

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Кузьминых Алексей Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Ударные волны в магнитном поле**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19309

**Научный руководитель:**

д.ф-м.н Ершов А. П.

Оценка научного руководителя

4 (четыре)

«      »        20   г.

**Преподаватель практикума**

Краснопевцев С.Е.

Оценка преподавателя практикума

хорошо

«      »        20   г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«      »        20   г.

Новосибирск 2020

## **Ударные волны в магнитном поле.**

**Кузьминых Алексей Александрович**

Физический факультет. Электромагнитный практикум. 3 семестр.

Группа №19309, 2020.

Научный руководитель:

**А.П. Ершов, д.ф-м.н. СО РАН.**

### **Аннотация:**

Исследован фронт детонационной волны электромагнитным методом. Были изготовлены датчики скорости и получены записи скорости на торце заряда гексогена плотности  $1.15 \text{ г/см}^3$  цилиндрической формы, находящегося в контакте с пластиной оргстекла. Результаты хорошо согласуются с моделью Зельдовича – Неймана – Дёринга (ЗНД). Максимальная скорость границы раздела составила  $2,5 \text{ км/с}$ . Скорость в точке излома хорошо согласуется с теоретической для состояния Чепмена-Жуге ( $1,93 \text{ км/с}$ ).

Ключевые слова: взрывчатые вещества (ВВ.), точка Чепмена-Жуге, катушки Гельмгольца.

## Оглавление

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть.....	4
3. Практическая часть .....	5
3.1 Эксперимент .....	5
3.2 Устранение помех .....	10
3.4 Экспериментальные данные и их обработка.....	11
4. Вывод.....	14
5. Литература .....	14
6. Приложение .....	15

## 1. Введение

Основной парадигмой теории детонации является модель, разработанная Я. Б. Зельдовичем в 1940 году. Позднее за рубежом стали публиковаться аналогичные работы. Эту модель принято называть моделью Зельдовича – Неймана – Дёринга, или модель ЗНД.

Это модель описывает изменение состояния вещества во время детонации: связь давления и удельного объёма. Модель хорошо согласуется с практикой, если взрывчатое вещество является достаточно однородным, однако для гетерогенных взрывчатых веществ возможны отклонения от нормы [2]. Для исследования применяется метод, предложенный Е.К. Завойским в 1940-х годах. Метод основан на законе Майкла Фарадея (генерация ЭДС в рамке, передвигающейся в магнитном поле).

Исследование этой модели для взрывчатых веществ может дать представление о том, когда применима модель ЗНД. Так как эта модель очень важна в теории детонации, исследование её может открыть новые перспективы.

Цель работы: Изучить структуру фронта детонационной волны электромагнитным методом. Получить опытным путём массовую скорость органического стекла, на котором располагаются датчики (прямоугольные рамки). Сравнить экспериментальные данные с теоретическими.

Оборудование: экспериментальная сборка, включающая датчик, катушку Гельмгольца, заряд ВВ. (гексоген), осциллограф; источник питания катушки.

## 2. Теоретическая часть

Разберёмся в теории.

Взрыв – это необратимое изменение состояния вещества, сопровождающееся выделением огромного количества энергии за весьма короткое время, порядка 1-100 мкс, возбуждением ударных или упругих волн в окружающей среде [1].

Характерные примеры это электрический взрыв проводника, взрыв Тринитротолуола (TNT).

Наиболее широко используется избыточная химическая энергия взрывчатых веществ, как в последнем примере. Взрывчатыми веществами (ВВ.) называются метастабильные химические соединения и смеси, относительно устойчивые при нормальных условиях, но способные после определенного начального воздействия (инициирующего импульса) к взрыву путем самоподдерживающегося внутреннего химического превращения с выделением тепла и газообразных продуктов. ВВ. бывают твердыми, жидкими, газообразными, а так же смесями веществ в разном агрегатном состоянии.

Наиболее быстрой формой горения (взрывного превращения) в зарядах ВВ. является детонация. Детонация есть гидродинамический волновой процесс распространения по веществу зоны экзотермической (т.е. с выделением тепла) реакции со сверхзвуковой скоростью. Интенсивность ударной волны достаточно велика, чтобы в газе могло начаться горение. Зона основного энергосодержания и перестройки вещества – фронт волны. Фронт волны вместе с примыкающей областью течения продуктов взрыва (ПВ) образует детонационную волну (ДВ).

Модель ЗНД — это классическая модель, которая описывает процесс детонации ВВ. Эта модель гласит, что фронт детонационной волны состоит из ударной волны и зоны химической реакции. После прохождения ДВ через вещество его состояния известно, это точка Чепмена-Жуге (ЧЖ).

