_1)} - v_1 \frac{D \rho_2 v_1^2}{2(D-v_1)} \\
\frac{\gamma D \rho_2 v_1^2}{\gamma-1} + \frac{\gamma \frac{(\gamma-1) \varepsilon_2}{D} D \rho_2 v_1}{\gamma-1} - \frac{D^2 \rho_2 v_1}{\gamma-1} + D \rho_2 \varepsilon_2 &= D \rho_2 \varepsilon_2 + \frac{D(D-v_1) \rho_2 v_1^2}{2(D-v_1)} \\
\frac{\gamma D \rho_2 v_1^2}{\gamma-1} + \gamma \rho_2 \varepsilon_2 v_1 - \frac{D^2 \rho_2 v_1}{\gamma-1} &= \frac{D \rho_2 v_1^2}{2} \\
\left(\left(\frac{\gamma D}{\gamma-1} - \frac{D}{2} \right) v_1 + \gamma \varepsilon_2 - \frac{D^2}{\gamma-1} \right) v_1 &= 0
\end{aligned}$$

Если $v_1=0$, то $\rho_1 = \frac{D \rho_2}{D-v_1} = \rho_2$. Для устойчивости ударной волны необходимо $\rho_1 > \rho_2$, потому данное решение не подходит. Следовательно, $v_1 \neq 0$.

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\gamma D}{\gamma-1} - \frac{D}{2} \right) v_1 + \gamma \varepsilon_2 - \frac{D^2}{\gamma-1} &= 0 \\
\left(\frac{\gamma D}{\gamma-1} - \frac{D}{2} \right) v_1 &= \frac{D^2}{\gamma-1} - \gamma \varepsilon_2 \\
\left(\gamma D - \frac{D(\gamma-1)}{2} \right) v_1 &= D^2 - \gamma(\gamma-1) \varepsilon_2 \\
(2\gamma D - \gamma D + D) v_1 &= 2D^2 - 2\gamma(\gamma-1) \varepsilon_2 \\
D(\gamma+1) v_1 &= 2D^2 - 2\gamma(\gamma-1) \varepsilon_2 \\
v_1 &= \frac{2(D^2 - \gamma(\gamma-1) \varepsilon_2)}{D(\gamma+1)}
\end{aligned}$$

Проверим условие $\rho_1 > \rho_2$:

$$\frac{D \rho_2}{D-v_1} > \rho_2$$

$$\frac{D}{D-v_1} > 1$$

Чтобы дробь была положительной, необходимо $v_1 < D$.

$$D > D - v_1$$

$$0 > -v_1$$

$$v_1 > 0$$

Итого, $0 < v_1 < D$. Проверим, что полученное v_1 удовлетворяет данным ограничениям.

$$\frac{2(D^2 - \gamma(\gamma-1)\varepsilon_2)}{D(\gamma+1)} < D$$

$$2(D^2 - \gamma(\gamma-1)\varepsilon_2) < D^2(\gamma+1)$$

$$2c_2^2 M^2 - 2\gamma(\gamma-1)\varepsilon_2 < c_2^2 M^2(\gamma+1)$$

$$2\gamma(\gamma-1)\varepsilon_2 M^2 - 2\gamma(\gamma-1)\varepsilon_2 < \gamma(\gamma-1)(\gamma+1)\varepsilon_2 M^2$$

$$2M^2 - 2 < (\gamma+1)M^2$$

$$(\gamma+1)M^2 - 2M^2 > -2$$

$$(\gamma-1)M^2 > -2$$

Показатель адиабаты $\gamma > 1$, потому выражение в левой части положительно. $v_1 < D$ выполняется.

$$\frac{2(D^2 - \gamma(\gamma-1)\varepsilon_2)}{D(\gamma+1)} > 0$$

$$D^2 - \gamma(\gamma-1)\varepsilon_2 > 0$$

$$c_2^2 M^2 - \gamma(\gamma-1)\varepsilon_2 > 0$$

$$\gamma(\gamma-1)\varepsilon_2 M^2 - \gamma(\gamma-1)\varepsilon_2 > 0$$

$$M^2 - 1 > 0$$

$$M^2 > 1$$

Число Маха $M > 1$, потому неравенство выполняется. $v_1 > 0$ выполняется. Значит, найденное значение v_1 удовлетворяет условиям устойчивости. Зная значение v_1 , можно вычислить значения ρ_1 и ε_1 по формулам, выписанным ранее.

Построим сетку на области интегрирования. Сетка выбирается так, чтобы число разбиений по оси Y было кратно десяти. Таким образом, ударная волна проходит по границе сетки. Значения гидродинамических величин в ячейках вычисляются следующим образом:

1) Если ордината центра ячейки больше 1.5, то задаём значения $\rho = \rho_1, u = 0, v = v_1, \varepsilon = \varepsilon_1$.

2) Если ордината центра ячейки меньше 1.5, то вычисляем площадь V_3 под косинусом $a \cos(n\pi x) + 0.7$ внутри ячейки, $V_2 = \Delta x \Delta y$. Так как $u_2 = u_3 = 0$ и $v_2 = v_3 = 0$, то задаём значения скоростей $u = 0, v = 0$. Найдём значения ρ и ε . Из закона сохранения массы получаем:

$$\rho \Delta x \Delta y = \rho_2 V_2 + \rho_3 V_3$$

$$\rho = \frac{\rho_2 V_2 + \rho_3 V_3}{\Delta x \Delta y}$$

Из закона сохранения энергии получаем:

$$\rho \varepsilon \Delta x \Delta y = \rho_2 \varepsilon_2 V_2 + \rho_3 \varepsilon_3 V_3$$

$$\varepsilon = \frac{\rho_2 \varepsilon_2 V_2 + \rho_3 \varepsilon_3 V_3}{\rho \Delta x \Delta y}$$

Вычислим площадь под косинусом $a \cos(wx) + b$ внутри прямоугольника $x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2$. Построим абсциссы $p_0 < p_1 < \dots < p_n$, где $p_0 = x_1, p_n = x_2$, а p_1, p_2, \dots, p_{n-1} - абсциссы точек пересечения косинуса с прямыми $y = y_1$ и $y = y_2$. Внутри каждого отрезка $[p_i, p_{i+1}]$ косинус не пересекает прямые $y = y_1$ и $y = y_2$, что позволяет вычислить площадь под косинусом внутри прямоугольника $p_i \leq x \leq p_{i+1}, y_1 \leq y \leq y_2$ следующим образом:

1) Вычисляем значение косинуса в середине отрезка $\frac{p_i + p_{i+1}}{2}$.

