

Аннотация

Целью работы являлось определение профиля электропроводности и её максимального значения в момент детонации гексогена с добавлением углеродных нанотрубок. Для этой цели использовалась установка высокого разрешения, разработанная ранее в лаборатории физики взрыва института гидродинамики. На основании полученных данных построен график зависимости электропроводности вещества в различных участках детонационной волны. Максимальное значение удельной проводимости составляет $3,99 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Проведены сравнения с результатами похожих исследований и исследований гексогена без примесей. Сделаны предположения о механизме проводимости углеродных нанотрубок. Оценены погрешности полученных значений.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, электропроводность, одностенные нанотрубки, проводимость

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Марченко Артур Всеволодович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Получение профиля электропроводности при детонации гексогена с
нанотрубками при плотности $1,65 \text{ г/см}^3$**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18311

Научный руководитель:

Сатонкина Н. П.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Морозов И. И.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Оглавление

1. Введение	3
2. Теоретическая часть	3
3. Экспериментальная часть	5
3.1 Описание установки	5
3.2 Методика измерений	6
3.3 Результаты измерений	9
4. Обработка результатов	10
4.1 Анализ результатов	10
4.2 Оценка погрешностей	11
5. Выводы	12
Список литературы	13

1. Введение

Природа электропроводности взрывчатых веществ (ВВ) при детонации до сих пор является объектом исследований, однако известно, что различные параметры во фронте детонационной волны существенным образом зависят от начальной структуры заряда. В частности, уменьшение размеров частицы ВВ до десятков-сотен нанометров изменяет чувствительность материала к механическим воздействиям, критическую толщину детонирующего слоя. Подобные явления позволяют судить о характерных масштабах процесса детонации и дают возможность получить объяснение повышенной электропроводности путём проведения экспериментов с ВВ, примеси в которых имеют размеры десятков нанометров.

Отсутствие общепризнанной теории проводимости приводит к необходимости разработки своей или проверки чужой гипотезы. Изучив результаты и предложенную модель из [1], было принято решение исследовать механизм проводимости по углеродным сеткам, основанный на предположении о корреляции между максимальной электропроводностью и содержанием свободного углерода в продуктах детонации.

Целью работы является измерение профиля электропроводности гексогена с примесями в виде одностенных углеродных нанотрубок при детонации, сравнение результатов с аналогичными экспериментами с чистым гексогеном и объяснение различий между ними.

Основным параметром изучения является профиль электропроводности в зависимости от времени.

2. Теоретическая часть.

Детонацией называется процесс, при котором по веществу проходит ударная волна, вызывающая химическую реакцию горения, которая поддерживает распространение этой волны. Сама ударная волна является

так называемым фронтом детонационной волны. Непосредственно за фронтом волны находится слой вещества, в котором чрезвычайно быстро протекают химические реакции называемый, соответственно, зоной химической реакции. В ней выделяется энергия, поддерживающая параметры ударной волны. Концом зоны химической реакции является поверхность Чепмена-Жуге, в которой заканчиваются химические превращения и начинается разлёт продуктов детонации.

Поскольку нет общей теории проводимости ВВ при детонации, существует несколько предположений на этот счёт. Остановимся на гипотезе контактной проводимости по углеродным структурам из [1]. На основании многих экспериментов (рис. 1) было выдвинуто предположение о существовании сеток во взрывчатых веществах с почти металлической проводимостью. На роль подобного проводника претендует углерод.

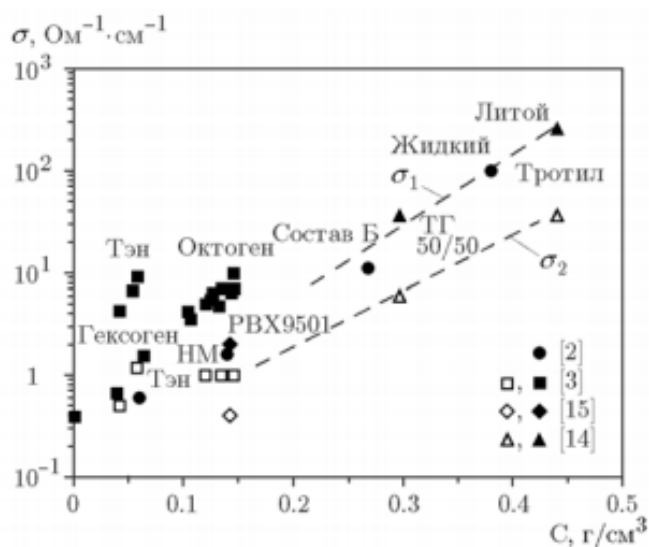


Рис. 1.

