

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Хорунженко Аркадий Сергеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Получение профиля электропроводности  
при детонации гексанитростильбена**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18345

**Научный руководитель:**

Сатонкина Н.П.

Оценка научного руководителя

« 25 » \_\_\_\_\_ Ноября \_\_\_\_\_ 2019г.

**Преподаватель практикума**

Павлов А.А.

Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_г.

**Куратор практикума:**

Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_г.

## Аннотация

Целью работы было получение распределения электропроводности при детонации гексанитростильбена на установке высокого разрешения, разработанной ранее в лаборатории физики взрыва Института гидродинамики.

Профилю электропроводности гексанитростильбена присущи следующие особенности: узкая зона длительностью около 150 нс, максимум электропроводности  $\sigma_{\max}$  величиной  $6 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ , значение  $\sigma$  в волне разгрузки Тейлора значительно ниже – около  $0.8 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ . Область высоких значений принято связывать с зоной химической реакции. Таким образом, была получена динамика проводимости в самой сложной для исследования области – зоне химической реакции. Качественно профиль электропроводности соответствует полученным для большинства исследованных ВВ.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, электропроводность, зона химической реакции, проводимость.

## **Оглавление**

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Введение .....</b>                          | <b>4</b>  |
| <b>2. Теоретическая часть .....</b>               | <b>4</b>  |
| <b>3. Описание эксперимента .....</b>             | <b>7</b>  |
| 3.1. Методика измерений .....                     | 7         |
| 3.2. Описание установки .....                     | 10        |
| 3.3. Результаты измерений .....                   | 10        |
| <b>4. Анализ результатов измерений .....</b>      | <b>11</b> |
| 4.1. Обработка результатов .....                  | 11        |
| 4.2. Оценка погрешностей .....                    | 11        |
| <b>5. Обсуждение полученных результатов .....</b> | <b>12</b> |
| <b>Список литературы .....</b>                    | <b>14</b> |
| <b>Приложение .....</b>                           | <b>16</b> |

## 1. Введение

Кинетика химической реакции при детонации взрывчатых веществ является важным вопросом, который многие годы не теряет своей актуальности для разных сфер деятельности человека. Детальная информация о ширине зоны реакции и о структуре данной зоны пока не была получена ни на экспериментальном ни на теоретическом уровнях. Эта задача является одной из самых сложных в физике взрыва и до сих пор изучена не до конца.

*Целью данной работы* является изучение электропроводности за фронтом детонации и получение численных показателей распределения электропроводности. Изучение ширины зоны реакции и её структуры имеют прикладное значение, так как взрывчатые вещества используют в промышленности, в науке и, например, при горнодобывающих работах. Поэтому нам важно знать все его характеристики для верного выбора взрывчатого вещества в определённых условиях.

Задачами работы было измерение скорости детонации взрывчатого вещества и использование данных для нахождения распределения электропроводности.

В работе применялись экспериментальный метод измерения. При помощи осциллографа, определялся профиль электропроводности взрывчатого вещества в зависимости от времени.

При выполнении курсовой работы и подготовке отчета использовалась научная литература [1-10].

## 2. Теоретическая часть

Взрывом называют быстропротекающий, термодинамический необратимый физический или физико-химический процесс, сопровождающийся выделением энергии за короткий промежуток времени и приводящий к тепловым, вибрационным или ударным воздействиям на окружающее пространство. Чаще

всего взрыв связан с большим разогревом вещества в очаге взрыва и превращением его в газ или плазму высокого давления, которые, расширяясь, совершают механическую работу. Во время взрыва совершается большая механическая работа, чем и определяется разнообразие их взрывов в научной и промышленной деятельности человека. Хотя коэффициент полезного использования, выделяющейся при взрыве энергии, ввиду сильной неравновесности процесса, мал и часто не превышает 12%, тем не менее взрывы зачастую оказываются единственно доступными и незаменимыми источниками для получения большой импульсной мощности.

