

Санкт-Петербургский государственный университет

Направление 010800 «Механика и математическое
моделирование»

Профиль «Физическая механика сплошных сред»

Сасакин Максим Евгеньевич

Разлёт в вакуум и взаимодействие с преградой мелкодисперсных частиц при
электрическом взрыве проводника

Бакалаврская работа

Научный руководитель:
профессор с возложенными
обязанностями заведующего
кафедрой, д.ф.-м.н. ,
доцент, Морозов В.А.

Рецензент:
инженер-программист,
к.ф.-м.н., Кац В.М.

Санкт-Петербург
2016

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Main Field of Study Mechanics and Mathematical Modelling

Area of Specialisation Physical Continuum Mechanics

Sasakin Maksim Yevgen'yevich

Expansion of fine-dispersed particles into vacuum under electrical
explosion of conductors

Bachelor's Thesis

Scientific supervisor:

Head of Department, doctor of physical and
mathematical sciences, assistant professor

Viktor Morozov

Reviewer:

Software Developer, PhD

Victor Kats

Saint-Petersburg

2016

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| 1. Введение..... | 2 |
| 2. Постановка задачи..... | 2 |
| 3. Проведение эксперимента и опытные данные..... | 4 |
| 4. Решение задачи..... | 8 |
| 5. Результаты расчета..... | 10 |
| 6. Выводы..... | 19 |
| 7. Литература..... | 20 |

1. Введение.

Существует множество известных факторов космического пространства (микрометеориты, солнечная радиация, потоки протонов и электронов), которые влияют на материалы и элементы систем, находящихся на внешней поверхности космических аппаратов. В дополнение к естественным факторам добавилось антропогенное загрязнение околоземного космического пространства [1,2], вызванное запуском космических аппаратов. Большую опасность представляют не крупные объекты, вероятность столкновения космического аппарата с которыми крайне мала, а мелкодисперсные частицы (МДЧ) размерами от десятых долей до нескольких сотен микрон, количество которых намного больше и наличие которых не регистрируют современные радиолокационные средства.

Данные, полученные в ходе экспериментов на борту космических аппаратов показывают, что количество МДЧ антропогенного происхождения превышает естественные микрометеоритные потоки и продолжает возрастать. В этой связи становятся актуальными задачи лабораторного моделирования движения мелкодисперсных частиц и их взаимодействия с преградой.

Настоящая работа и направлена на решение обозначенной выше актуальной задачи.

В лаборатории на кафедре физической механики Санкт-Петербургского государственного университета проводятся исследования по разгону частиц, используя метод взрыва проводников, короткими высокоамплитудными импульсами тока на базе генератора ГКВИ-300 [3,4]. Основные преимущества данного метода лабораторного моделирования высокоскоростного соударения частиц с преградой заключаются в том, что используемая в данном методе установка проста, малоэнергоёмка, имеет сравнительно малые габариты.

2. Постановка задачи

Рассмотрим задачу о взрыве алюминиевого проводника под действием высокоамплитудного короткого импульса тока.

В проводнике происходят следующие процессы: нагрев проводника до температуры плавления, плавление проводника, нагрев жидкого проводника до температуры кипения, испарение проводника, разлет вещества в вакуум и столкновение продуктов разлета (МДЧ) с преградой.

Будем решать одномерную задачу движения частиц при электрическом взрыве проводников. Предполагается, что разлетающееся вещество описывается одномерными газодинамическими уравнениями Эйлера:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(p + \rho v^2) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x}((p + \rho E)v) = 0 \quad (3)$$

Уравнение (4) соответствует мгновенному вкладу энергии.

Здесь ρ - плотность вещества, v - массовая скорость, E - полная энергия, приходящаяся на единицу массы вещества, p - давление. В качестве замыкающего уравнения возьмём уравнение состояния Ми-Грюнайзена:

$$p = \Gamma \rho \left(E - \frac{v^2}{2} \right), \quad (4)$$

где Γ - коэффициент Грюнайзена (для алюминия $\Gamma=2$). Решив систему (1)-(4), можно получить изменение параметров (ρ , v , E , p) по времени и координате и описать процесс разлёта вещества под действием энергии импульса. Решение данной системы уравнений производится численно методом «крупных частиц» [5].

3. Проведение эксперимента и опытные данные

Эксперименты проводились на установке, функциональная схема которой приведена на рис 1.

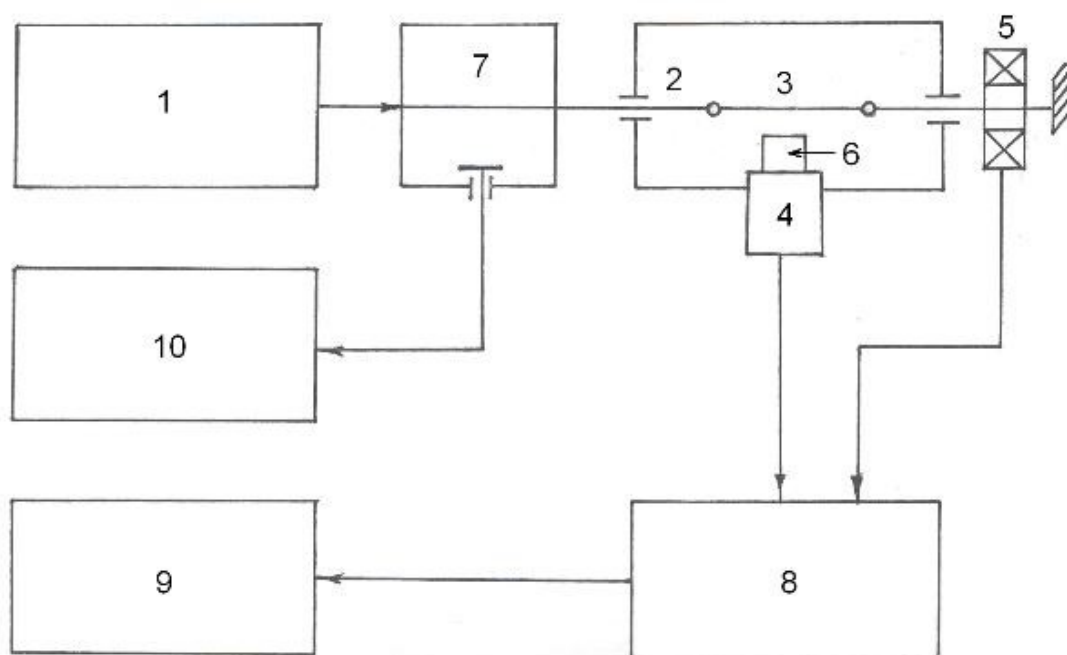


Рис. 1. Функциональная схема установки.

- 1 – генератор коротких высоковольтных импульсов ГКВИ-300;
- 2 – вакуумная камера; 3 – взрывающийся проводник; 4 – пьезодатчик;
- 5 – измеритель тока (пояс Роговского); 6 – акустический волновод датчика;
- 7 – емкостной делитель напряжения; 8 – осциллограф Tektronix TDS 2012;
- 9 – персональный компьютер; 10 – осциллограф скоростной И2-7.

Для получения вклада энергии использовались осциллограммы тока и напряжения, полученные при взрыве алюминиевого проводника размером 10x10 мм и толщиной 7 мкм (рис. 2, рис. 3).

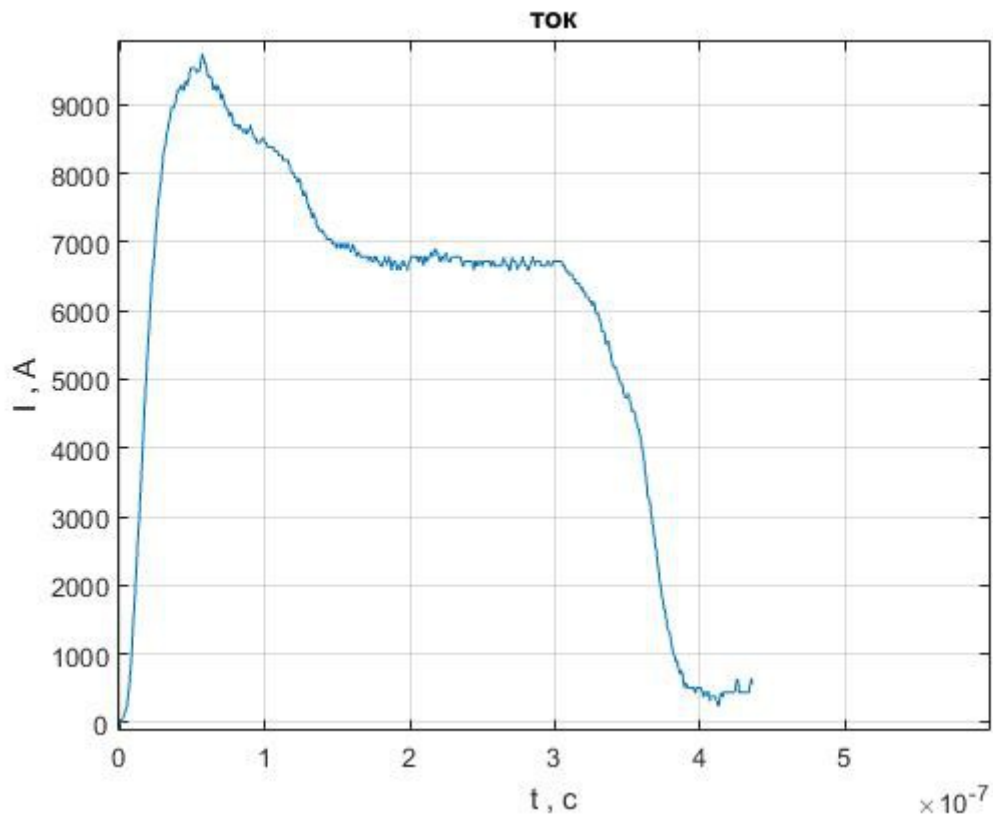


Рис. 2. Осциллограмма тока.