Электропроводность в зоне химической реакции (темные точки и линия σ_1) и вне ее (светлые точки и линия σ_2) в зависимости от содержания твердого углерода в продуктах детонации [2]

Из рис. 1 можно выделить две примерно параллельные прямые, каждая из которых демонстрирует влияние плотности ВВ. Отдельно для каждого ВВ прослеживается тенденция к увеличению электропроводности с

увеличением плотности и удельного содержания углерода, что приводит к выводам о возможной корреляции между максимальной электропроводностью и содержанием углерода в веществе.

3. Экспериментальная часть

3.1 Описание установки

Для получения данных об электропроводности ВВ, в нашем случае – гексогена с одностенными углеродными нанотрубками плотностью $1,65 \text{ г/см}^3$, использовалась установка, схема которой указана на рис. 2.

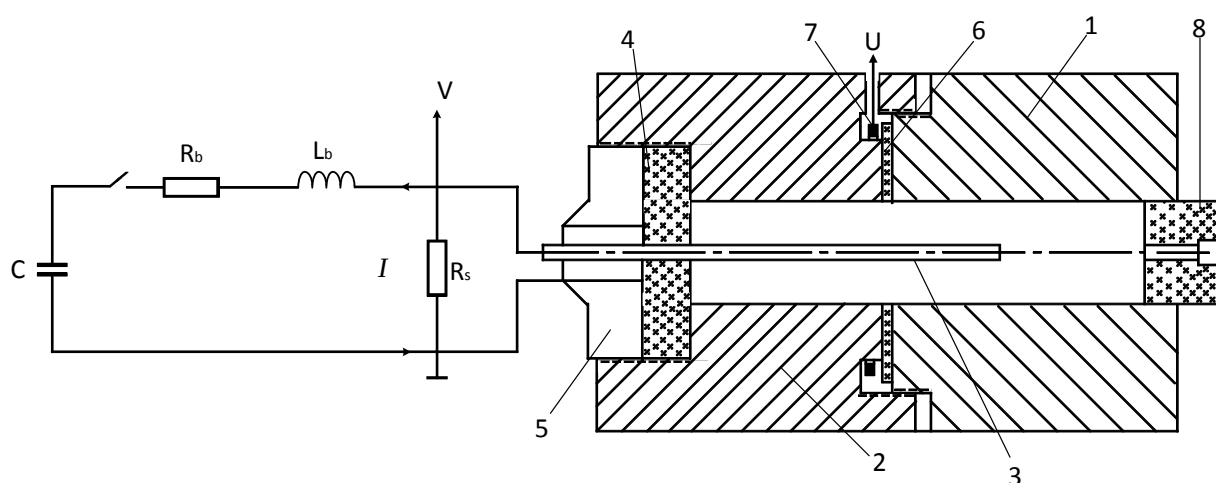


Рис. 2. Схема установки измерения профиля электропроводности: 1, 2 – Детали внешнего электрода, медная оболочка; 3 – осевой медный электрод; 4 – пробка из оргстекла; 5 – полый болт; 6 – диэлектрик; 7 – тороидальная катушка; 8 – пробка из оргстекла для детонатора.

Оболочкой, одновременно являющейся электродом, является медный цилиндр 1, 2 с коаксиальной полостью диаметром 8 мм и слоем диэлектрика толщиной 0,3 мм 6 с катушкой индуктивности 7. В цилиндрическую полость помещён тонкий цилиндрический медный электрод 3 с диаметром 2 мм. Центральный электрод крепится в пробке из оргстекла 4, прижатой полым болтом 5. Электроды подключены в схему постоянного тока. Пространство между электродами заполняется взрывчатым веществом. В случае непроводящего в обычных условиях ВВ происходит следующий процесс: при выходе детонационной волны на

осевой электрод цепь ячейки замыкается проводящей областью за фронтом. Ток ячейки обтекает полость датчика, создавая магнитный поток в катушке и импульс напряжения на ней. Когда фронт волны проходит мимо щели диэлектрика, часть тока переключается на ближайший участок внешнего электрода. Ток, который обтекает полость, и магнитный поток уменьшаются и образуют импульс напряжения датчика U обратной полярности. В случае проводящего ВВ процессы протекают более сложным образом, что стоит учитывать в анализе результатов.