2) Если значение косинуса меньше y_1 , значит косинус целиком проходит под прямоугольником, потому площадь равна 0.

3) Если значение косинуса больше y_2 , значит косинус целиком проходит над прямоугольником, потому площадь равна площади прямоугольника $(p_{i+1} - p_i)(y_2 - y_1)$.

4) Если значение косинуса лежит в пределах от y_1 до y_2 , то косинус проходит внутри прямоугольника, потому площадь считается как интеграл:

$$S = \int_{p_i}^{p_{i+1}} (a \cos(wx) + b - y_1) dx = \frac{a}{w} (\sin(wp_{i+1}) - \sin(wp_i)) + (p_{i+1} - p_i)(b - y_1).$$

Итоговая площадь считается как сумма площадей на каждом отрезке.

Подключим необходимые для вычислений библиотеки:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.colors import LinearSegmentedColormap
import math
```

Напишем функцию, вычисляющую площадь по описанному алгоритму:

```
# площадь под косинусом  $a \cdot \cos(w \cdot x) + b$  внутри прямоугольника  $x_1 \leq x \leq x_2$ ,  $y_1 \leq y \leq y_2$ 
```

```
def cos_area(x1, y1, x2, y2, a, b, w):
    # точки пересечения косинуса с прямой y
    def intersect(y):
        #  $a \cdot \cos(w \cdot x) + b = y$ 
        #  $\cos(w \cdot x) = (y - b) / a$ 
        #  $x = \pm \arccos((y - b) / a) / w + 2 \cdot \pi \cdot n / w$ 
        cx = (y - b) / a
        if abs(cx) >= 1: # нет точек пересечения
            return []

        # найдём точки, лежащие в отрезке  $[x1, x2]$ 
        points = [ (i * math.acos(cx) - 2 * math.pi) / w for i in [ -
1, 1 ] ]
        ret_points = []

        for p in points:
            while p < x2:
                if p > x1:
                    ret_points.append(p)
                p += 2 * math.pi / w

        return ret_points

    # все точки пересечения
    points = [x1, x2] + intersect(y1) + intersect(y2)
    points.sort()

    # считаем площадь
    area = 0

    for i in range(len(points) - 1):
        p1, p2 = points[i], points[i + 1]
        p = 0.5 * (p1 + p2)
        fp = a * math.cos(w * p) + b

        # пустая область
        if fp < y1:
            continue
```

```

# частично заполненная область
elif fp < y2:
    area += a / w * (math.sin(w * p2) - math.sin(w * p1)) +
    (p2 - p1) * (b - y1)
# полностью заполненная область
else:
    area += (p2 - p1) * (y2 - y1)

return area

```

Численное интегрирование будем проводить по следующей схеме:

$$\frac{\partial \varphi_{i,j}}{\partial t} + \frac{F_{i+\frac{1}{2},j}^x - F_{i-\frac{1}{2},j}^x}{\Delta x} + \frac{F_{i,j+\frac{1}{2}}^y - F_{i,j-\frac{1}{2}}^y}{\Delta y} = 0.$$

В схеме первого порядка точности по пространству потоки на границах считаются следующим образом:

$$F_{i+\frac{1}{2},j}^x = \frac{F_{i,j}^x + F_{i+1,j}^x}{2} - c_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{2},$$

$$c_{i+\frac{1}{2},j} = \max \left(c_{i,j} + |u_{i,j}|, c_{i+1,j} + |u_{i+1,j}| \right).$$

В схеме второго порядка точности используются следующие величины:

$$\varphi_{i+\frac{1}{2},j}^- = \varphi_{i,j} + \alpha(R^-) \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{2},$$

$$\varphi_{i+\frac{1}{2},j}^+ = \varphi_{i+1,j} - \alpha(R^+) \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{2},$$

$$R^- = \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}}{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}, R^+ = \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{\varphi_{i+2,j} - \varphi_{i+1,j}},$$

$$\alpha(R) = \begin{cases} 0, & R < 0, \\ R, & 0 \leq R \leq 1, \\ 1, & R > 1. \end{cases}$$

Вместо величин i, j подставляем величины, вычисленные по $\varphi_{i+\frac{1}{2},j}^-$, а вместо $i+1, j$ - вычисленные по $\varphi_{i+\frac{1}{2},j}^+$. Потоки $F_{i-\frac{1}{2},j}^x, F_{i,j+\frac{1}{2}}^y, F_{i,j-\frac{1}{2}}^y$ считаются аналогично.

В схеме первого порядка точности по времени производная аппроксимируется как разность:

$$\frac{\varphi_{i,j}^{n+1} - \varphi_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{F_{i+\frac{1}{2},j}^{x,n} - F_{i-\frac{1}{2},j}^{x,n}}{\Delta x} + \frac{F_{i,j+\frac{1}{2}}^{y,n} - F_{i,j-\frac{1}{2}}^{y,n}}{\Delta y} = 0.$$

В схеме второго порядка $\varphi_{i,j}^{n+1}$ считается следующим образом:

$$\frac{\varphi_{i,j}^{n+0.5} - \varphi_{i,j}^n}{0.5 \Delta t} + \frac{F_{i+\frac{1}{2},j}^{x,n} - F_{i-\frac{1}{2},j}^{x,n}}{\Delta x} + \frac{F_{i,j+\frac{1}{2}}^{y,n} - F_{i,j-\frac{1}{2}}^{y,n}}{\Delta y} = 0,$$

$$\frac{\varphi_{i,j}^{n+1} - \varphi_{i,j}^{n+0.5}}{\Delta t} + \frac{F_{i+\frac{1}{2},j}^{x,n+0.5} - F_{i-\frac{1}{2},j}^{x,n+0.5}}{\Delta x} + \frac{F_{i,j+\frac{1}{2}}^{y,n+0.5} - F_{i,j-\frac{1}{2}}^{y,n+0.5}}{\Delta y} = 0.$$

преобразование в phi и обратно