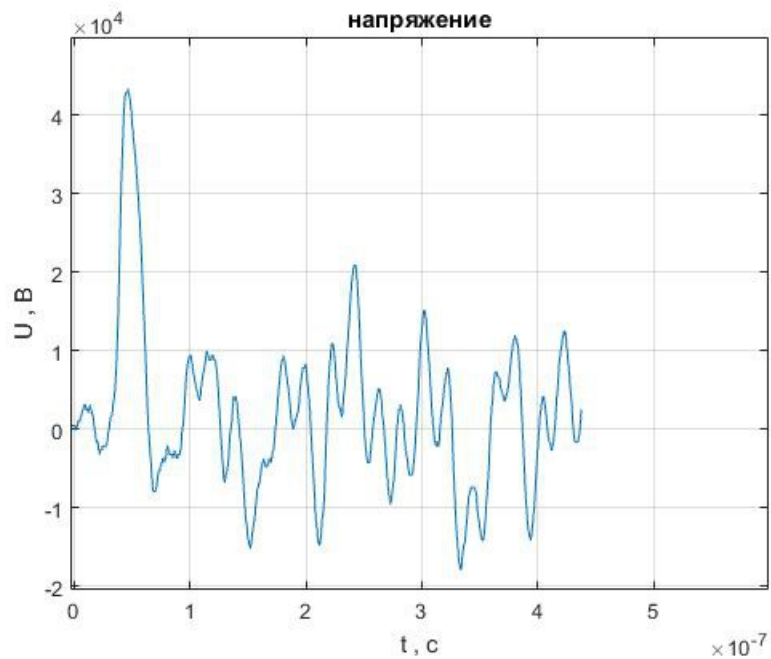


Рис. 3. Осциллограмма напряжения.

Энергию, вложенную в проводник, вычисляем по формуле:

$$W = \int_0^t U(t) I(t) dt \quad (5)$$

Подинтегральные функции $U(t)$ и $I(t)$ берем из осциллограмм (рис. 2,3).

Зная размеры проводника и его начальную плотность, можно посчитать энергию, затраченную на испарение проводника. Эта энергия E и соответствующее ей давление P (согласно выражению (4)) используются в качестве начальных условий, решаемой задачи.

После взрыва проводника происходит соударение разлетающихся частиц с преградой, в качестве которой служит стеклянный волновод (рис 4).

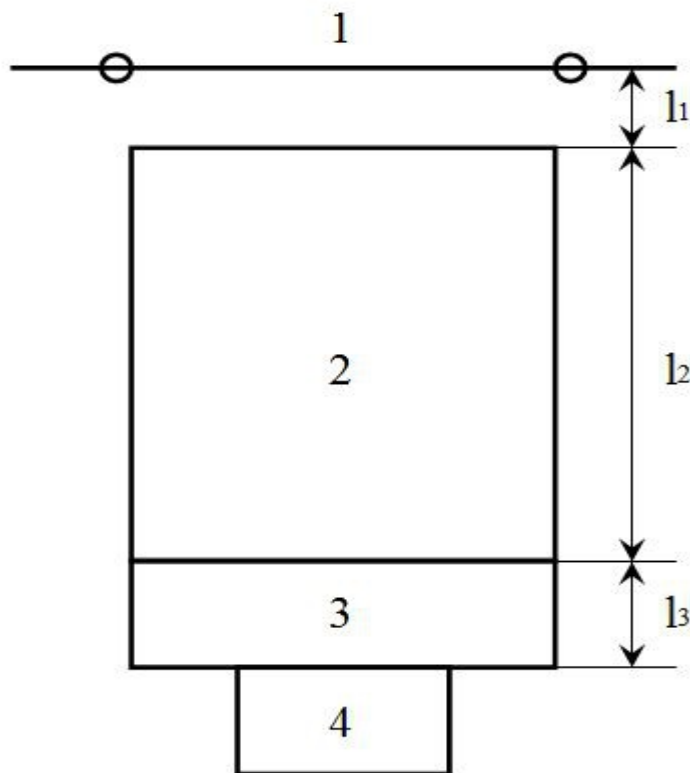


Рис. 4. Функциональная схема измерения времени движения частиц от взрывающегося проводника до преграды. 1 - взрываемый проводник, 2 - стеклянный волновод, 3 - алюминиевый волновод(пластину), 4 — пьезоэлемент, l_1 - расстояние от взрывающегося проводника до преграды (волновода), l_2 - длина акустического волновода, l_3 - толщина алюминиевой пластины.

В нем возбуждается акустическая волна, которая далее передается на пьезоэлектрический датчик через алюминиевый волновод(пластину). Сигнал с пьезодатчика регистрируется на осциллографе в виде импульса давления частиц на преграду (рис. 5). Время появления сигнала на экране осциллографа отсчитывается от момента взрыва проводника. Оно складывается из времени движения частиц до преграды, времени прохождения акустической волны по стеклянному и алюминиевому волноводам пьезодатчика. Последние два времени известны, таким образом можно определить время, за которое частицы взрывающегося проводника достигнут преграды. Это время мы можем представить в следующем виде (рис.4):

$$t = \frac{l_1}{v_\pi} + \frac{l_2}{v_\beta} + \frac{l_3}{v_{Al}}, \quad (6)$$

где v_π - средняя скорость продуктов взрыва проводника, v_β - скорость продольной волны в стеклянном волноводе, v_{Al} - скорость продольной волны в алюминиевой пластине (алюминиевом волноводе).

По осциллограмме акустического сигнала (рис. 6) мы можем найти t . В данном случае t отсчитывается по максимальной амплитуде акустического сигнала.

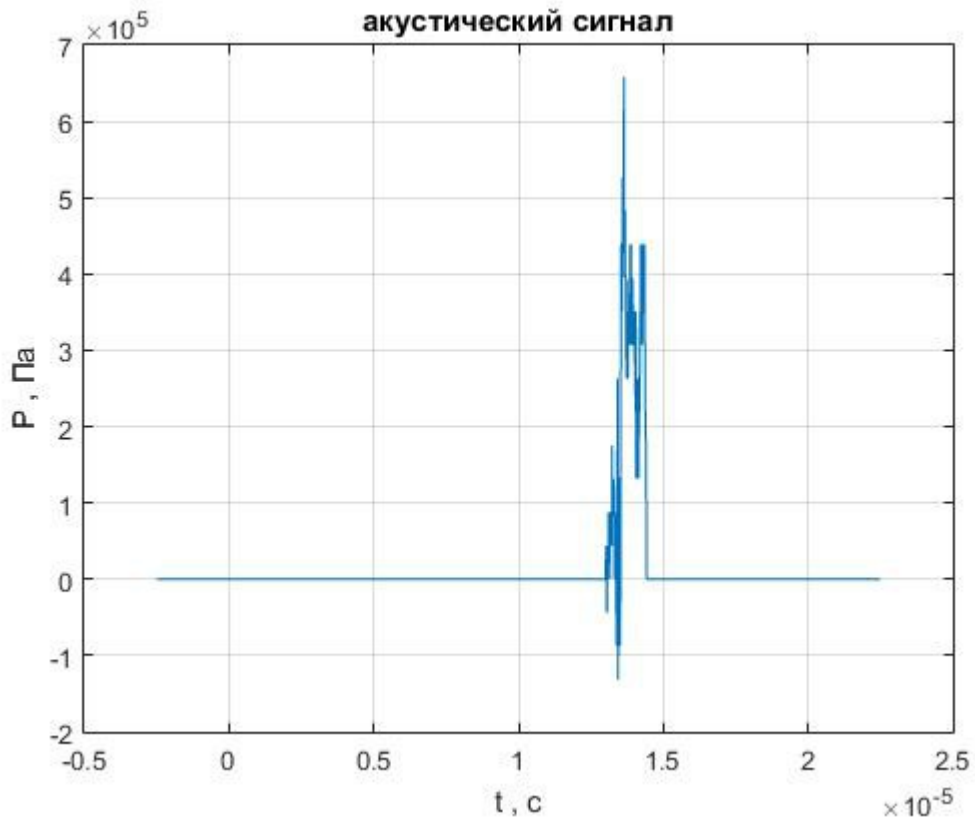


Рис 5. Акустический сигнал.

Из осциллограммы (рис. 5) получаем $t=13,5$ мкс. Далее найдём $\frac{l_1}{v_\pi}$ из выражения (6).

$$\frac{l_2}{v_\beta} = \frac{70 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{5,6 \cdot 10^3 \text{ м/с}} = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$\frac{l_3}{v_{Al}} = \frac{2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{6,3 \cdot 10^3 \text{ м/с}} = 0,35 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$\frac{l_1}{v_\pi} = t - \frac{l_2}{v_\beta} - \frac{l_3}{v_{Al}} = 13,5 \cdot 10^{-6} - 12,5 \cdot 10^{-6} - 0,35 \cdot 10^{-6} = 0,65 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

Таким образом, мы видим, исходя из экспериментальных данных, что среднее

время, за которое продукты взрывающегося проводника достигнут преграды, составляет 0,65мкс.