Взрывчатыми веществами (ВВ) называются химические соединения или смеси таких соединений, которые в результате инициирующего внешнего воздействия способны к быстрому самораспространяющемуся превращению, с выделением большого количества энергии и образованием газообразных продуктов. В результате быстрого образования раскаленных газов, нагретых до высокой температуры за счёт теплоты реакции, происходит сильное повышение давления. При дальнейшем расширении сжатых газообразных продуктов реакции их внутренняя энергия переходит в механическую работу (дробление, перемещение, раскалывание и отброс элементов окружающей среды) – так происходит взрыв. ВВ могут быть конденсированными, газообразными, в виде взвеси твёрдых или жидких частиц в газах. На практике обычно применяют конденсированные ВВ, главным образом твёрдые, а также смеси и коллоидные растворы твёрдых и жидких веществ. По составу ВВ делят на индивидуальные, представляющие собой отдельные химические соединения (тротил, гексоген, тэн, нитроглицерин и др.), и смесевые, представляющие собой смесь двух или нескольких химических компонентов. В промышленной сфере обычно используют смесевые ВВ, которые отличаются низкой ценой и широкими возможностями для оптимизации свойств. По физической структуре ВВ различают на две подгруппы гомогенные (однородные, без внутренних фазовых границ) и гетерогенные. Гетерогенными являются все многофазные составы, а также пористые и дисперсные индивидуальные ВВ.

Наиболее быстрой формой протекания взрывного превращения в зарядах ВВ является детонация. Детонация есть чрезвычайно быстрый экзотермический (с выделением тепла) гидродинамический волновой процесс со скоростью, достигающей сверхзвуковых скоростей. Основное энергосодержание и изменение состояния вещества происходит во фронте волны и имеет малую толщину по сравнению с размером заряда. Фронт волны вместе с примыкающей областью движущихся продуктов взрыва образует детонационную волну (ДВ). Для ДВ характерны высокие давления, лежащие на интервале от 20 до 400 килобар для конденсированных ВВ и от 10 до 40 бар для газовых взрывчатых смесей при начальных условиях давления 1 бар. Стоит учитывать, что при нарушении начальных условий или же использовании гетерогенных взрывчатых смесей можно получить иные промежутки для давлений.

Энергия, которая выделяется в зоне реакции, обеспечивает распространение ДВ. Исследования результатов, полученных из экспериментов, сделанных ранее, показали, что ДВ распространяется без затуханий в зарядах большой длины, если поперечные размеры заряда больше критического размера, который можно определить. Обычно свойства ДВ изучают в цилиндрических задачах для удобства проведения расчетов. Для этого вводят такие понятия, как критический диаметр ВВ, критическая толщина плоского слоя ВВ, скорость ДВ. Критическим диаметром ВВ называют минимальный диаметр цилиндрического заряда, который способен детонировать при любой длине. Критической толщиной плоского слоя ВВ обычно в 1,5 - 2 раза меньше значения критического диаметра. При диаметре цилиндра больше критического обычно после возникновения детонации устанавливается практически постоянная скорость  $D$ , которая самоподдерживается ДВ. Все параметры ДВ, в том числе скорость  $D$ , зависят от плотности, состава, структуры и диаметра заряда, а также от свойств оболочки. При диаметре цилиндра большего, чем предельный диаметр зависимость от диаметра практически не влияет на скорость. Тогда детонацию называют идеальной. Скорость  $D_0$ , давление и плотность продуктов в

таком случае абсолютно определяются составом и термодинамическими свойствами ВВ. Значение  $D_0$  для конденсированных ВВ лежат в интервале от 2 до 9 км/с, для газов – от 1,5 до 3,5 км/с; значения критического диаметра для обоих ВВ лежит в промежутке от 0,01 миллиметра до 10 сантиметров.

### **3. Описание эксперимента**

Перед началом измерений необходимо подготовить медную оболочку, начинить её взрывчатым веществом, спрессовать, установить в камеру, проверить работоспособность установки, откалибровать осциллограф. В данном опыте исследуемым телом является взрывчатое вещество гексанитростильбен с плотностью 1,08 г/см<sup>3</sup>. Для исследования структуры детонационной волны электропроводность должна измеряться минимум с субмиллиметровым разрешением. Для достижения такой высокой точности необходимо воспользоваться электроконтактным методом. Здесь следует упомянуть о факторах, которые усложняют измерения электропроводности в эксперименте. В данном случае таким фактором является растекание тока при контакте электродов во время детонации.