```
def to_phi(nrho, nu, nv, neps, k, i, j):
    rho, u, v, eps = nrho[k, i, j], nu[k, i, j], nv[k, i, j], neps[k,
i, j]
    return np.array([rho, rho * u, rho * v, rho * (eps + 0.5 * (u * u
+ v * v))])
```

```
def from_phi(phi):
    rho = phi[0]
    u = phi[1] / rho
    v = phi[2] / rho
    eps = phi[3] / rho - 0.5 * (u * u + v * v)
    return rho, u, v, eps
```

потоки

```
def get_Fx(gamma, phi):
    rho, u, v, eps = from_phi(phi)
    P = (gamma - 1) * rho * eps
    E = rho * (eps + 0.5 * (u * u + v * v))
    return np.array([ rho * u, rho * u * u + P, rho * u * v, (E + P) *
u ])
```

```
def get_Fy(gamma, phi):
    rho, u, v, eps = from_phi(phi)
    P = (gamma - 1) * rho * eps
    E = rho * (eps + 0.5 * (u * u + v * v))
    return np.array([ rho * v, rho * u * v, rho * v * v + P, (E + P) *
v ])
```

потоки на границах

```
def get_F_half(phi_m1, phi_p1, phi_m, phi_p, gamma, vert):
    # параметры
    rho_m1, u_m1, v_m1, eps_m1 = from_phi(phi_m1)
    rho_p1, u_p1, v_p1, eps_p1 = from_phi(phi_p1)
    rho_m, u_m, v_m, eps_m = from_phi(phi_m)
    rho_p, u_p, v_p, eps_p = from_phi(phi_p)
```

```

s_m1 = v_m1 if vert else u_m1
s_p1 = v_p1 if vert else u_p1
s_m = v_m if vert else u_m
s_p = v_p if vert else u_p

# скорости звука
c_m1 = math.sqrt(gamma * (gamma - 1) * eps_m1)
c_p1 = math.sqrt(gamma * (gamma - 1) * eps_p1)
c_m = math.sqrt(gamma * (gamma - 1) * eps_m)
c_p = math.sqrt(gamma * (gamma - 1) * eps_p)

c_mh = max(c_m1 + abs(s_m1), c_m + abs(s_m))
c_ph = max(c_p1 + abs(s_p1), c_p + abs(s_p))

# потоки
get_F = get_Fy if vert else get_Fx

F_m1 = get_F(gamma, phi_m1)
F_p1 = get_F(gamma, phi_p1)
F_m = get_F(gamma, phi_m)
F_p = get_F(gamma, phi_p)

F_mh = 0.5 * (F_m1 + F_m - c_mh * (phi_m1 - phi_m))
F_ph = 0.5 * (F_p + F_p1 - c_ph * (phi_p - phi_p1))
return F_mh, F_ph

# функция alpha(R) поэлементно
def alpha_all(R1, R2):
    R = np.zeros_like(R1)
    for i in range(R.shape[0]):
        if R2[i] != 0:
            R[i] = R1[i] / R2[i]
            if R[i] < 0: R[i] = 0
            elif R[i] > 1: R[i] = 1
    return R

# вычисление точки на правой границе со вторым порядком точности
def border2(phi_m, phi, phi_p, phi_2p):
    aRm = alpha_all(phi - phi_m, phi_p - phi)
    aRp = alpha_all(phi_p - phi, phi_2p - phi_p)

    phi_hm = phi + 0.5 * aRm * (phi_p - phi)
    phi_hp = phi_p - 0.5 * aRp * (phi_2p - phi_p)
    return phi_hm, phi_hp

def solve(orderXY, orderT, Nx, Ny, Nt, T, gamma, rho2, eps2, rho3, M,
alpha, n):
    rho = np.zeros(shape=(Nt + orderT - 1, Nx + 4, Ny + 4))
    u = np.zeros(shape=(Nt + orderT - 1, Nx + 4, Ny + 4))

```

```

v = np.zeros(shape=(Nt + orderT - 1, Nx + 4, Ny + 4))
eps = np.zeros(shape=(Nt + orderT - 1, Nx + 4, Ny + 4))

dx, dy, dt = 1.0 / Nx, 2.0 / Ny, T / Nt

# начальные условия
eps3 = rho2 * eps2 / rho3

c2 = math.sqrt(gamma * (gamma - 1) * eps2)
D = c2 * M
B = (gamma - 1) * eps2 / D

v1 = 2 * (D * D - gamma * (gamma - 1) * eps2) / (D * (gamma + 1))
rho1 = D * rho2 / (D - v1)
eps1 = (v1 + B) * (D - v1) / (gamma - 1)
v1 = -v1

for i in range(2, Nx + 2):
    for j in range(2, Ny + 2):
        x, y = (i - 2 + 0.5) * dx, (j - 2 + 0.5) * dy
        # контактный разрыв
        if y < 1.5:
            V = dx * dy
            V3 = cos_area(x - 0.5 * dx, y - 0.5 * dy, x + 0.5 *
dx, y + 0.5 * dy, alpha, 0.7, n * math.pi)
            V2 = V - V3
            rho[0, i, j] = (rho2 * V2 + rho3 * V3) / V
            eps[0, i, j] = (rho2 * V2 * eps2 + rho3 * V3 * eps3) /
(V * rho[0, i, j])
            # ударная волна
        else:
            rho[0, i, j] = rho1
            v[0, i, j] = v1
            eps[0, i, j] = eps1

# вычисление следующих моментов времени
k0, k = -1, orderT - 2
for repeat in range(0, orderT * (Nt - 1)):
    print(int(100 * repeat / (orderT * (Nt - 1))), '%')

    if orderT == 1:
        k0 += 1
        k += 1
    elif k0 == k:
        k = -1
    else:
        k0 += 1
        k = k0

```

```

# краевые условия
for j in range(2, Ny + 2):
    for i in range(2):
        # слева
        rho[k, i, j] = rho[k, 3 - i, j]
        u[k, i, j] = -u[k, 3 - i, j]
        v[k, i, j] = v[k, 3 - i, j]
        eps[k, i, j] = eps[k, 3 - i, j]
        # справа
        rho[k, Nx + 2 + i, j] = rho[k, Nx + 1 - i, j]
        u[k, Nx + 2 + i, j] = -u[k, Nx + 1 - i, j]
        v[k, Nx + 2 + i, j] = v[k, Nx + 1 - i, j]
        eps[k, Nx + 2 + i, j] = eps[k, Nx + 1 - i, j]

for i in range(2, Nx + 2):
    for j in range(2):
        # снизу
        rho[k, i, j] = rho[k, i, 3 - j]
        u[k, i, j] = u[k, i, 3 - j]
        v[k, i, j] = -v[k, i, 3 - j]
        eps[k, i, j] = eps[k, i, 3 - j]
        # сверху
        rho[k, i, Ny + 2 + j] = rho1
        u[k, i, Ny + 2 + j] = 0
        v[k, i, Ny + 2 + j] = v1
        eps[k, i, Ny + 2 + j] = eps1