Если рассматривать PV-диаграмму (Рис. 1.), при достижении ударной волны вещества, давление резко возрастает и достигает так называемой точки Неймана на ударной адиабате. Далее происходит расширение вещества по прямой Релея–Михельсона и доходит до точки Чепмена –Жуге. Прямая, по которой расширяется вещество, касается детонационной адиабаты в точке ЧЖ.

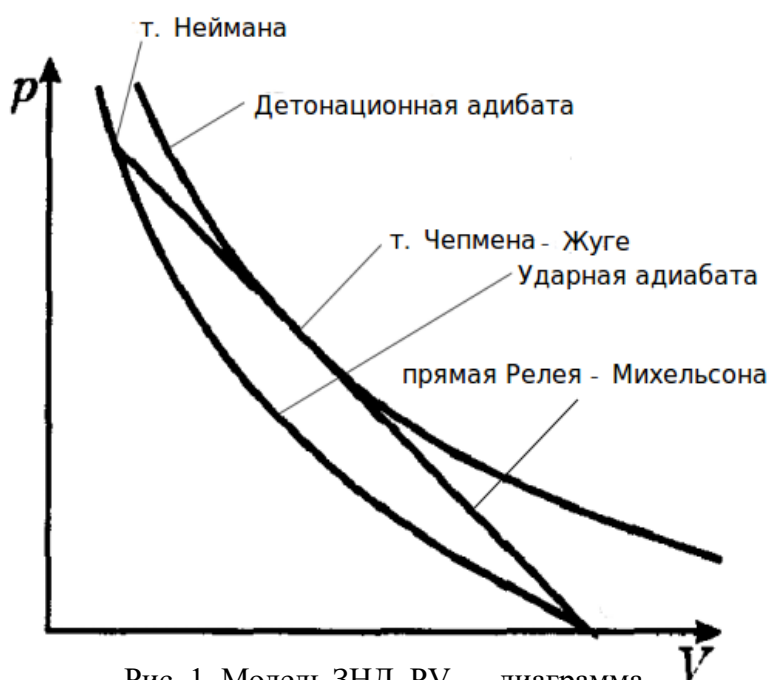


Рис. 1. Модель ЗНД. PV — диаграмма.

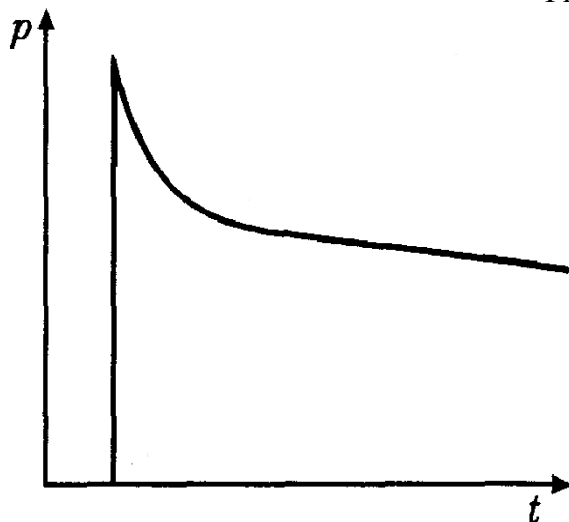


Рис. 2. Модель ЗНД. Pt — диаграмма.

### 3. Практическая часть

#### 3.1 Эксперимент

Исследование структуры детонационной волны проводилось методом, предложенным Е.К. Завойским.

Экспериментальная сборка состоит из ВВ. (гексоген плотности  $1.15 \text{ г/см}^3$ ), датчиков и катушки. Датчик представляет собой рамку из алюминия (толщиной  $9 \text{ мкм}$ ), которая приклеивается на оргстекло, к этой рамке подводятся измерительные контакты.

Импульсное магнитное поле создаётся катушкой Гельмгольца. Заряд ВВ. в форме цилиндра размещается перпендикулярно магнитному полю. Датчик контактирует с торцом заряда.

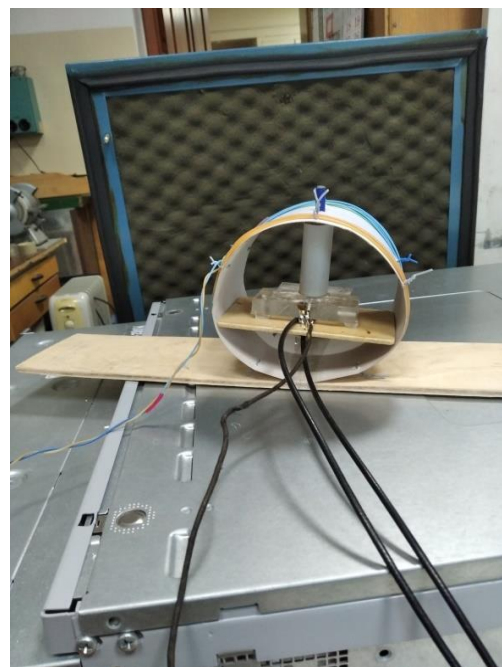


Рис. 1. Экспериментальная установка.