Кроме того, растекание тока влияет на точность измерений в однородно проводящей среде за фронтом. Этот эффект вызван пространственной неоднородностью электропроводности  $\sigma$ .

Для измерения профиля электропроводности взрывчатого вещества мы использовали только экспериментальный метод, так как в данный момент не существуют доказанного теоретического метода для описания данного процесса. Экспериментальный метод подразумевает измерение профиля электропроводности во время взрыва и движения взрывной волны. После измерений посредством пакета обработки данных MS Excel находим зависимость изменения электропроводности в момент детонации и через некоторое время после него.

#### **3.1. Методика измерений**

После установки исследуемого объекта в камеру и предупреждения о взрыве можно приступать к эксперименту.

Перед проведением эксперимента необходимо провести калибровку осциллографа с целью правильной синхронизации сигнала. Это необходимо для получения корректных экспериментальных данных.

Рассмотрим суть метода, использованного в работе. В данном эксперименте использовался осциллограф с шириной полосы 2,5 ГГц, при интервале выборки 0,4 нс. Сигнал положительной полярности индуцировался стартовым током при подключении ячейки. Сигнал с катушки, который является для нас основным, начинается после 2 мкс.

По полученным данным с осциллографа был построен график. Скорость детонации  $D$  определялась по реперным точкам и расстояниям прохождения детонационной волны. Было проведено несколько экспериментов для того, чтобы гарантировать корректность полученных данных.

При выходе ДВ на осевой электрод цепь замыкается проводящей областью за фронтом. Ток обтекает полость датчика и создаёт магнитный поток в катушке, а также импульс напряжения на ней. Через некоторое время, когда фронт проходит мимо щели, часть тока переключается на внешний электрод. Ток, который обтекает полость, и магнитный поток уменьшаются и образуют импульс напряжения датчика  $U$  обратной полярности.

Найдём формулу для вычисления электропроводности от времени. Мы имеем цилиндрическую симметрию. Как можно видеть на рисунке 1 токи растекаются радиально, тогда применим теорему Гаусса

$$\oint D dS = 4\pi Q$$

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

Отсюда выразим  $E$  и найдём разность потенциалов  $\varphi$  между электродом и оболочкой

$$\varphi = \left| - \int_c^b E dr \right| = \frac{4\pi \cdot \kappa}{2\pi} \int_c^b \frac{dr}{r} = 2\kappa \cdot \ln \frac{b}{c} \quad (2)$$

Далее через дифференциальный закон Ома и определение силы тока найдём ток

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

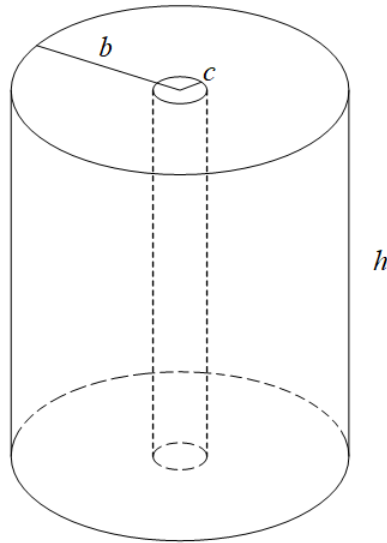


Рис. 1. Схематичный график оболочки с электродом в центре:  $c$  – радиус электрода;  $b$  – радиус заряда;  $h$  – высота оболочки.