Заполнение полости взрывчатым веществом производится вручную. Взрыв вызывается электродетонатором через пробку из оргстекла с каналом, радиуса 1,2мм, заполненным гексогеном. Ось канала центрируется с осью основной установки, а его размеры позволяют сохранить разрешение методики измерения даже при несовпадении осей вплоть до смещения на радиус. Тем не менее неточности при установке детонатора приводят к искажению формы фронта детонационной волны (так называемое “размытие“ фронта), что следует помнить при подсчёте погрешностей.

3.2 Методика измерений

Для фиксирования сигнала малой длительности применялся цифровой осциллограф с шириной полосы 2,5 ГГц, при интервале выборки 0,4 нс. На рис. 3 изображены показания осциллографа за время проведения эксперимента (сверху) и непосредственно участок повышенной проводимости (снизу). Начальный сигнал отрицательной полярности вызван стартовым током при подключении ячейки.

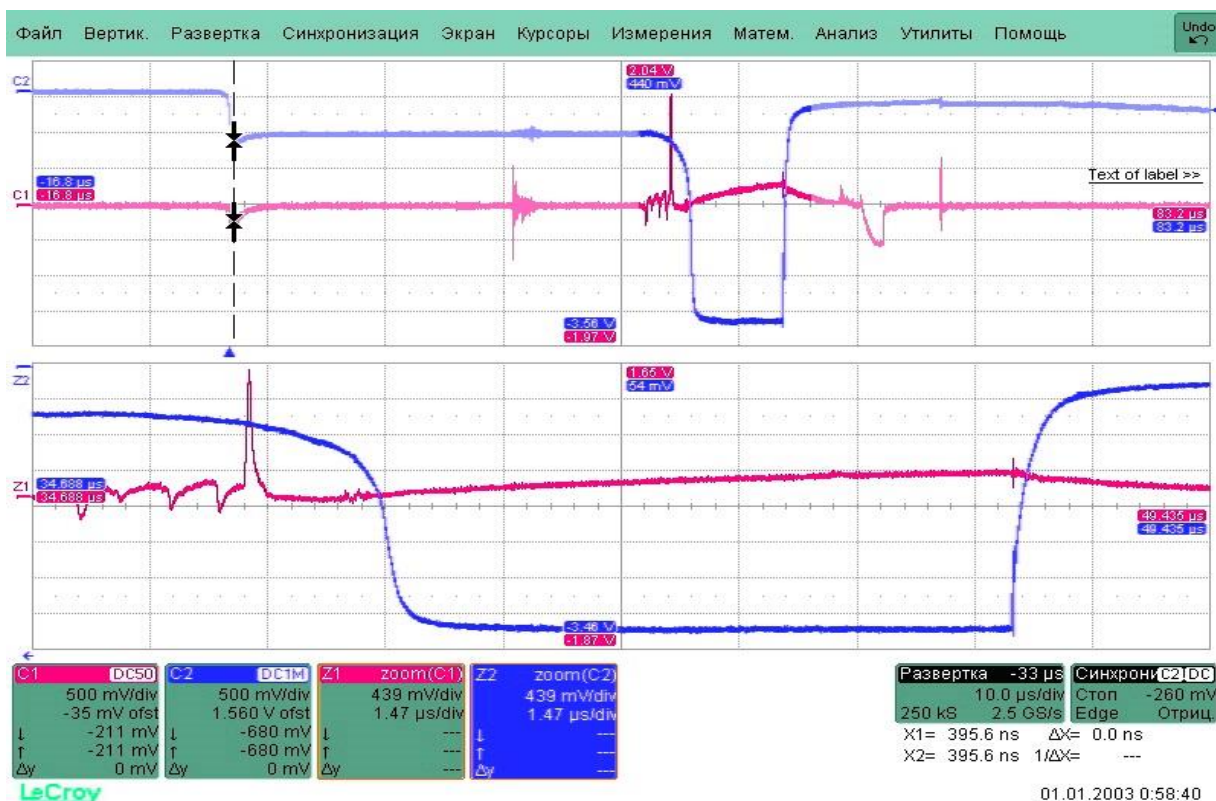


Рис. 3 Осциллограмма при детонации. Синий – сигнал с шунтирующего сопротивления, розовый – сигнал с датчика (катушки).

Для подсчёта электропроводности решим вспомогательную задачу. Рассмотрим систему электродов (рис. 4) нашей ячейки с радиусом осевого электрода a и радиусом полости b . Запишем теорему Гаусса для аксиально симметричной системы в цилиндрических координатах.