# следующие значения
for i in range(2, Nx + 2):
    for j in range(2, Ny + 2):
        # текущее значение phi
        phi1 = to_phi(rho, u, v, eps, k0, i, j)

        # вычисляем потоки на границах
        phi = to_phi(rho, u, v, eps, k, i, j)
        phi_mx = to_phi(rho, u, v, eps, k, i - 1, j)
        phi_px = to_phi(rho, u, v, eps, k, i + 1, j)
        phi_my = to_phi(rho, u, v, eps, k, i, j - 1)
        phi_py = to_phi(rho, u, v, eps, k, i, j + 1)

        if orderXY == 2:
            phi_2mx = to_phi(rho, u, v, eps, k, i - 2, j)
            phi_2px = to_phi(rho, u, v, eps, k, i + 2, j)
            phi_2my = to_phi(rho, u, v, eps, k, i, j - 2)
            phi_2py = to_phi(rho, u, v, eps, k, i, j + 2)

            phi_hmx_m, phi_hmx_p = border2(phi_2mx, phi_mx,
phi, phi_px)
            phi_hpx_m, phi_hpx_p = border2(phi_mx, phi,
phi_px, phi_2px)

```

```

        phi_hmy_m, phi_hmy_p = border2(phi_2my, phi_my,
phi, phi_py)
        phi_hpy_m, phi_hpy_p = border2(phi_my, phi,
phi_py, phi_2py)

        F_mhx, F_phx = get_F_half(phi_hmx_p, phi_hpx_m,
phi_hmx_m, phi_hpx_p, gamma, False)
        F_mhy, F_phy = get_F_half(phi_hmy_p, phi_hpy_m,
phi_hmy_m, phi_hpy_p, gamma, True)
    else:
        F_mhx, F_phx = get_F_half(phi, phi, phi_mx,
phi_px, gamma, False)
        F_mhy, F_phy = get_F_half(phi, phi, phi_my,
phi_py, gamma, True)

    # вычисляем новое значение phi
    mult = 0.5 if k == k0 and orderT == 2 else 1
    phi2 = phi1 - mult * dt / dx * (F_phx - F_mhx) - mult
* dt / dy * (F_phy - F_mhy)

    # выражаем параметры
    kw = -1 if k == k0 and orderT == 2 else k0 + 1
    rho[kw, i, j], u[kw, i, j], v[kw, i, j], eps[kw, i, j]
= from_phi(phi2)

    # убираем границы и вспомогательный слой
    print('Done!')
    return rho[:Nt, 2:Nx+2, 2:Ny+2], u[:Nt, 2:Nx+2, 2:Ny+2], v[:Nt,
2:Nx+2, 2:Ny+2], eps[:Nt, 2:Nx+2, 2:Ny+2]

# градиент
cdict = {'red': [(0.0, 0.1, 0.1),
(0.1, 0.3, 0.3),
(0.9, 0.7, 0.7),
(1.0, 0.9, 0.9)],}
cdict['green'] = cdict['red']
cdict['blue'] = cdict['red']

custom_clrs = LinearSegmentedColormap('custom_clrs', cdict)

# рисует графики для определённого момента времени
def plotTime(time_index):
    print('t =', time_index * T / Nt)

    plt.figure()
    fig, splots = plt.subplots(1, 4)
    fig.set_figheight(10)
    fig.set_figwidth(20)

    for i, arr in enumerate([np.log(rho), u, v, np.log(eps)]):

```

```
plots[i].imshow(np.flip(arr[time_index].T, axis=0),  
extent=(0,1,0,2), interpolation='none', cmap=custom_clrs)
```

Запустим схему первого порядка точности по времени и пространству:

```
rho, u, v, eps = solve(orderXY = 1, orderT = 1, Nx = Nx, Ny = Ny, Nt =  
Nt, T = T, gamma = gamma, rho2 = 1, eps2 = 1, rho3 = rho3, M = M,  
alpha = alpha, n = n)
```

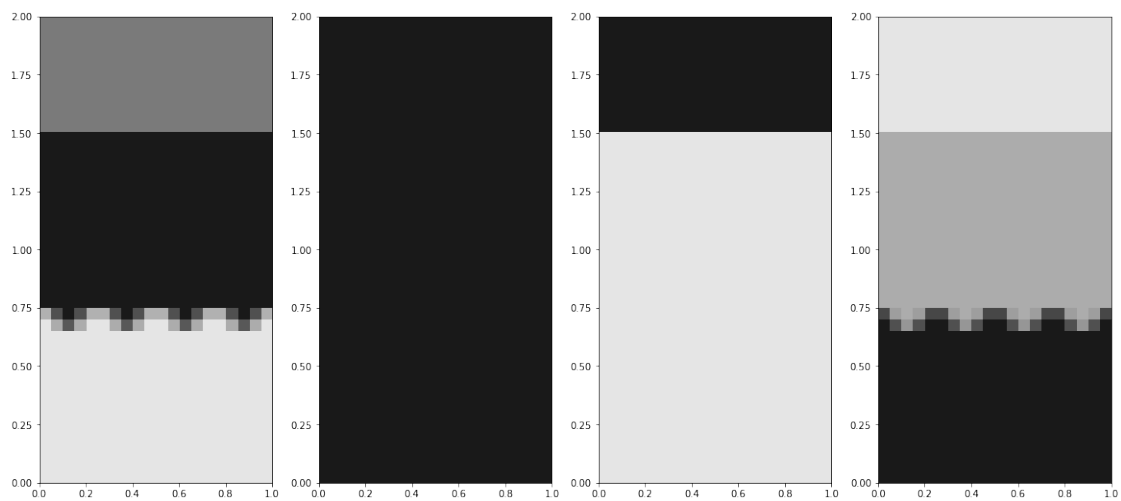
```
0 %  
3 %  
6 %  
10 %  
13 %  
17 %  
20 %  
24 %  
27 %  
31 %  
34 %  
37 %  
41 %  
44 %  
48 %  
51 %  
55 %  
58 %  
62 %  
65 %  
68 %  
72 %  
75 %  
79 %  
82 %  
86 %  
89 %  
93 %  
96 %  
Done!
```

Построим графики для начального момента времени:

```
plotTime(0)
```

```
t = 0.0
```

```
<Figure size 432x288 with 0 Axes>
```

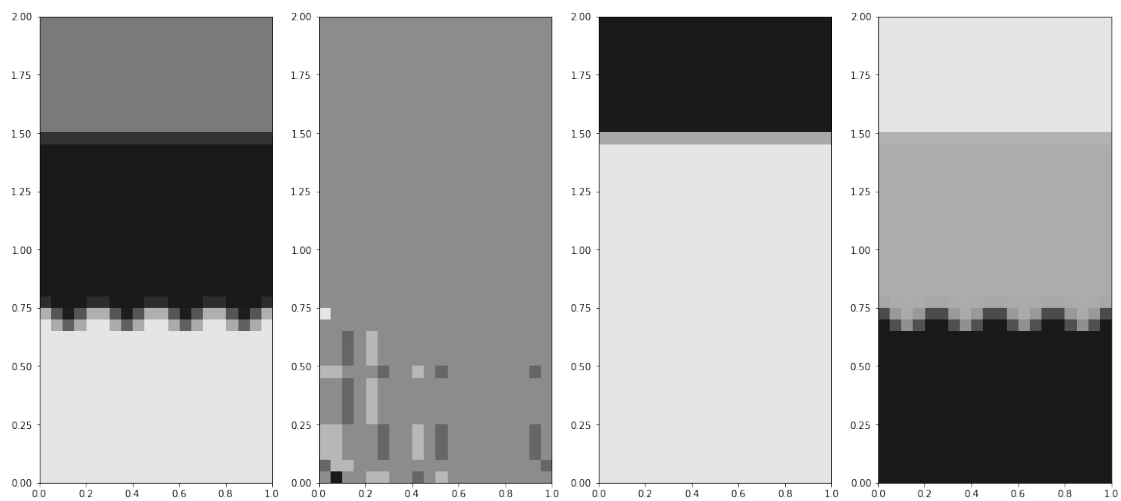


Построим графики для следующих моментов времени:

```
plotTime(plot_time1)
```

$t = 0.0025$

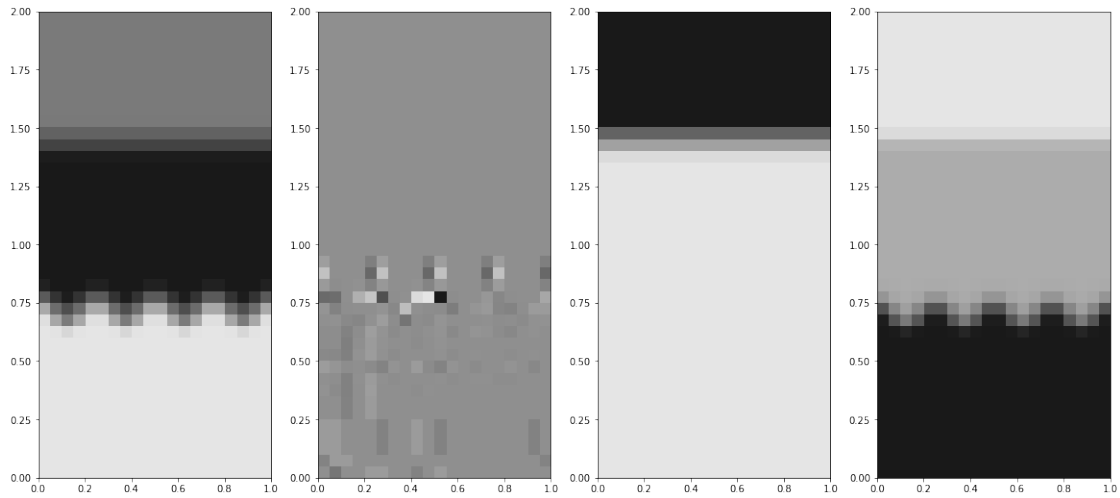
<Figure size 432x288 with 0 Axes>



```
plotTime(plot_time2)
```

$t = 0.0225$

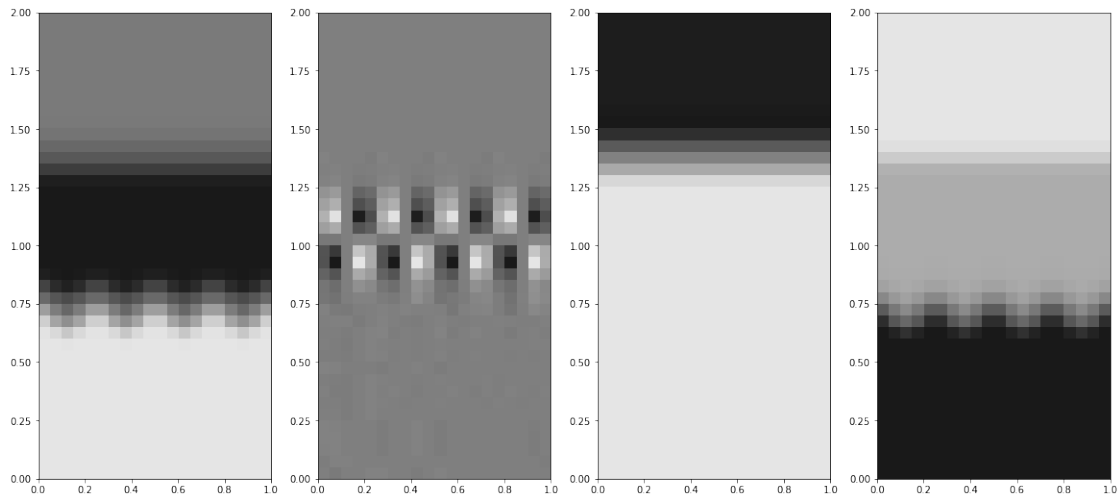
<Figure size 432x288 with 0 Axes>