Заменим поле  $E$  на полученное нами значение в формуле (1)

$$I(t) = 2\pi r \cdot h \cdot \sigma(t) \cdot \frac{2\kappa}{r} = 4\pi\sigma(t)h \quad (3)$$

Можем связать разность потенциалов (2) и ток (3) через интегральный закон Ома. Тогда получаем

$$R = \frac{U}{I} = \frac{2\kappa \cdot \ln \frac{b}{c}}{4\pi\sigma h} = \frac{\ln \frac{b}{c}}{2\pi\sigma h}$$

По определению сопротивления  $R = \frac{1}{G}$ , где  $G$  – проводимость, выражающаяся по формуле

$$G = \int \sigma(t) dt$$

Отсюда выражаем электропроводность  $\sigma(t)$

$$\sigma(t) = \frac{\ln(b / c)}{2\pi DM} \cdot \frac{U(t)}{V} \quad (4)$$

где  $b$  – радиус заряда,  $c$  – радиус электрода,  $\sigma$  – электропроводность,  $U(t)$  – значение сигнала с осциллографа в вольтах,  $D$  – скорость ДВ,  $M$  – коэффициент взаимной индуктивности,  $V$  – напряжение между электродами.

Все расчёты проводились в среде электронных таблиц MS Excel.

### 3.2. Описание установки

Схема установки, применявшейся в эксперименте для измерения профиля электропроводности приведена на рисунке 1. В рассматриваемом эксперименте использовалась коаксиальная система электродов. Заряд диаметром 8 мм запрессован в медную оболочку диаметра 40 мм. Через центральную ось оболочки проходит медный электрод диаметром 2 миллиметра, который крепится к пробке из оргстекла, прижатой болтом. В небольшом пространстве в месте объединения оболочки расположена тороидальная катушка с индуктивностью 0.87 мкГн. Оболочка, которая одновременно является внешним электродом, соединяется резьбой, а щель, оставшаяся рядом с тороидальной катушкой, заполняется слоем диэлектрика толщиной 0,2 мм.

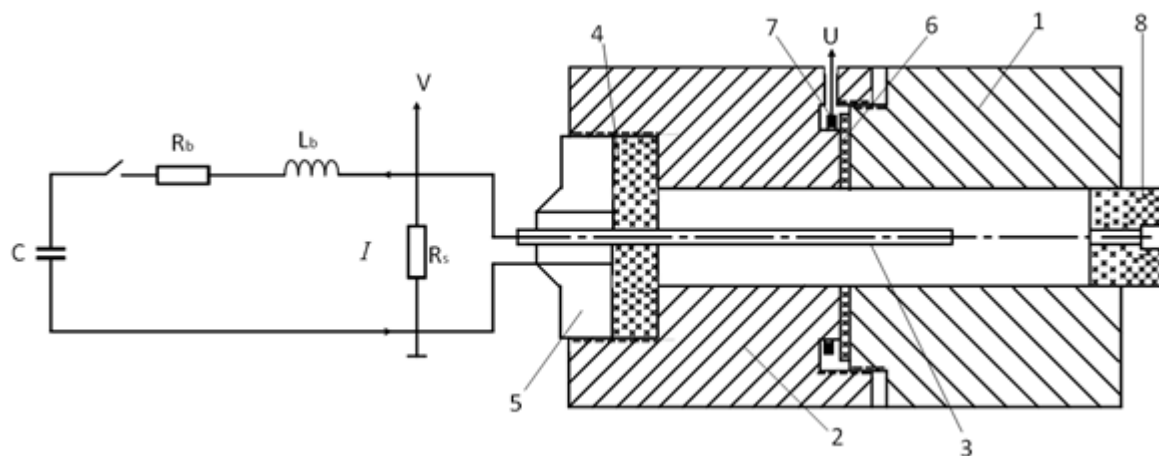


Рис. 2. Схема установки измерения профиля электропроводности: 1, 2 – детали внешнего электрода, медная оболочка; 3 – осевой медный электрод; 4 – пробка из оргстекла; 5 – полый болт; 6 – диэлектрик; 7 – тороидальная катушка; 8 – пробка из оргстекла для детонатора.

### 3.3. Результаты измерений

После проведения эксперимента мы получили результаты измерений, которые представлены в виде скриншотов с осциллографа (Приложение).