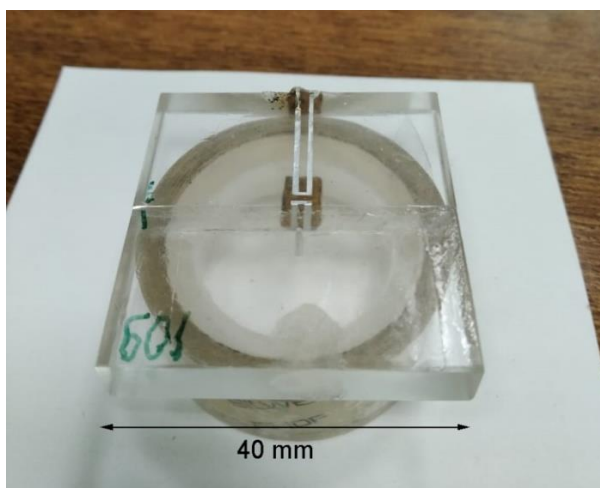


Рис. 2. Вертикальный и горизонтальный алюминиевые контуры на оргстекле.

При воздействии волны на оргстекло она начинает двигать рамку и создаётся ЭДС. Это напряжение можно подать на осциллограф и построить зависимость  $U(t)$ . По закону Фарадея, найдём скорость в волне.

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

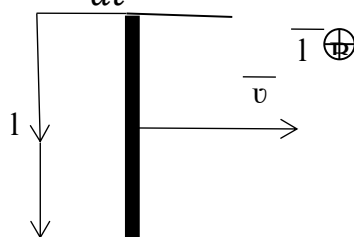


Рис. 3. Рамка в магнитном поле.

Для рамки, двигающейся со скоростью  $v$ :

$$\varepsilon = \frac{Blvdt}{dt} = Bvl \quad (2)$$

Тогда скорость:

$$v = \frac{\varepsilon}{Bl} \quad (3)$$

Рассмотрим сам датчик. Датчик представляет собой рамку, сделанную из алюминиевой фольги, и прикрепленных контактов к этой рамке. Полоска фольги закрепляется на оргстекле с помощью клея, а после вырезаются две рамки – вертикальная и горизонтальная, плечи которых находятся примерно в 1 мм друг от друга. Далее производится склейка двух блоков оргстекла, так что контактные полоски вертикального датчика зажимаются между блоками. Для защиты от помех и преждевременного разрушения поверх перекладин датчиков наносится тонкий слой эпоксидной смолы. Ось заряда помещается на плечо рамки как показано на рисунках. При взрыве рамки и подложка разрушаются. Важно, чтобы они выдержали воздействие взрыва в течение времени, достаточного для записи сигналов. Практика показывает, что время жизни датчиков составляло около 1 мкс.

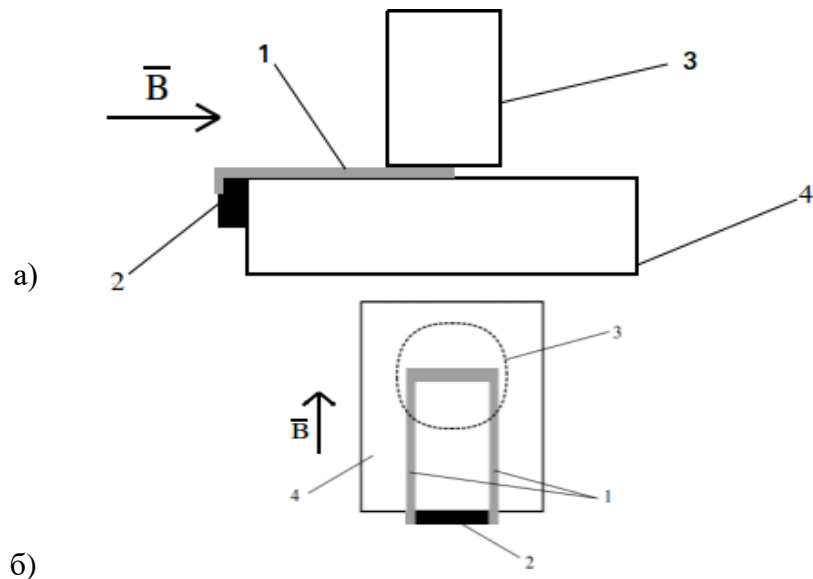


Рис. 4. Рамка с контуром.