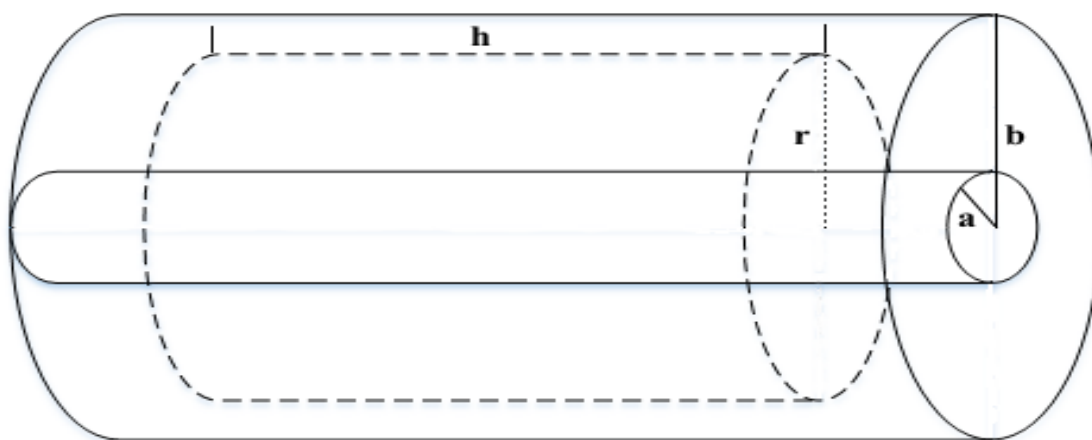


Рис. 4 Аксиально симметричная система электродов

$$\oint DdS = 4\pi Q$$

Где $Q = \kappa \cdot h$ - заряд на центральном электроде, κ – линейная плотность заряда. Примем $\varepsilon = 1$, что соответствует нашему эксперименту. Тогда

$$E \cdot 2\pi r \cdot h = \kappa \cdot h \cdot 4\pi \quad (1)$$

Откуда можно получить разность потенциалов

$$\Delta\varphi = \int_a^b E dr = \frac{4\pi \cdot \kappa}{2\pi} \int_a^b \frac{dr}{r} = 2\kappa \cdot \ln \frac{b}{a} \quad (2)$$

Из дифференциального закона Ома с учётом постоянства проводимости имеем

$$\begin{cases} I = \int j dS \\ j = \sigma E \end{cases} \rightarrow I = \int \sigma E dS = 2\pi r \cdot h \cdot \sigma E \quad (3)$$

Подставляя E из (1) в (3) получаем

$$I = 2\pi r \cdot h \cdot \sigma \cdot \frac{2\kappa}{r} = 4\pi\sigma h \quad (4)$$

Из определения сопротивления, подставляя (2) и (4)

$$R = \frac{\Delta\varphi}{I} = \frac{2\kappa \cdot \ln \frac{b}{a}}{4\pi\sigma h} = \frac{\ln \frac{b}{a}}{2\pi\sigma h}$$

Откуда

$$\sigma = \frac{\ln(b/a)}{2\pi h R} \quad (5)$$

Именно формула (5) является основой для вычисления электропроводности, которая в условиях нашей задачи, после некоторых более сложных преобразований принимает вид

$$\sigma(t) = \frac{\ln(b/a)}{2\pi D M} \cdot \frac{U(t)}{V} \quad (6)$$

Где D -скорость фронта детонационной волны, M -коэффициент взаимной индуктивности катушки и контура с током, V -напряжение между электродами, а $U(t)$ -напряжение на датчике (катушке), фиксируемое осциллографом.

Помимо величины электропроводности оценивалась и ширина её пика. Для этого фиксировалось время точки перегиба (начальное время) так называемой “полки” на графике электропроводности от времени, а в точке спада и точке Чепмена-Жуге строились касательные к графику. По пересечению касательных находилось конечное время, после чего имеющийся промежуток времени умножался на скорость детонационной волны.