#### 4. Анализ результатов измерений

Исследовано взрывчатое вещество с высоким содержанием углерода. Химическая формула гексанитростильбена имеет вид  $C_{14}H_6N_6O_{12}$ . Массовая доля углерода составляет больше 37%, что близко к содержанию углерода в тротиле. Так как ранее на исследованных взрывчатых веществах было получено, что высокая электропроводность объясняется углеродом, было важно проверить эту гипотезу на новых веществах. На графике (рис. 4) приведены профили электропроводности при детонации гексогена с плотностью 1.7 и гексанитростильбена (ГНС) с плотностью 1.08. Длительность зоны высокой электропроводности для ГНС примерно в три раза превышает длительность для гексогена. Амплитудные значения близки. Содержание углерода в гексогене составляет 16%, формула гексогена  $C_3H_6N_6O_6$ . Как было получено ранее, максимум электропроводности наблюдается при максимально достигнутой плотности, с уменьшением плотности максимальное значение монотонно уменьшается. Таким образом, для насыпной плотности мы наблюдаем величину, близкую к ожидаемой. Результаты подтверждают высказанную гипотезу о ключевой роли углерода и контактной проводимости по сквозным углеродным структурам, высказанную ранее в работах [7-10].

##### 4.1. Обработка результатов

При обработке результатов мы использовали формулу (4) полученную нами выше и построили график (рис.4).

##### 4.2. Оценка погрешностей

Основная погрешность связана с большой величиной измеряемой электропроводности. Вклад в погрешность дают следующие величины: индуктивность катушки, собственное сопротивление ячейки и проводов, взаимная индукция тороидальной катушки и контура с ВВ, неоднородность заряда, которую сложно контролировать в случае насыпной плотности, есть небольшой вклад от измерительных приборов. Суммарная ошибка составляет около 15%.

Поскольку нас интересует сравнение величины электропроводности для разных составов, эта погрешность не влияет на выводы работы.