Зная расстояние от взрывающегося проводника до преграды ($l_1=2\text{мм}$), определим среднюю скорость движения частиц $v=l_1 \frac{v_x}{l_1} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0,65 \cdot 10^{-6}} = 3077 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

4. Решение задачи

Численная схема разлета вещества.

Для математического описания разлета вещества берется система уравнений Эйлера (1)-(3) и уравнение состояния Ми-Грюнаизена (4). Полученную систему решаем с помощью численного метода «крупных частиц». Расчет параметров (ρ , v , E , p) проводится в три этапа. Давление p мы получаем из уравнения Ми-Грюнаизена (4).

1-й этап (эйлеров). Пренебрегаем всеми эффектами, связанными с перемещением массы. Тогда система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \rho_t &= 0 \\ (\rho v)_t + p_x &= 0 \\ (\rho E)_t + (pv)_x &= 0 \end{aligned}$$

2-й этап (лагранжев). Учитывается обмен массой между ячейками и предполагается, что масса переносится только за счет нормальной составляющей скорости:

$$\begin{aligned} (\rho)_t + (\rho v)_x &= 0 \\ (\rho v)_t + (\rho v^2)_x &= 0 \\ (\rho E)_t + (\rho E v)_x &= 0 \end{aligned}$$

3-й этап (заключительный). Здесь определяются окончательные параметры потока на основе законов сохранения импульсов, энергии и массы.

Запишем схемы конечных разностей, реализующие описанные этапы.

Эйлеров этап:

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_i^n &= \rho_i^n \\ \tilde{v}_i^n &= v_i^n - (p_{i+\frac{1}{2}}^n - p_{i-\frac{1}{2}}^n) \frac{\tau}{h\rho_i^n} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\tilde{E}_i^n = E_i^n - (p_{i+\frac{1}{2}}^n v_{i+\frac{1}{2}}^n - p_{i-\frac{1}{2}}^n v_{i-\frac{1}{2}}^n) \frac{\tau}{h\rho_i^n}$$

Здесь $\tilde{\rho}$, \tilde{v} , \tilde{E} - промежуточные значения параметров потока.

$$p_{i+\frac{1}{2}}^n = \frac{p_i^n + p_{i+1}^n}{2}$$

$$p_{i-\frac{1}{2}}^n = \frac{p_i^n + p_{i-1}^n}{2}$$

Лагранжев этап:

$$\Delta M_{i+\frac{1}{2}}^n = \begin{cases} \rho_i^n \frac{\tilde{v}_i^n + \tilde{v}_{i+1}^n}{2} \tau & \text{if } \tilde{v}_i^n + \tilde{v}_{i+1}^n > 0 \\ \rho_{i+1}^n \frac{\tilde{v}_i^n + \tilde{v}_{i+1}^n}{2} \tau & \text{if } \tilde{v}_i^n + \tilde{v}_{i+1}^n < 0 \end{cases}$$

$$\Delta M_{i-\frac{1}{2}}^n = \begin{cases} \rho_{i-1}^n \frac{\tilde{v}_{i-1}^n + \tilde{v}_i^n}{2} \tau & \text{if } \tilde{v}_i^n + \tilde{v}_{i-1}^n > 0 \\ \rho_i^n \frac{\tilde{v}_{i-1}^n + \tilde{v}_i^n}{2} \tau & \text{if } \tilde{v}_i^n + \tilde{v}_{i-1}^n < 0 \end{cases}$$
(7)

где $\Delta M_{i+\frac{1}{2}}^n$ - поток массы через границу ячейки.

Заключительный этап:

$$\rho_i^{n+1} = \tilde{\rho}_i^n + \Delta M_{i-\frac{1}{2}}^n \frac{1}{h} - \Delta M_{i+\frac{1}{2}}^n \frac{1}{h}$$

$$v_i^{n+1} = \tilde{v}_i^n \frac{\rho_i^n}{\rho_i^{n+1}} + \Delta M_{i-\frac{1}{2}}^n \langle v \rangle_{i-\frac{1}{2}}^n \frac{1}{\rho_i^{n+1} h} - \Delta M_{i+\frac{1}{2}}^n \langle v \rangle_{i+\frac{1}{2}}^n \frac{1}{\rho_i^{n+1} h}$$

$$E_i^{n+1} = \tilde{E}_i^n \frac{\rho_i^n}{\rho_i^{n+1}} + \Delta M_{i-\frac{1}{2}}^n \langle E \rangle_{i-\frac{1}{2}}^n \frac{1}{\rho_i^{n+1} h} - \Delta M_{i+\frac{1}{2}}^n \langle E \rangle_{i+\frac{1}{2}}^n \frac{1}{\rho_i^{n+1} h}$$
(8)

где

$$\langle v \rangle_{i-\frac{1}{2}}^n = v_{i-1}^n, \text{ если } \Delta M_{i-\frac{1}{2}}^n \geq 0$$

$$\langle E \rangle_{i-\frac{1}{2}}^n = E_{i-1}^n$$

$$\langle v \rangle_{i-\frac{1}{2}}^n = v_i^n, \text{ если } \Delta M_{i-\frac{1}{2}}^n \leq 0$$

$$\langle E \rangle_{i-\frac{1}{2}}^n = E_i^n$$

Верхние индексы соответствуют номеру шага по времени, нижние - номеру шага по пространству.

τ - шаг по времени.

h - шаг по пространству.

Наглядное представление произвольного параметра f в ячейке приведено на рис 6.

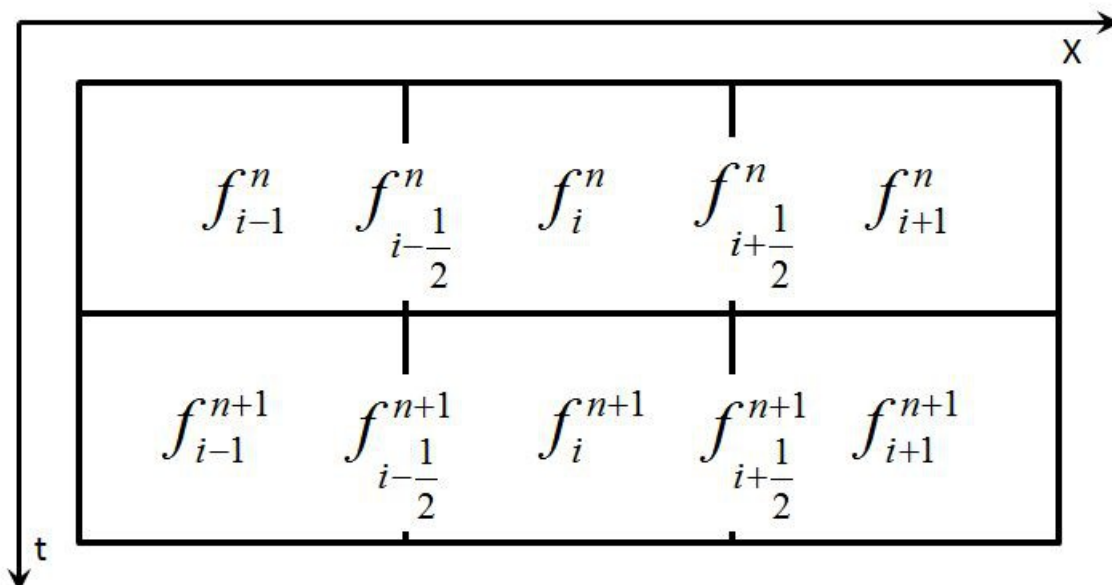


Рис. 6. Представление произвольного параметра f в ячейке.

Численная схема была реализована в программной среде MATLAB, текст программы доступен по ссылке <https://github.com/Sasakin/fine-dispersed-particles>. Для повышения устойчивости метода был введен параметр K , определяющий минимальную массу, переносимую из ячейки в ячейку.

5. Результаты расчета

Были получены результаты численного расчета параметров при взрыве алюминиевой фольги размером 10x10мм и толщиной 7мкм. В начальный момент времени плотность считалась равной $2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Координата изменяется в диапазоне от 0 до 2мм. Время изменяется в диапазоне от 0 до 2,5мкс. Результаты расчета представлены в виде графиков зависимости параметров P, ρ, v от координаты при фиксированном времени, и от времени при фиксированной координате (рис. 7- 22).