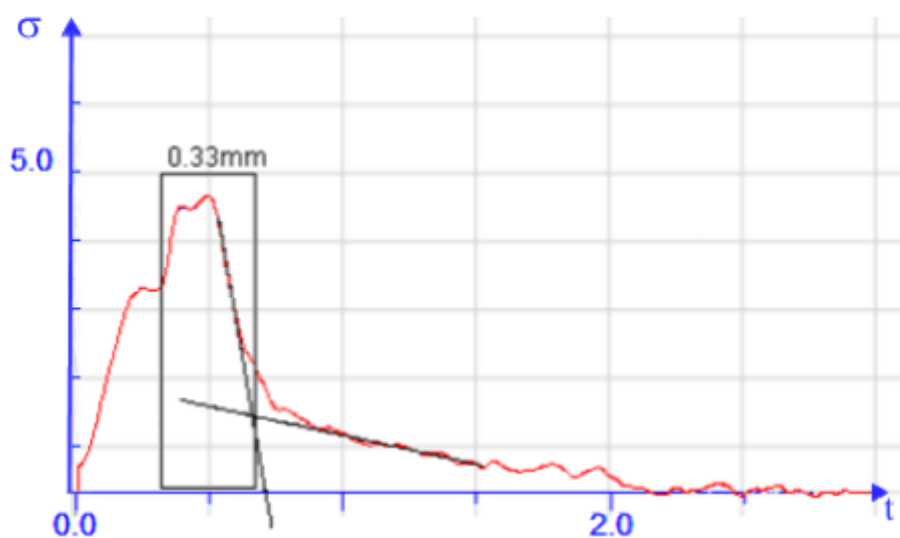


Рис. 5

Пример расчёта ширины пика. Область повышенной проводимости аппроксимируется прямоугольником. σ —проводимость, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$, t —время, мкс.

3.3 Результаты измерений.

Используя формулу (6), был произведён расчёт электропроводности гексогена с нанотрубками в зависимости от времени (рис. 6). Максимальное значение электропроводности составляет $3,99 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$.

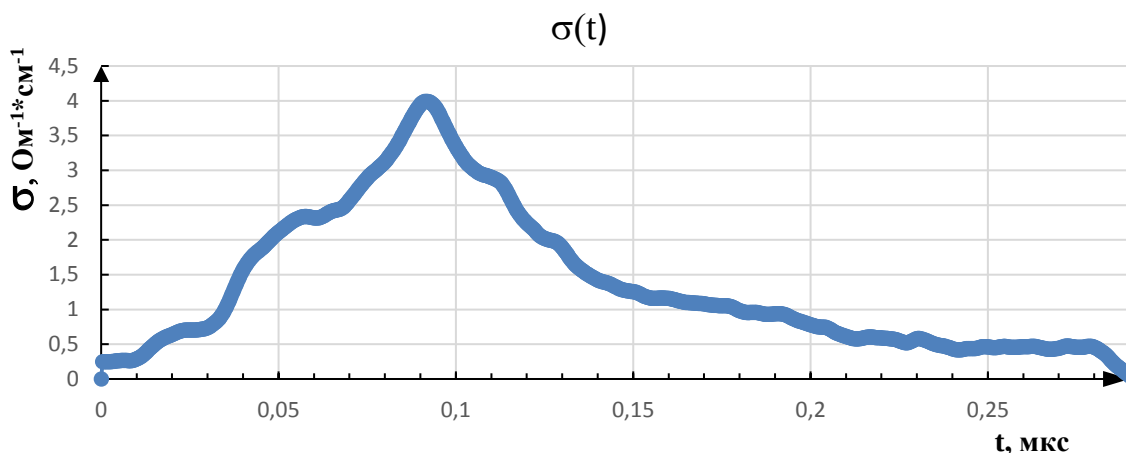


Рис. 6. Зависимость проводимости гексогена с нанотрубками от времени
Ширина пика электропроводности оценивается в 0,37 мс.

4. Обработка результатов

4.1 Анализ полученных данных

Проведём сравнение результатов нашего эксперимента с данными других экспериментов, взятых из [2]. На рис. 5 представлены показания электропроводности в зависимости от времени для гексогена без примесей (гексоген б. п.) и экспериментов для гексогена с нанотрубками (гексоген с н. т.), включая наш (гексоген с н. т. (3)).

Полученные нами данные похожи на результаты прошлых экспериментов с гексогеном с нанотрубками. Среди отличий от результатов с гексогеном без примесей можно выделить уширение профиля электропроводности ВВ с нанотрубками, а также снижение максимального значения. Вероятно, такие различия обуславливаются замедленным разрушением нанотрубок после завершения основной реакции гексогена. После примерно 0,2 мкс величина проводимости как в опыте с чистым гексогеном, так и с добавлением нанотрубок становится одинаковой. Можно полагать, что здесь вклад нанотрубок минимален, т. е. к этому моменту они уже разрушаются.