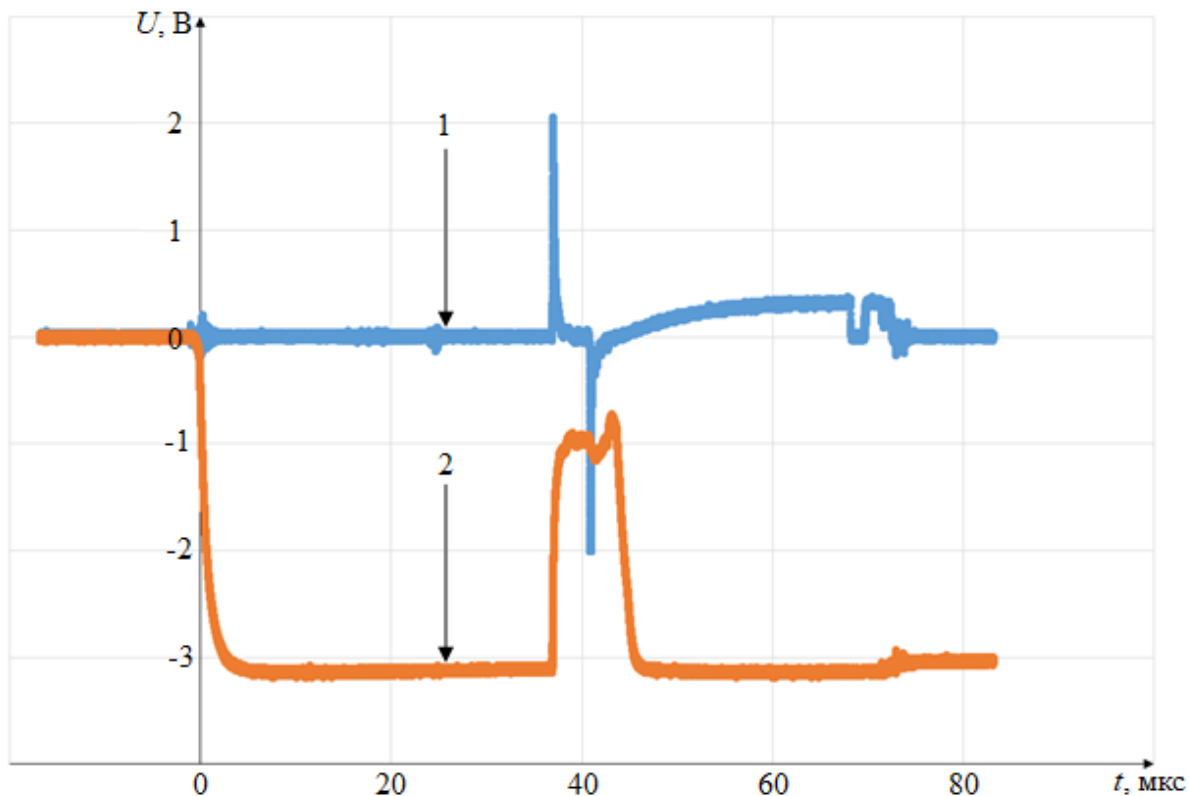


Рис. 3. График напряжения на катушке и между электродами от времени: 1 – изменение напряжения на катушке; 2 – изменение напряжения между электродами.

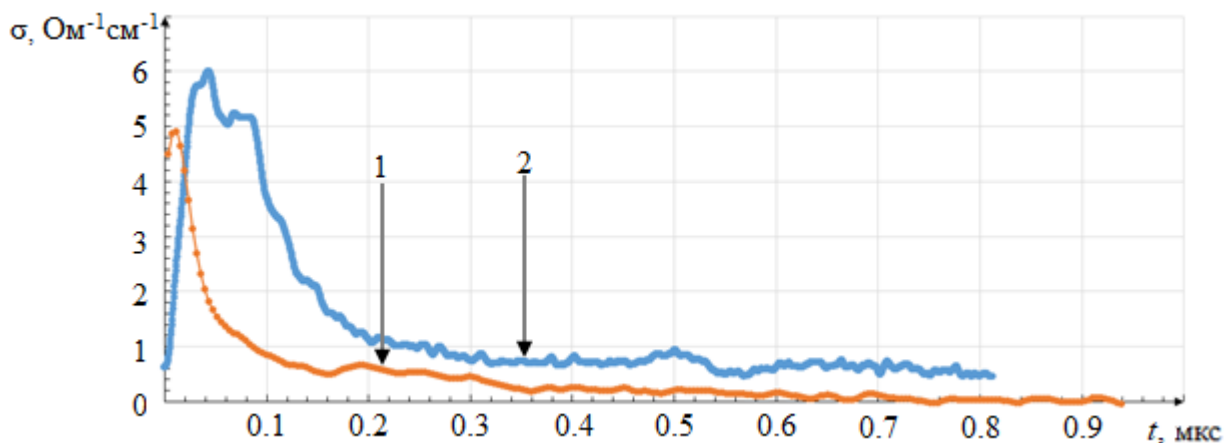


Рис. 4. График зависимости проводимости от времени: 1 – гексагена; 2 – гексанитростильбена насыпной плотности

## 5. Обсуждение полученных результатов и выводы

Так как электропроводность объясняется в рамках гипотезы контактной проводимости по углеродным структурам, было интересно посмотреть прово-

димостью нового вещества с высоким содержанием углерода. Проведено экспериментальное исследование гексанитростильбена (HNS,  $C_{14}H_6N_6O_{12}$ ) с целью сравнения с данными для ранее исследованных взрывчатых веществ.

На левом графике приведены результаты сравнения электропроводности в волне Тейлора для ВВ с высоким содержанием углерода: TNT (0.37), HNS (0.37), TATB (0.28), указаны соответствующие плотности. Эксперимент был предварительным, не удалось получить значение амплитуды, поэтому максимум мы обсуждать не будем. Для HNS надежно зафиксировано значение электропроводности в волне Тейлора – около  $1 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ . Результат неожиданный, так как для TNT и TATB электропроводность на порядок больше. По нашему мнению, это различие связано с разной кинетикой и низкой чувствительностью TNT и TATB. Качественно график электропроводности для HNS более близок к данным для мощных ВВ – гексогену (RDX) и BTF. На правом графике HNS приведен в сравнении с этими веществами. Для приведенных веществ контрастно выделяется область высокой электропроводности благодаря более скромным значениям в волне разгрузки.