```
plotTime(plot_time3)
```

```
t = 0.0725
```

```
<Figure size 432x288 with 0 Axes>
```



Запустим схему второго порядка точности по пространству и первого по времени:

```
rho, u, v, eps = solve(orderXY = 2, orderT = 1, Nx = Nx, Ny = Ny, Nt = Nt, T = T, gamma = gamma, rho2 = 1, eps2 = 1, rho3 = rho3, M = M, alpha = alpha, n = n)
```

```
0 %
3 %
6 %
10 %
13 %
17 %
20 %
```

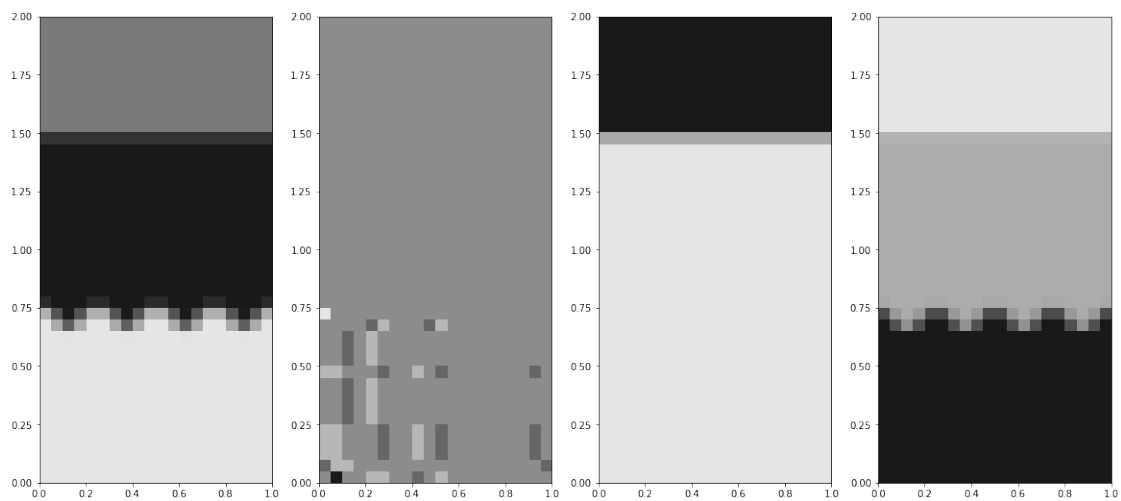

24 %
27 %
31 %
34 %
37 %
41 %
44 %
48 %
51 %
55 %
58 %
62 %
65 %
68 %
72 %
75 %
79 %
82 %
86 %
89 %
93 %
96 %
Done!

Построим графики для следующих моментов времени:

`plotTime(plot_time1)`

`t = 0.0025`

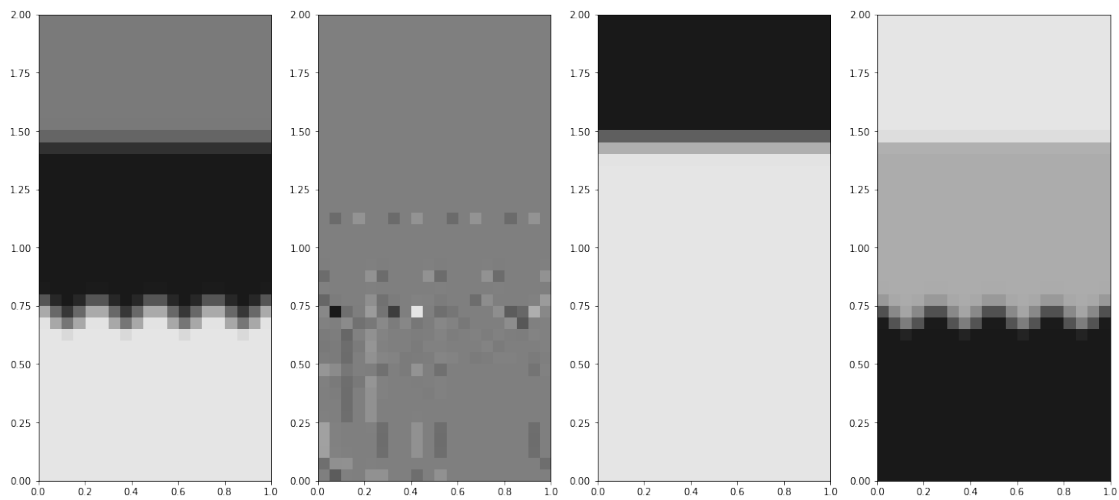
<Figure size 432x288 with 0 Axes>



`plotTime(plot_time2)`

`t = 0.0225`

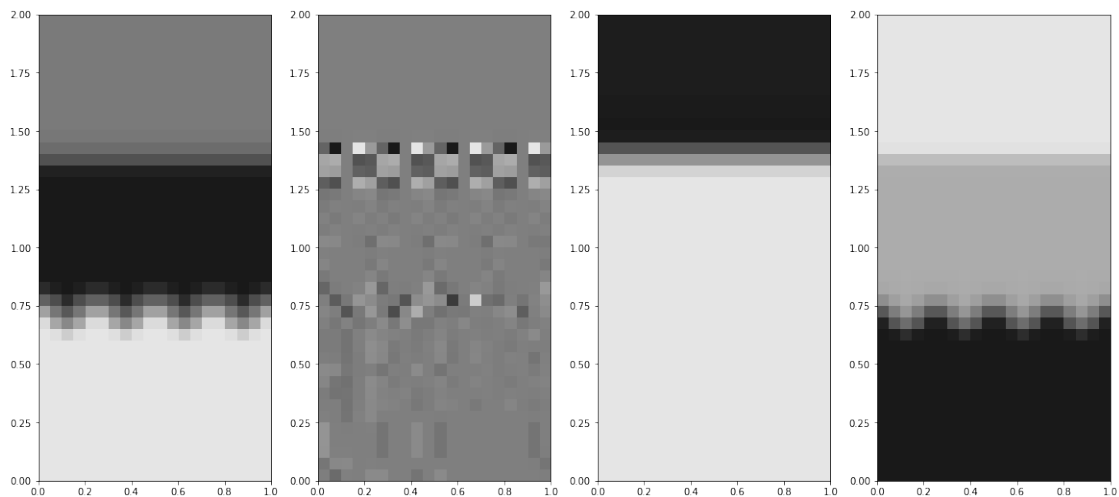
<Figure size 432x288 with 0 Axes>



plotTime(plot_time3)

t = 0.0725

<Figure size 432x288 with 0 Axes>



Запустим схему второго порядка точности по времени и пространству:

```
rho, u, v, eps = solve(orderXY = 2, orderT = 2, Nx = Nx, Ny = Ny, Nt = Nt, T = T, gamma = gamma, rho2 = 1, eps2 = 1, rho3 = rho3, M = M, alpha = alpha, n = n)
```

0 %
1 %
3 %
5 %
6 %
8 %
10 %

12 %
13 %
15 %
17 %
18 %
20 %
22 %
24 %
25 %
27 %
29 %
31 %
32 %
34 %
36 %
37 %
39 %
41 %
43 %
44 %
46 %
48 %
50 %
51 %
53 %
55 %
56 %
58 %
60 %
62 %
63 %
65 %
67 %
68 %
70 %
72 %
74 %
75 %
77 %
79 %
81 %
82 %
84 %
86 %
87 %
89 %
91 %
93 %
94 %
96 %

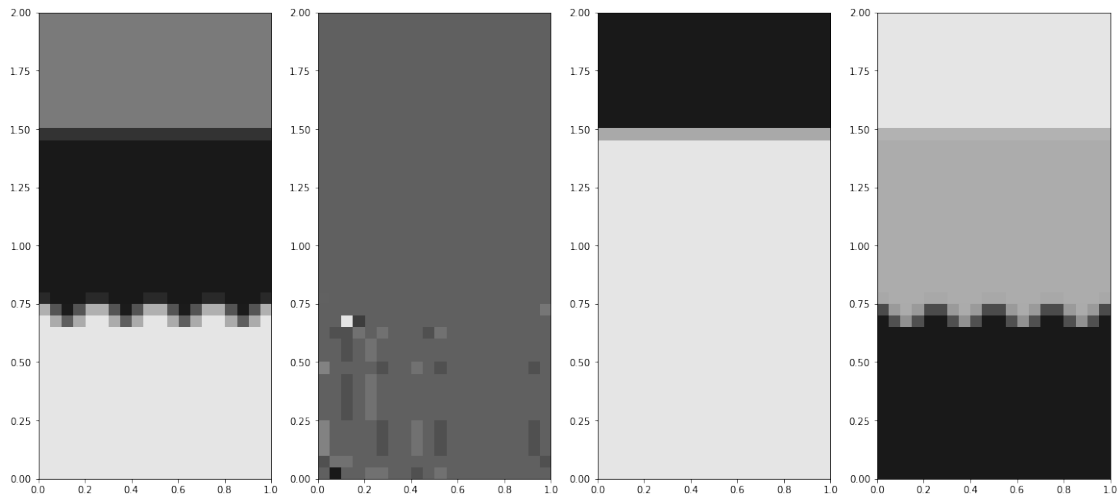
98 %
Done!

Построим графики для следующих моментов времени:

```
plotTime(plot_time1)
```

$t = 0.0025$

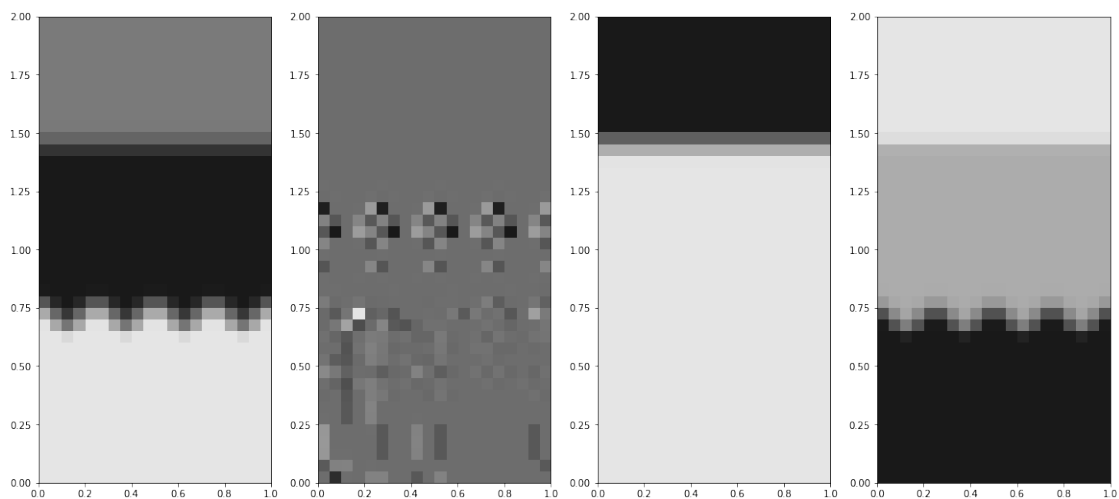
<Figure size 432x288 with 0 Axes>



```
plotTime(plot_time2)
```

$t = 0.0225$

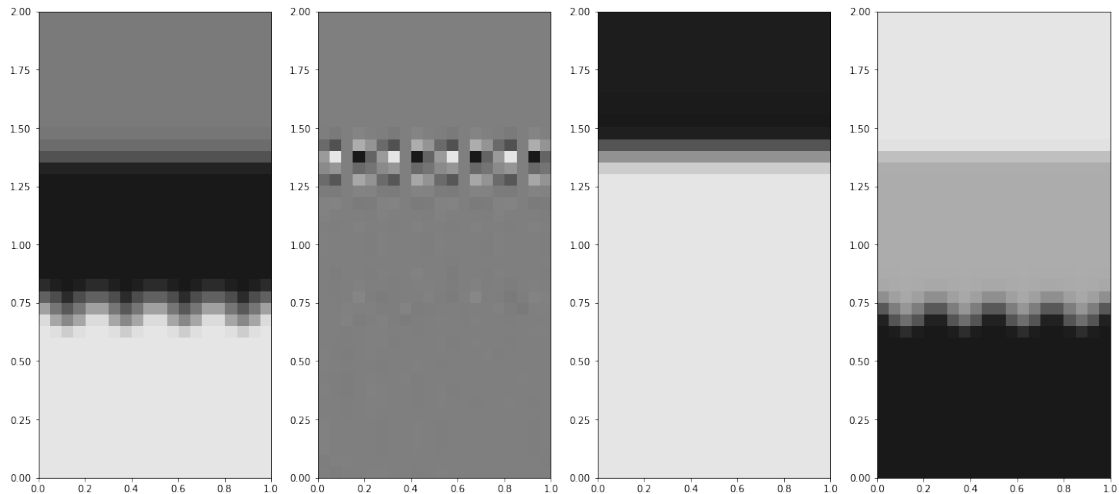
<Figure size 432x288 with 0 Axes>