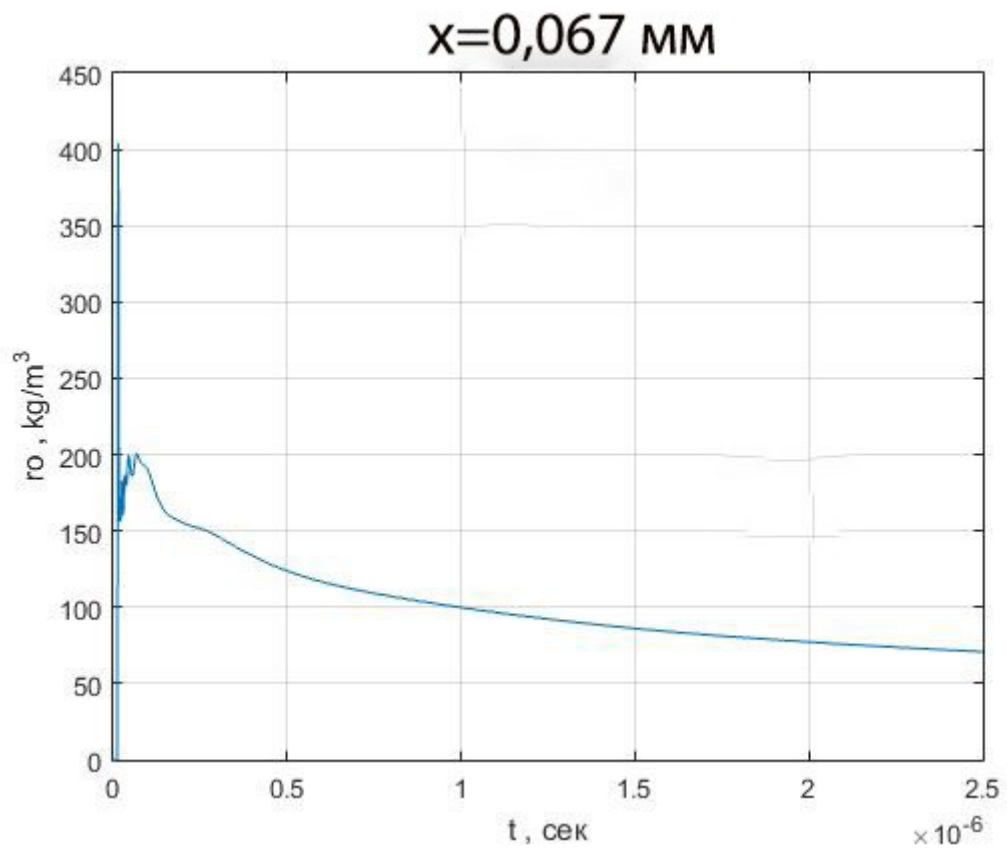


Рис. 7. Зависимость плотности от времени, $x=0,067$ мм

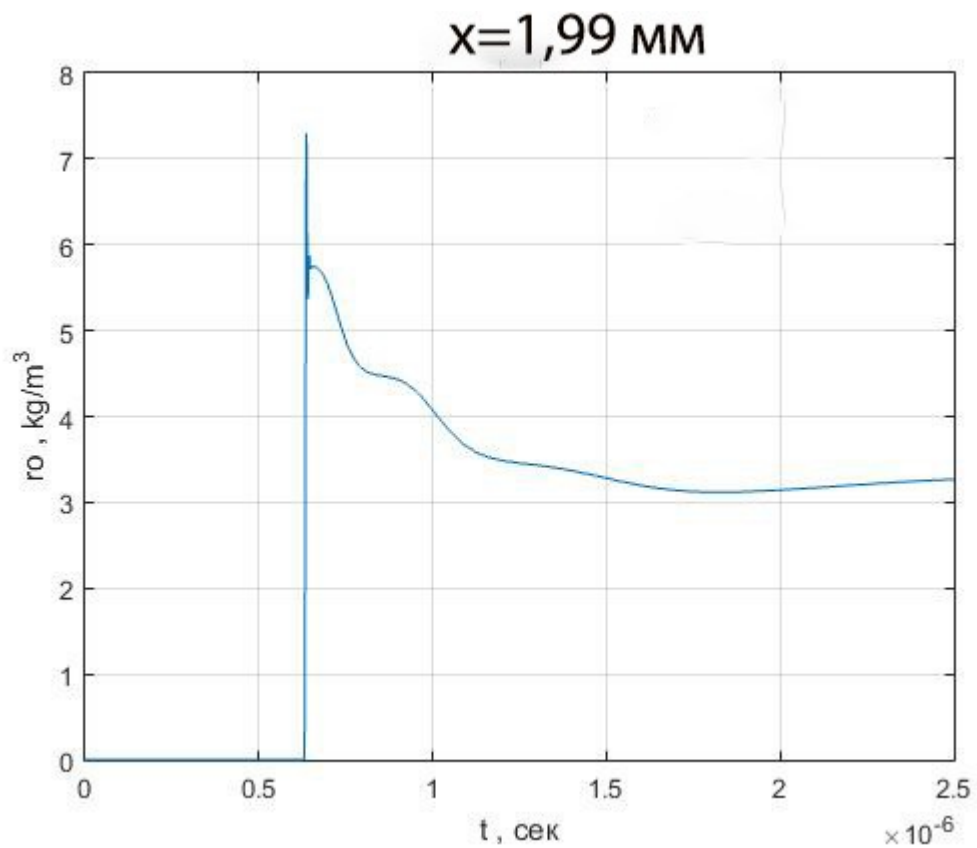


Рис. 8. Зависимость плотности от времени, $x=1,99$ мм

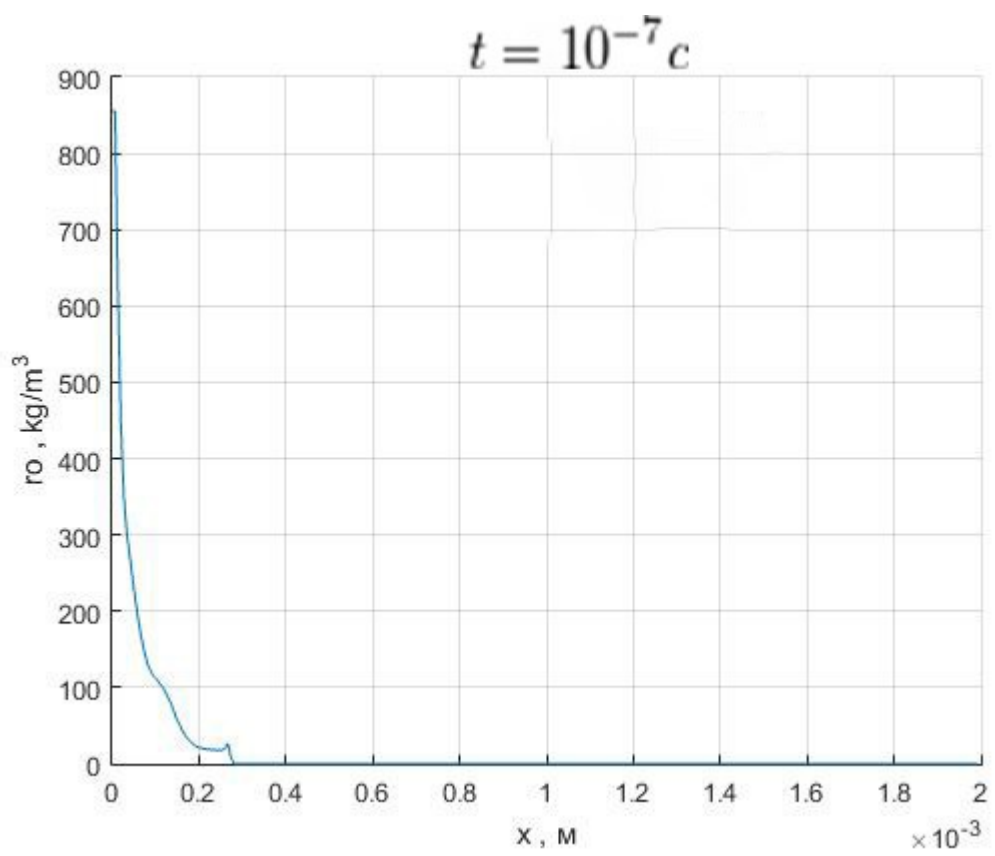


Рис. 9. Зависимость плотности от координаты, $t = 10^{-7} c$

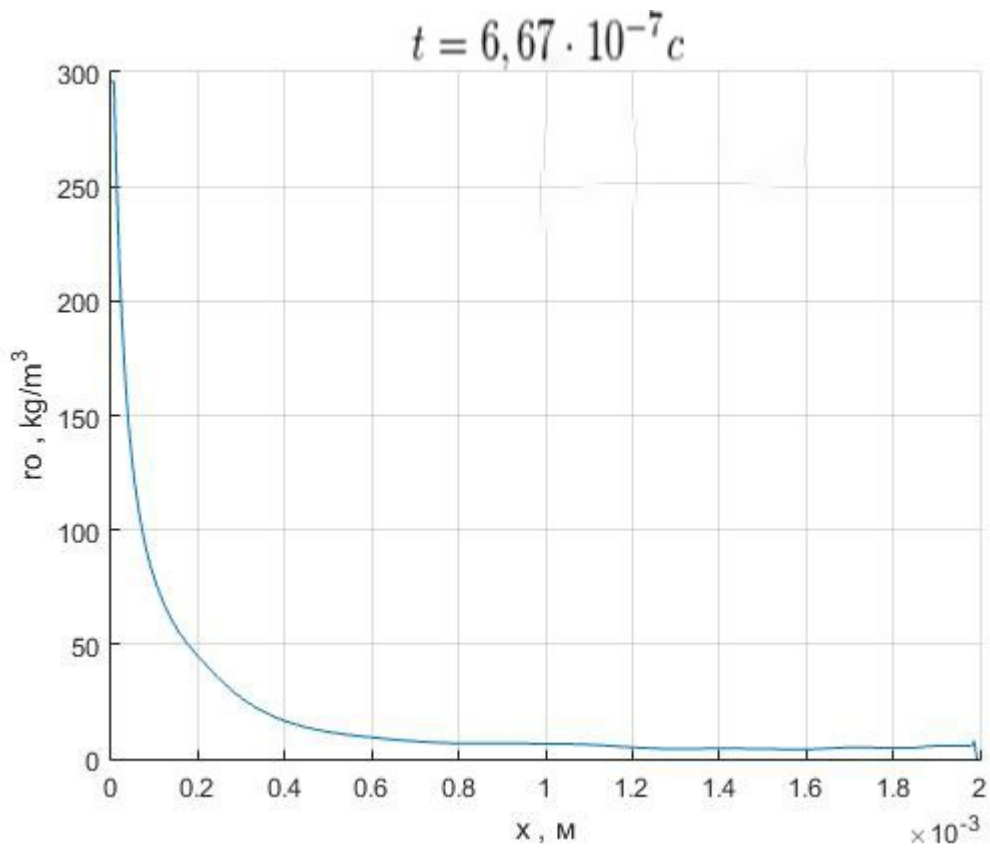


Рис. 10. Зависимость плотности от координаты, $t = 6,67 \cdot 10^{-7} c$

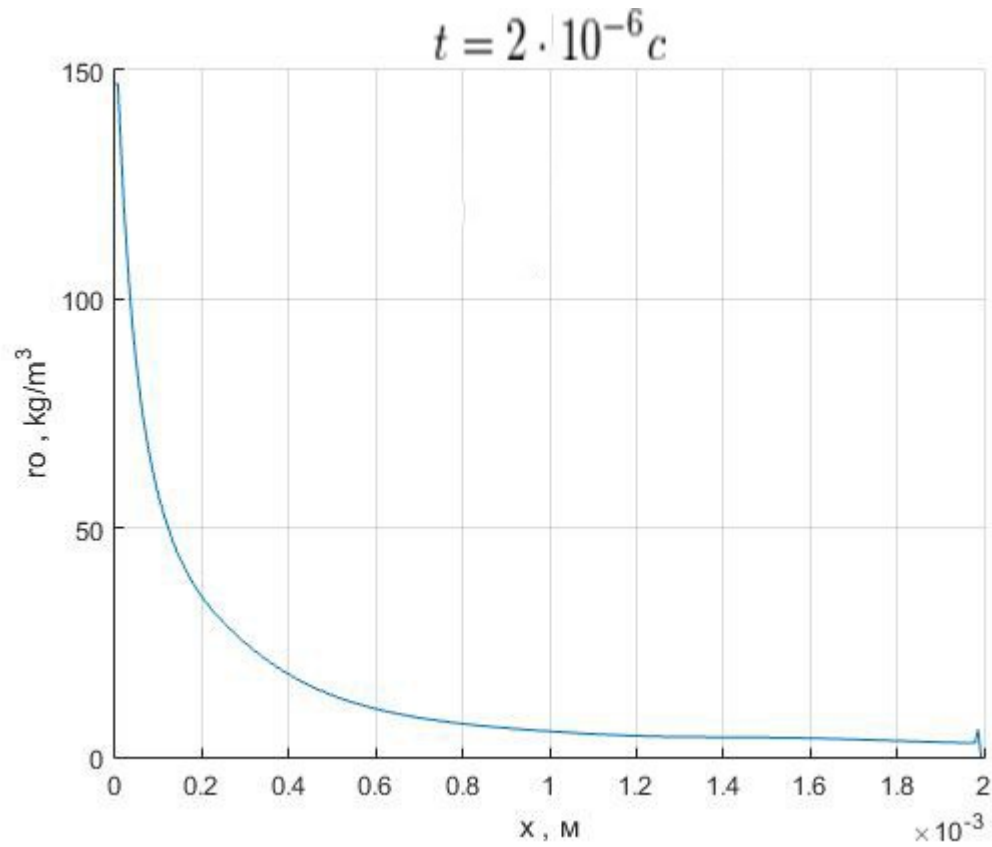


Рис. 11. Зависимость плотности от координаты, $t = 2 \cdot 10^{-6} \text{ c}$

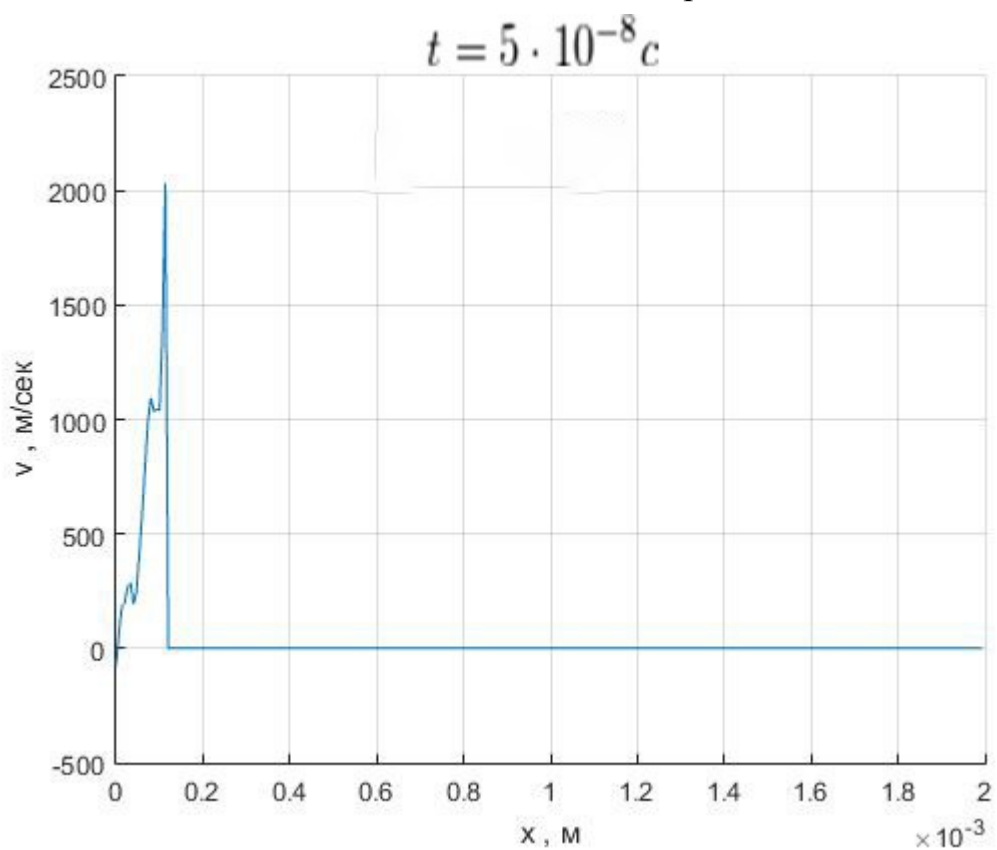


Рис. 12. Зависимость скорости от координаты, $t = 5 \cdot 10^{-8} \text{ c}$

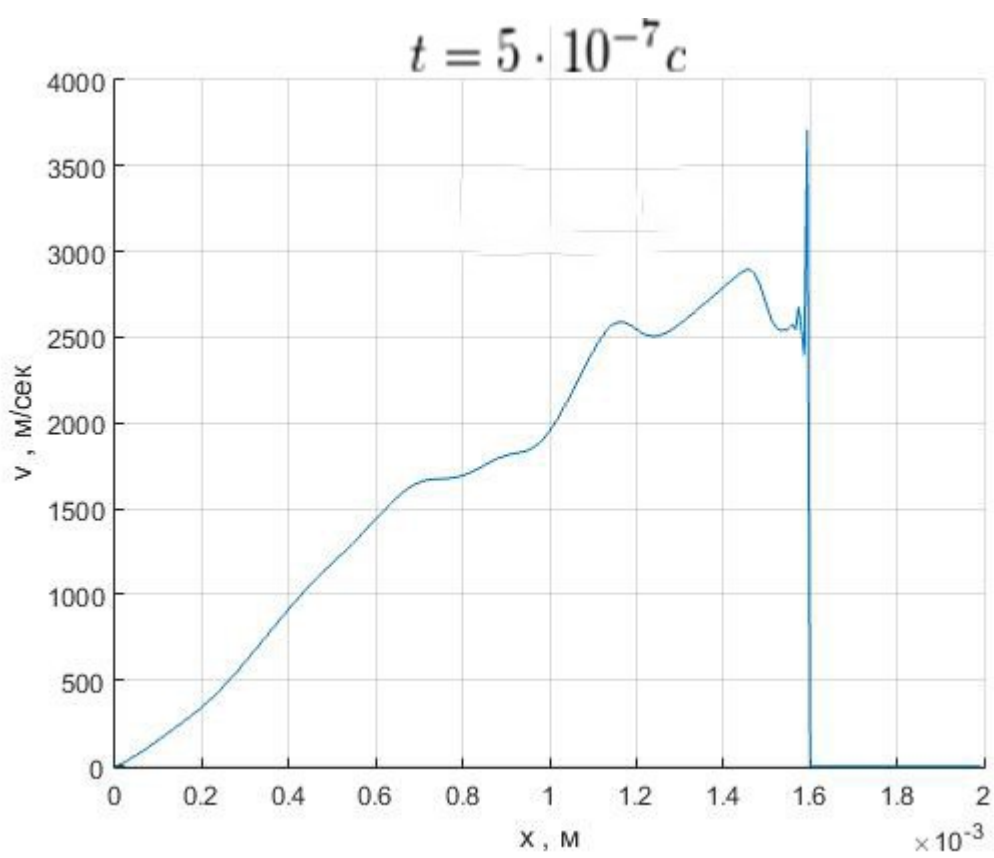


Рис. 13. Зависимость скорости от координаты, $t = 5 \cdot 10^{-7} \text{ c}$