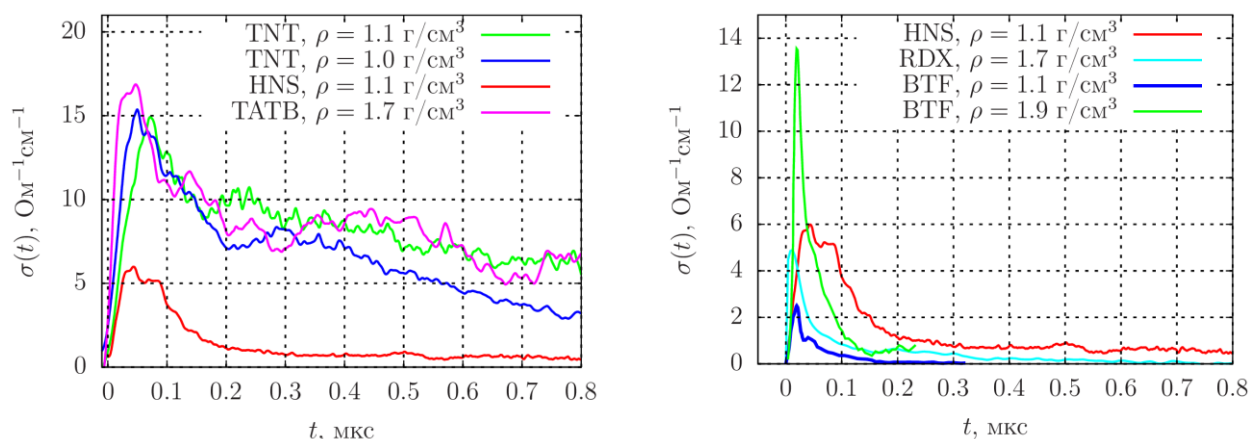


Рис. 5. Графики электропроводности для веществ с различным составом и плотностью.

Длительность области высокой электропроводности для HNS составляет около 150 нс, в то время как для BTF и RDX близка к 50 нс. По этим данным можно предположить, что кинетика в HNS более интенсивная, чем в близким

по составу и термодинамическим параметрам ТАТВ и TNT. Косвенным подтверждением этого является небольшой критический диаметр, сравнимый с величиной для RDX. Вследствие этого в сохраненных продуктах детонации HNS ожидается наличие крупных частиц конденсированного углерода с разнообразной морфологией и разным фазовым составом, качественно сохраненные продукты могут иметь сходство с продуктами ВТФ, ожидается наличие ультрадисперсного алмаза. В заключении можно сделать вывод, что мы получили профиль электропроводности схожий с предыдущими экспериментами, что подтверждает высказанную ранее теорию в других работах по электропроводности для других ВВ.