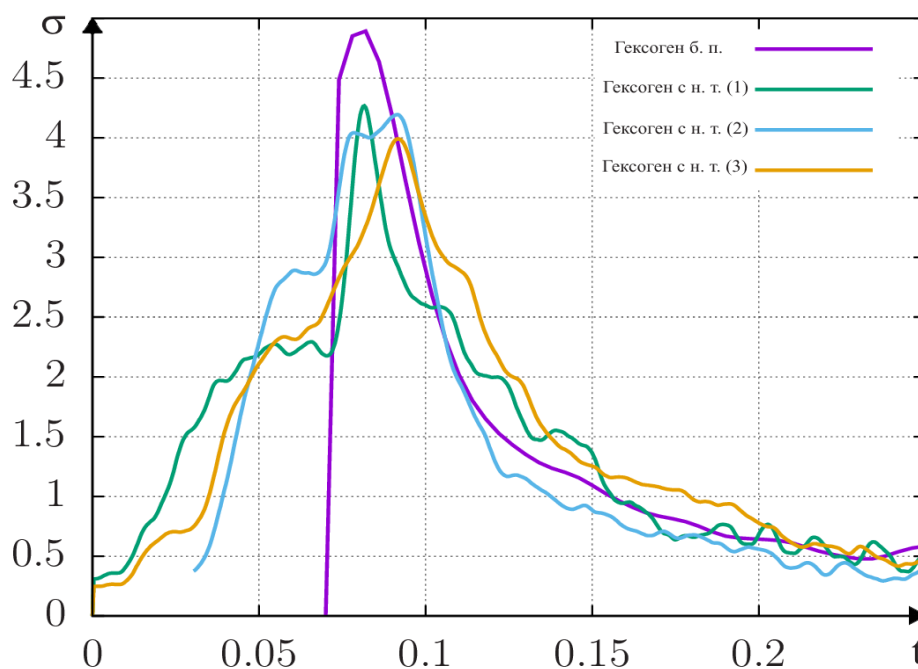


Рис. 5.

Проводимость σ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ чистого гексогена и гексогена с нанотрубками в зависимости от времени t , мкс.

4.2 Оценка погрешностей

Основная часть погрешности приходится на индуктивность катушки, полости и взаимную индуктивность, которые “заваливают данные”. Свой вклад вносят неоднородность заряда и искривление фронта детонации, являющиеся случайной величиной. Погрешность осциллографа незначительна и вместе с ошибкой измерения сопротивления шунта, линии, индуктивности и пр. даёт ошибку в 5%. С учётом всего вышеперечисленного погрешность полученных данных можно оценить в 15%. Поскольку нас интересует сравнение величин электропроводности, а не их точное значение, эти погрешности не повлияют на выводы работы.

5. Выводы

По проведённому экспериментальному исследованию гексогена с нанотрубками выяснилось, что максимальная величина проводимости ВВ и непосредственно профиль электропроводности заметно отличаются от его беспримесного аналога. Несмотря на сложности интерпретации, такой результат является демонстрацией зависимости проводимости ВВ от добавления наноматериалов и не противоречит гипотезе контактной проводимости по углеродным структурам. Тем не менее, по сей день остаётся необходимость проведения множества дополнительных исследований для изучения как в целом гипотезы проводимости, так и в частности механизма горения нанотрубок, чтобы выдвинуть полноценную теорию электропроводности во время детонации.

Список литературы

1. Сатонкина Н. П. Связь электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ с содержанием в них углерода // *Физика горения и взрыва*, 2016, т. 52, №4, С 129-133
2. A.O. Kashkarov, A.P. Ershov, E.R. Prueel, I.A. Rubtsov, N.P. Satonkina, K.A. Ten, G.R. Dashapilov, Nanostructured Composites of Explosives and Single-Walled Carbon Nanotubes. Proceeding of 16th International
3. Гилев С. Д. Электродинамические процессы при ударном сжатии конденсированных сред: диссертация д-ра физ.-мат. наук // Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. — Новосибирск, 2009.
4. Ершов А.П., Сатонкина Н.П., Иванов Г.М. Профили электропроводности в плотных взрывчатых веществах // *Журнал Химическая физика*. 2007. Т. 26, №12.
5. Ершов А.П., Сатонкина Н.П., Иванов Г.М. Распределение электропроводности при детонации прессованного взрывчатого вещества // *Письма в Журнал технической физики*. 2004. Т. 30, №24. С. 63-69.
6. Давыдова О.Н., Кузнецов Н.М., Лавров В.В., Шведов К.К. О недосжатой детонации конденсированных ВВ с инертными примесями // *Журнал Химическая физика*. 1999. Т. 18, №4. С. 53-66.