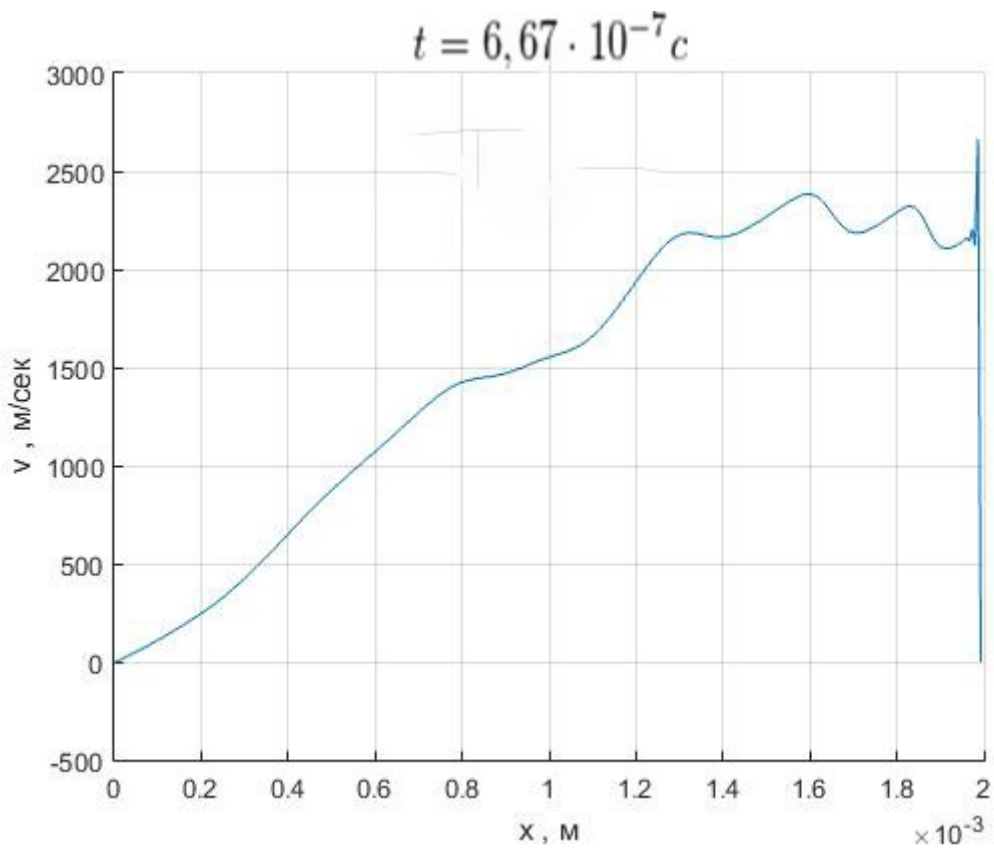


Рис. 14. Зависимость скорости от координаты, $t = 6,67 \cdot 10^{-7} \text{ c}$

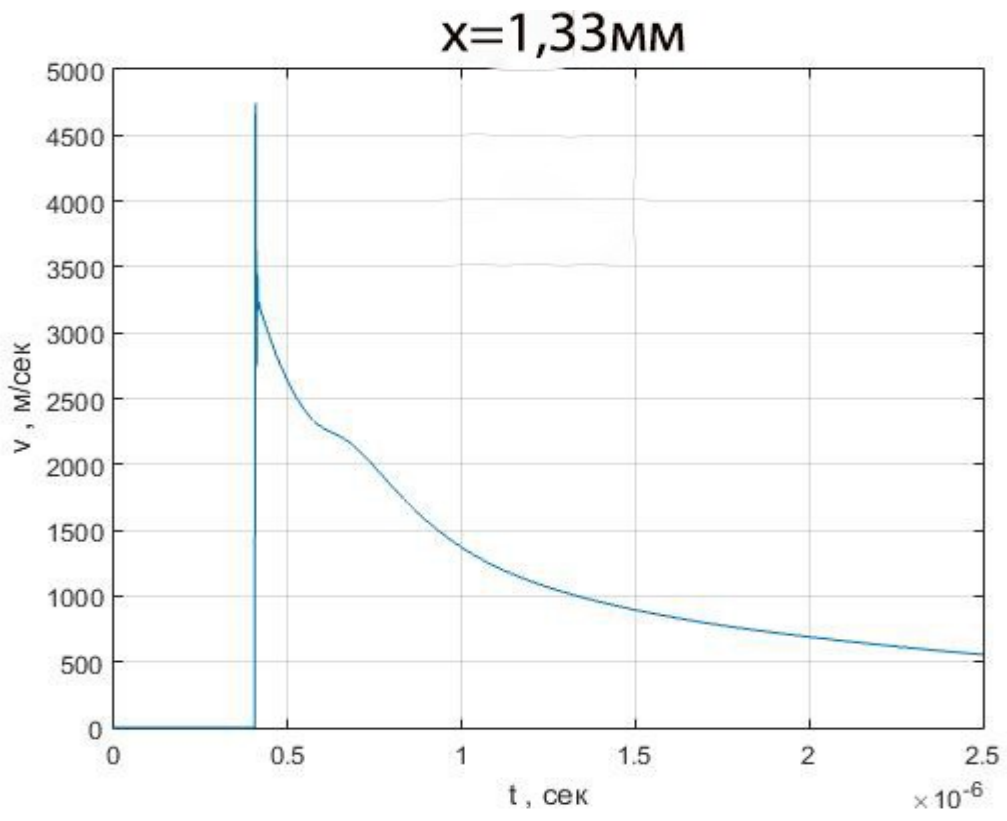


Рис. 15. Зависимость скорости от времени, $x=0,33$ мм

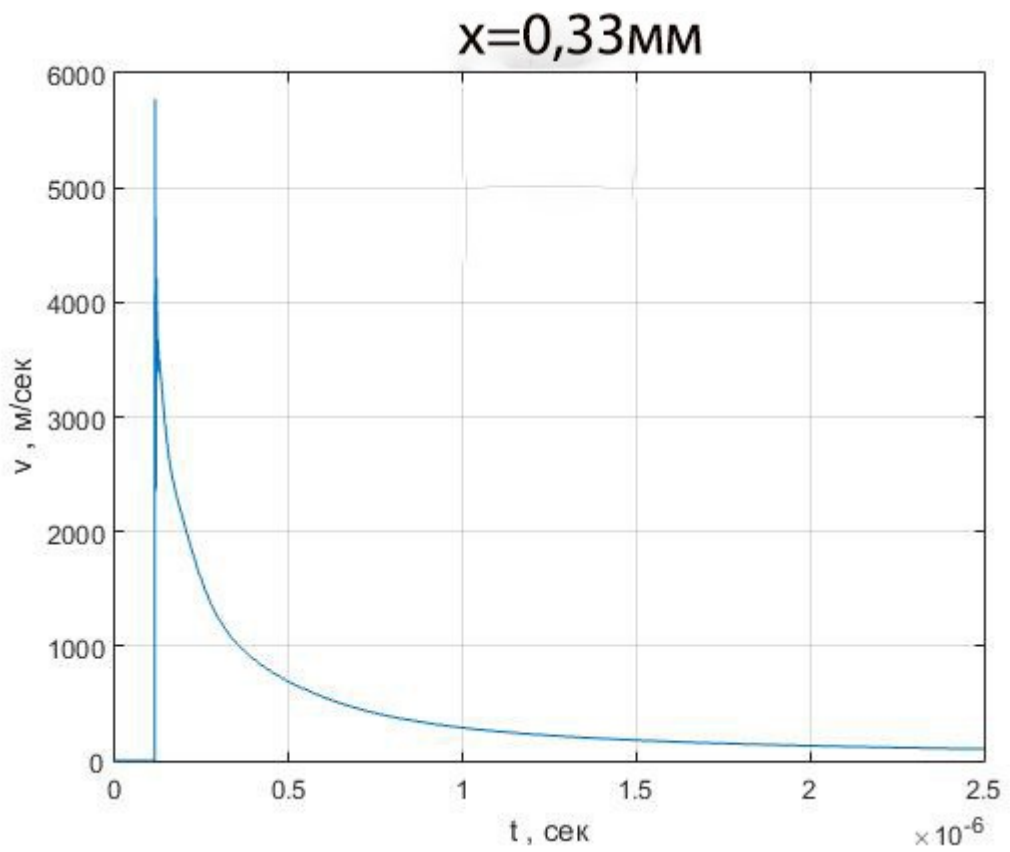


Рис. 16. Зависимость скорости от времени, $x=1,33$ мм

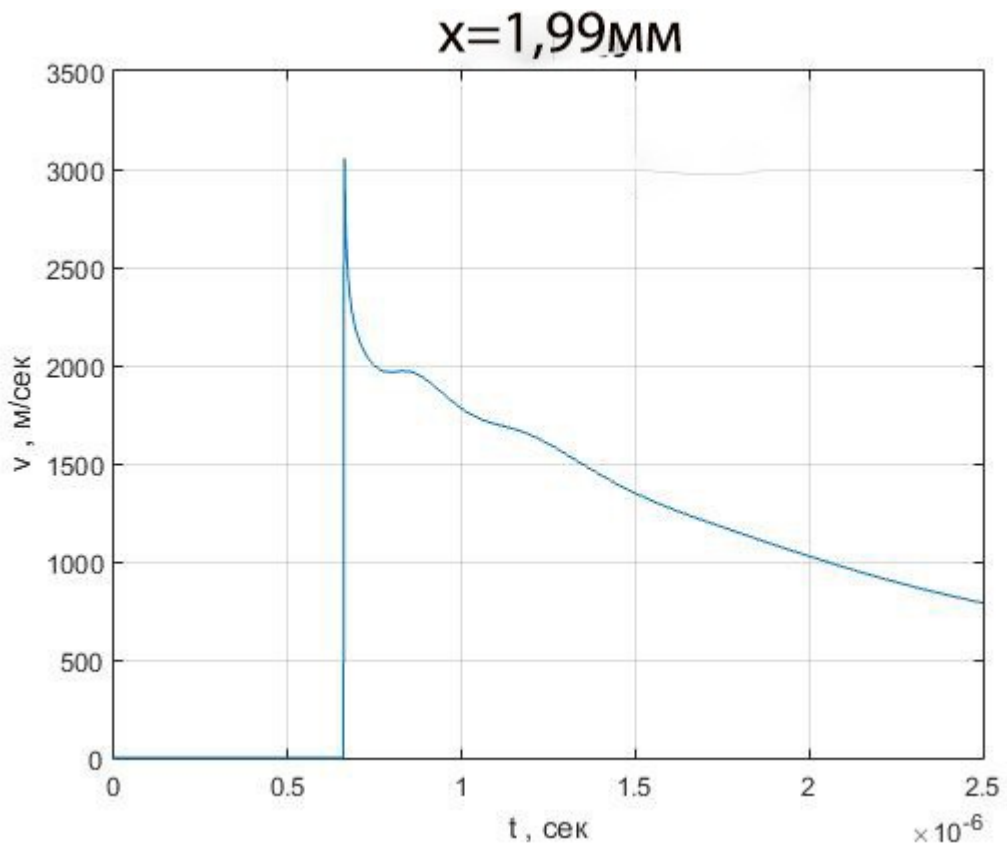


Рис. 17. Зависимость скорости от времени, $x=1,99\text{мм}$

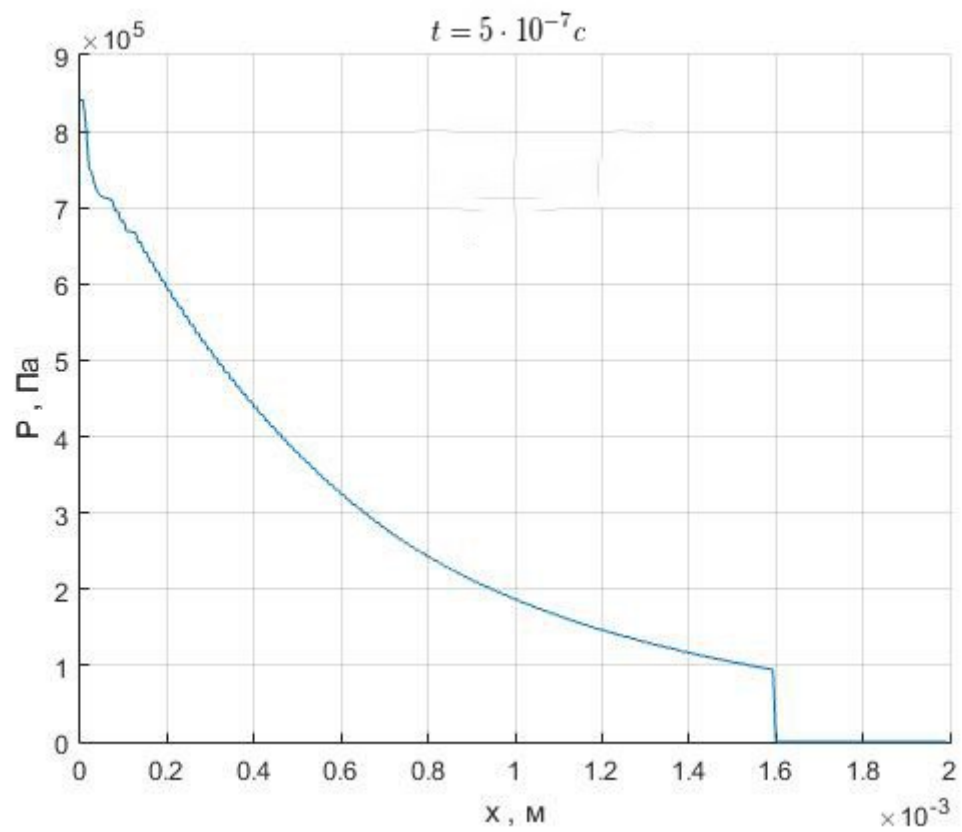


Рис. 18. Зависимость давления от координаты, $t=5 \cdot 10^{-7} \text{с}$

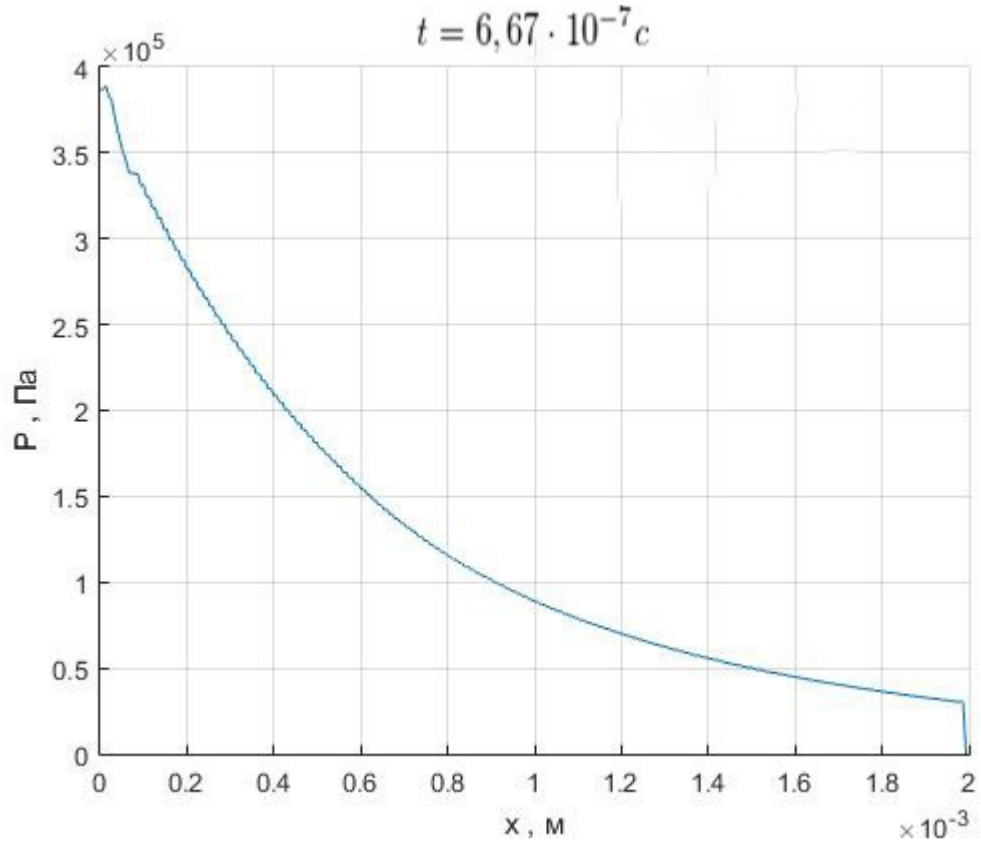


Рис. 19. Зависимость давления от координаты, $t = 6,67 \cdot 10^{-7} \text{ c}$

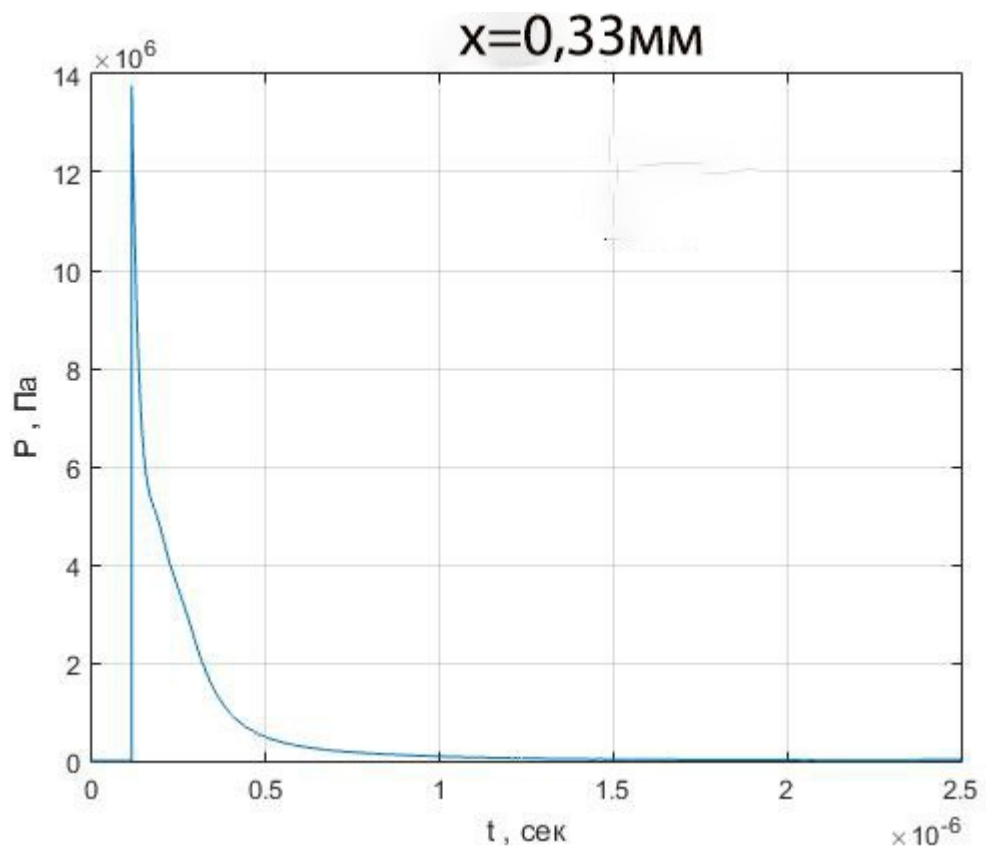