### Список литературы

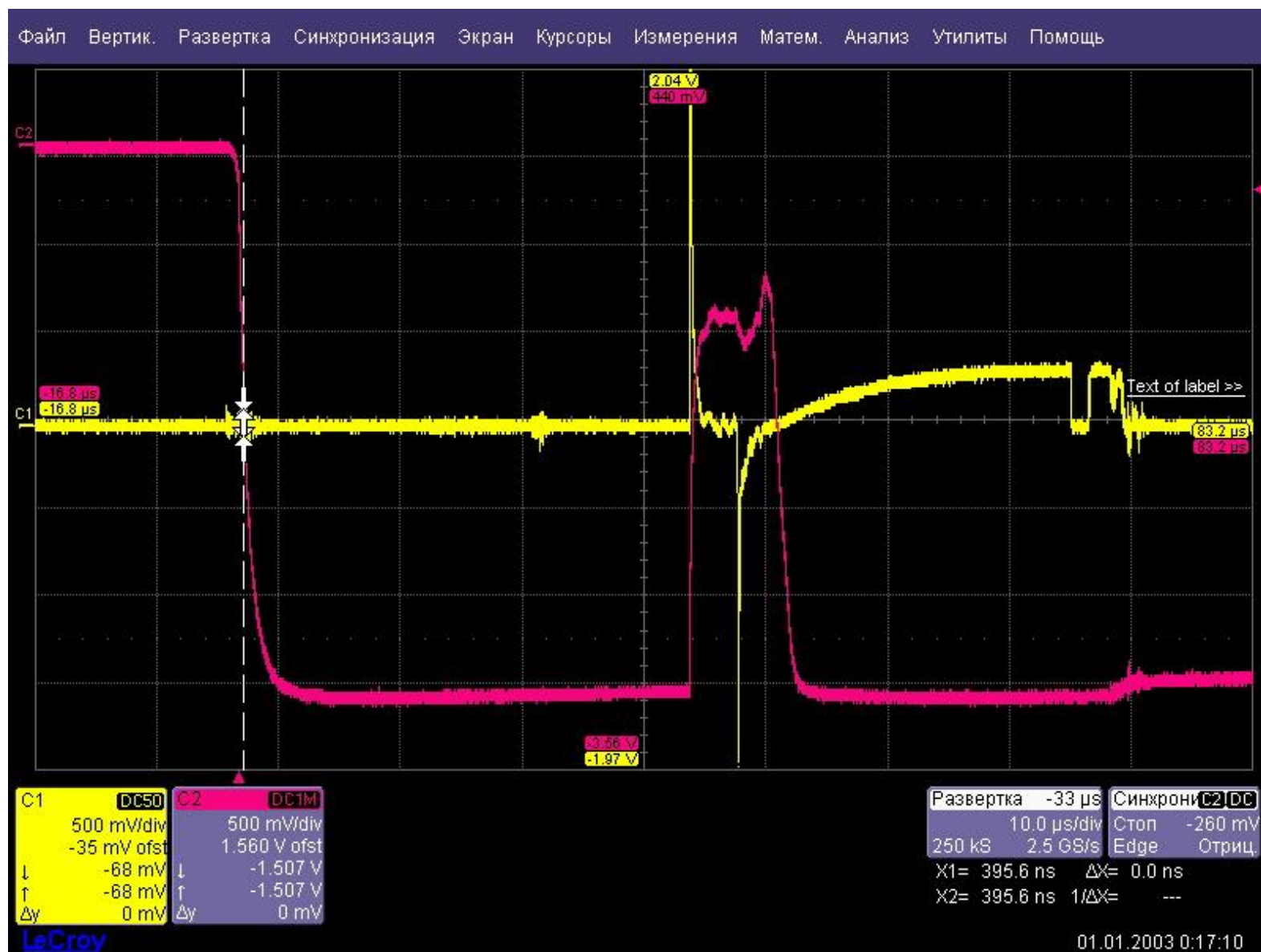
1. Бриш А.А., Тарасов М.С., Цукерман В.А. Электропроводность продуктов взрыва конденсированных взрывчатых веществ // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1959. Т. 37, №6. С. 1543-1549.
2. Краткая химическая энциклопедия/Под ред. Кнунянц И.Л., Бахаровский Г.Я. М: Советская энциклопедия, 1961. Т. 1., 559-562 с.
3. Ершов А.П., Сатонкина Н.П., Иванов Г.М. Профили электропроводности в плотных взрывчатых веществах // *Журнал Химическая физика*. 2007. Т. 26, №12.
4. 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.
5. 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.
6. Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С. Шведов К.К. Детонационные волны в конденсированных средах. М: Наука, 1970. 164 с.
7. B. Hayes, in Proceedings of the 4th (International) Symposium on Detonation, White Oak, Maryland, ACR-126, 1965, 595 с.

8. S. D. Gilev and A. M. Trubachev, in Proceedings of the 12th international Detonation Symposium, San Diego, CA (2002), Paper No. ONR333-05-2, 240 c.
9. S. D. Gilev, Doctoral dissertation, Institute of Hydrodynamics, Novosibirsk, Russia, 2009.
10. N. P. Satonkina The dynamics of carbon nanostructures at detonation of condensed high explosives Journal of Applied Physics, v.118, 2015.

## Приложение



Приложение 1. График полного сигнала с осциллографа



Приложение 2. График полезного сигнала с осциллографа