```
plotTime(plot_time3)
```

$t = 0.0725$

<Figure size 432x288 with 0 Axes>



Будем измельчать сетку до тех пор, пока средний модуль разности между решениями первого и второго порядка точности не будет превышать пороговое значение:

```
# измельчаем, пока не выполнится
# mean(|rho_1 - rho_2| + mean(|u_1 - u_2| + mean(|v_1 - v_2| + mean(|
eps_1 - eps_2|) < lim_val
def subdiv(lim_val):
    nx, ny, nt, tmax = 10, 20, 10, T / 2
    print('Size:', nx, 'x', ny, 'x', nt)
    r1, u1, v1, e1 = solve(orderXY = 1, orderT = 1, Nx = nx, Ny = ny,
Nt = nt, T = tmax, gamma = gamma, rho2 = 1, eps2 = 1, rho3 = rho3, M =
M, alpha = alpha, n = n)

    while True:
        nx, ny, nt = 2 * nx, 2 * ny, 2 * nt
        print('Size:', nx, 'x', ny, 'x', nt)
        r2, u2, v2, e2 = solve(orderXY = 1, orderT = 1, Nx = nx, Ny =
ny, Nt = nt, T = tmax, gamma = gamma, rho2 = 1, eps2 = 1, rho3 = rho3,
M = M, alpha = alpha, n = n)

        diffR = np.abs(r1 - r2[:, :, 2, :]).mean()
        diffU = np.abs(u1 - u2[:, :, 2, :]).mean()
        diffV = np.abs(v1 - v2[:, :, 2, :]).mean()
        diffE = np.abs(e1 - e2[:, :, 2, :]).mean()
        diff = diffR + diffU + diffV + diffE

        print('Difference rho:', diffR)
        print('Difference u:', diffU)
        print('Difference v:', diffV)
        print('Difference eps:', diffE)
        print('Total difference:', diff)

        if diff < lim_val:
            print('Done!')
```

```
        return r1, u1, v1, e1, r2, u2, v2, e2

    r1, u1, v1, e1 = r2, u2, v2, e2
r1, u1, v1, e1, r2, u2, v2, e2 = subdiv(0.2)
```

Size: 10 x 20 x 10

0 %

11 %

22 %

33 %

44 %

55 %

66 %

77 %

88 %

Done!

Size: 20 x 40 x 20

0 %

5 %

10 %

15 %

21 %

26 %

31 %

36 %

42 %

47 %

52 %

57 %

63 %

68 %

73 %

78 %

84 %

89 %

94 %

Done!

Difference rho: 0.17737145898687748

Difference u: 2.1573759563609611e-16

Difference v: 0.010924177880187525

Difference eps: 0.020396939979026273

Total difference: 0.2086925768460915

Size: 40 x 80 x 40

0 %

2 %

5 %

7 %

10 %

12 %

15 %

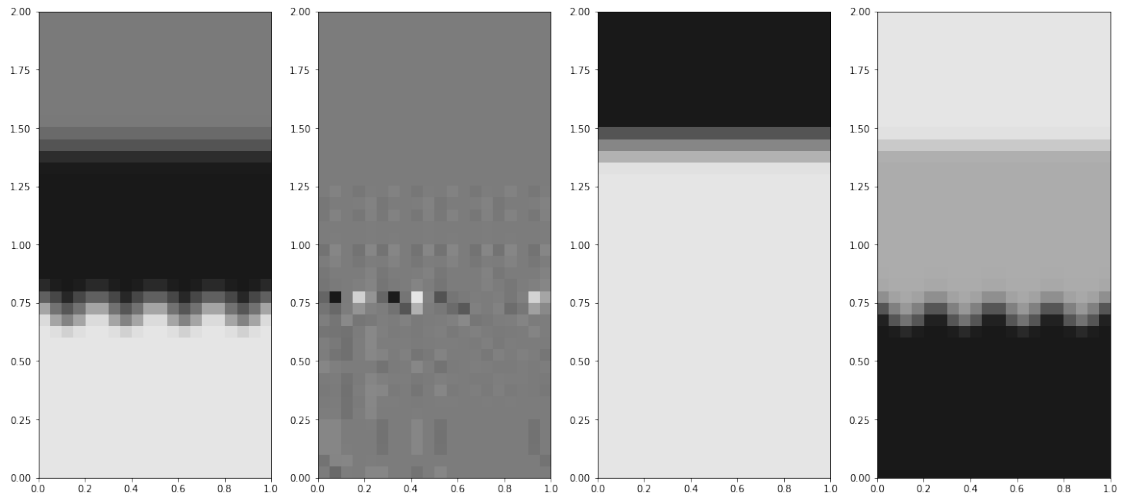
```
17 %
20 %
23 %
25 %
28 %
30 %
33 %
35 %
38 %
41 %
43 %
46 %
48 %
51 %
53 %
56 %
58 %
61 %
64 %
66 %
69 %
71 %
74 %
76 %
79 %
82 %
84 %
87 %
89 %
92 %
94 %
97 %
Done!
Difference rho: 0.07021365287915102
Difference u: 6.417956987455008e-19
Difference v: 0.006841589974564222
Difference eps: 0.010738992922067066
Total difference: 0.0877942357757823
Done!
```

Построим графики полученных решений. Как видно, графики почти не отличаются, кроме небольших помех по горизонтальной скорости.

```
rho, u, v, eps = r1, u1, v1, e1
plotTime(rho.shape[0] - 1)
```

```
t = 0.0475
```

```
<Figure size 432x288 with 0 Axes>
```



```
rho, u, v, eps = r2, u2, v2, e2
plotTime(rho.shape[0] - 1)
```

```
t = 0.09749999999999999
```

```
<Figure size 432x288 with 0 Axes>
```