Рис. 20. Зависимость давления от времени, $x = 0,33 \text{ мм}$

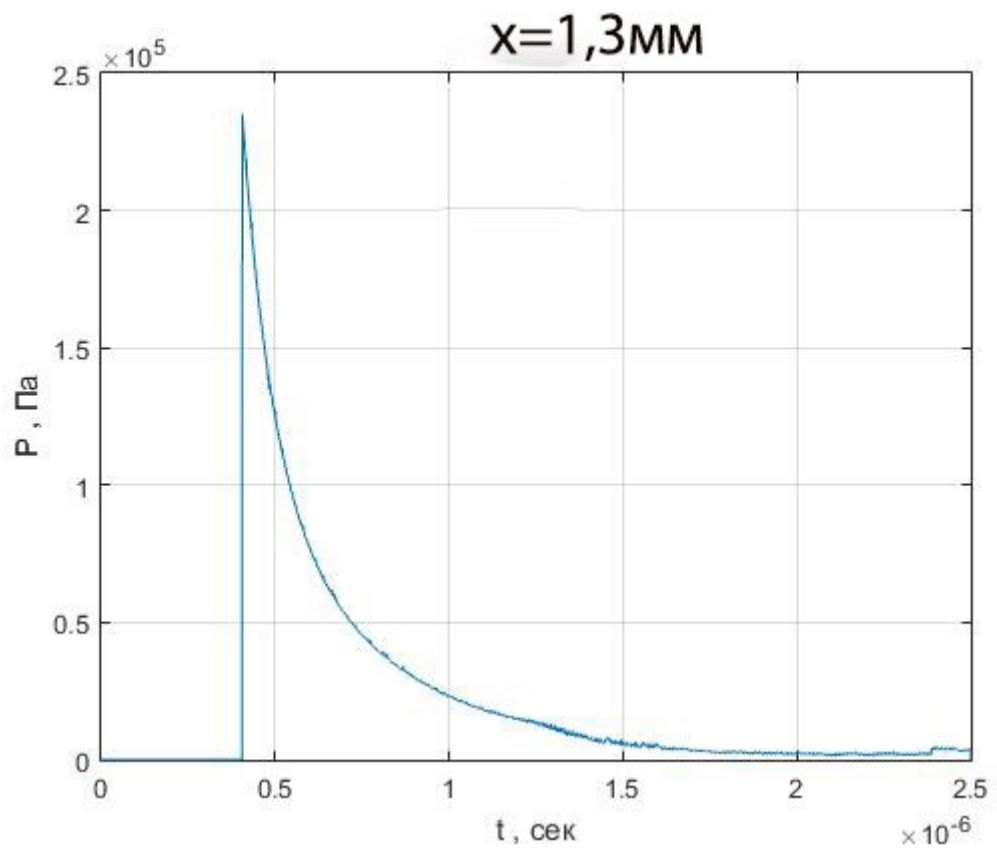


Рис. 21. Зависимость давления от времени, $x=1,3\text{мм}$

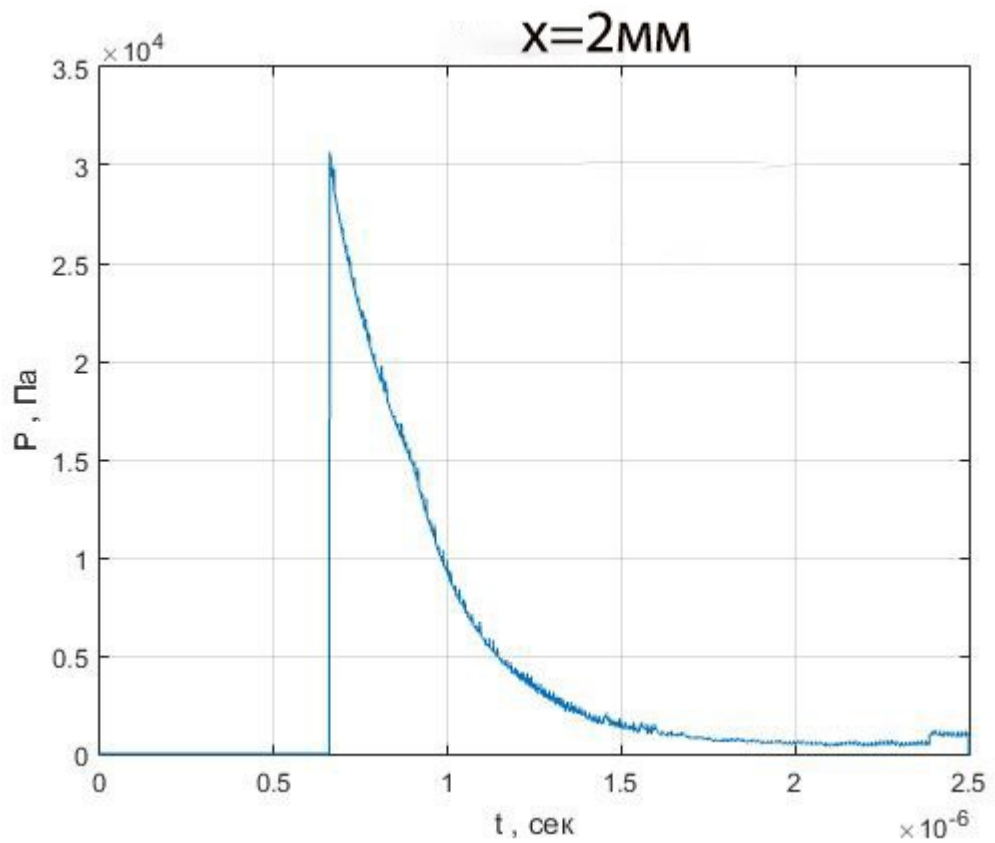


Рис. 22. Зависимость давления от времени, $x=2\text{мм}$

Экспериментальные данные по скорости и давлению в момент соударения частиц с преградой совпадают по порядкам величин со скоростью и давлением, рассчитанными по представленной модели. Скорость частиц, полученная из эксперимента, лежит в диапазоне 2200- 3000 м/с, а расчётная скорость составляет 3000 м/с. Давление из эксперимента при соударении частиц с преградой находится в пределах (0.01-0.1) МПа, что также близко к расчетным данным.

6. Выводы

Таким образом, в данной работе получены результаты решения задачи по разлету в вакуум и взаимодействию с преградой мелкодисперсных частиц при электрическом взрыве алюминиевого проводника под действием высокоамплитудного короткого импульса тока. Решение проведено в одномерном варианте с помощью численного метода «крупных частиц». Полученные результаты представлены в виде графиков зависимости параметров задачи: плотности, массовой скорости и давления в координатно-временном пространстве. Результаты расчета соответствуют данным, полученным из эксперимента.

Литература

1. Садонин Н.Е., Сушкевич Н.В., Шагапов А.А. Космический мусор и его влияние на работоспособность космических аппаратов. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Т. 2. № 10. С. 376-377.
2. Бурмистров В.В., Зайцев М.А., Казаков Р.Р., Казаков Р.Р., Трофимов И.А. Виды защит космических аппаратов от космического мусора. Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2015. № 649. С. 144-152.
1. Морозов В.А., Шипилов С.С. Моделирование разлета мелкодисперсных частиц при электрическом взрыве проводников. Вестник СПбГУ. Сер. 1. 2012. Вып.1. С.96-101
2. Морозов В.А., Шипилов С.С. Разлет вещества в вакуум и взаимодействие с преградой мелкодисперсных частиц при электрическом взрыве проводников. Избранные труды международной научной конференции по механике. Шестые Полиховские чтения, С-Петербург, 31 января - 3 февраля 2012г. - М.: Издатель И.В. Балабанов, 2012, С. 285-290.
3. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. — 392 с.