- а) вид сбоку: 1 - рамка; 2 - контакты; 3 - заряд; 4 – оргстекло;  
 б) вид сверху: 1 - рамка; 2 - контакты; 3 - заряд; 4 - оргстекло;

Рассчитаем магнитное поле в катушке основываясь на законе Био – Савара

$$B = \frac{I\mu_0}{4\pi} \frac{\int [dL \times R]}{R^3} \quad (4)$$

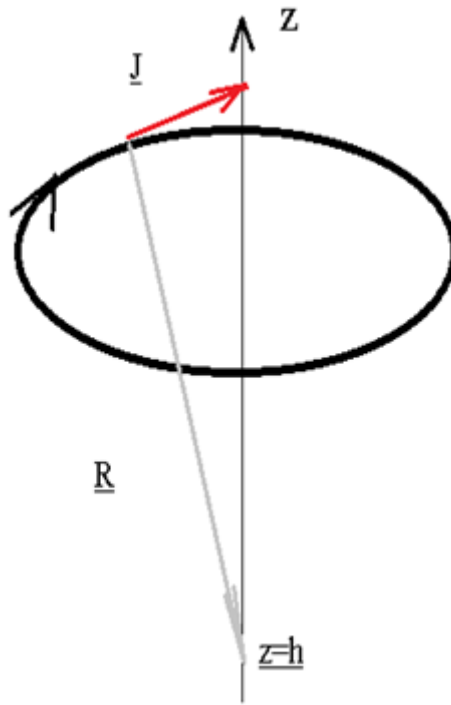


Рис. 5. Магнитное поле катушки в точке  $h = z$ .

Запишем поле на оси кольца на расстоянии  $h$  от центра:

$$B = \frac{\mu_0 I R}{4\pi} \int_0^L \frac{dL}{(h^2 + R^2)^{3/2}} = \frac{I \mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R^2 d\theta}{(h^2 + R^2)^{3/2}} = \frac{I \mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{(h^2 + R^2)^{3/2}} \quad (5)$$

Здесь  $R$  – радиус кольца

В эксперименте используется катушка из 2 наборов витков, запишем поле для них на расстоянии  $x$  от средней точки:

$$B_{12} = \frac{I \mu_0}{2} \left( \frac{R^2}{((h-x)^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{R^2}{((h+x)^2 + R^2)^{3/2}} \right) \quad (6)$$

Здесь  $h$  – половина расстояния между витками

В центре катушки производная  $\frac{dB}{dx} = 0$  из симметрии. В зависимости от знака второй производной в центре будут максимум поля (при  $\frac{d^2B}{dx^2} < 0$ ), либо минимум (при  $\frac{d^2B}{dx^2} > 0$ ). Наиболее однородное поле будет при  $\frac{d^2B}{dx^2} = 0$ . При этом  $\frac{d^3B}{dx^3} = 0$  из симметрии, так что неоднородность поля будет пропорциональна  $x^4$ .

Итого:

$$\frac{d^2B}{dx^2} = 0 \Rightarrow 5h^2 = h^2 + R^2 \quad (7)$$

$$h = \frac{R}{2} \quad (8)$$

Следовательно, чтобы поле было максимально однородным, катушки надо



расположить на расстоянии  $R$  друг от друга, датчик поместить на расстоянии  $\frac{R}{2}$  от каждого кольца, т.е. поместить в центр.

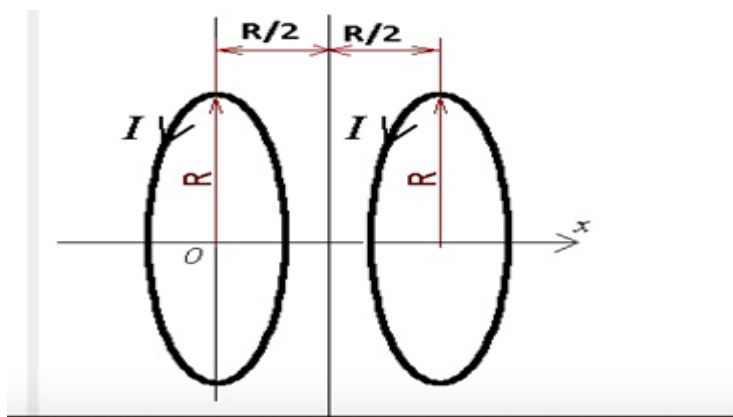


Рис. 6. Катушки Гельмгольца.

Ниже представлен график зависимости магнитного поля ( $B$ ) от расстояния от центра ( $x$ ) для катушки радиуса 1 ( $R$ ), тока 1 А ( $I$ ) и с разными расстояниями между витками.

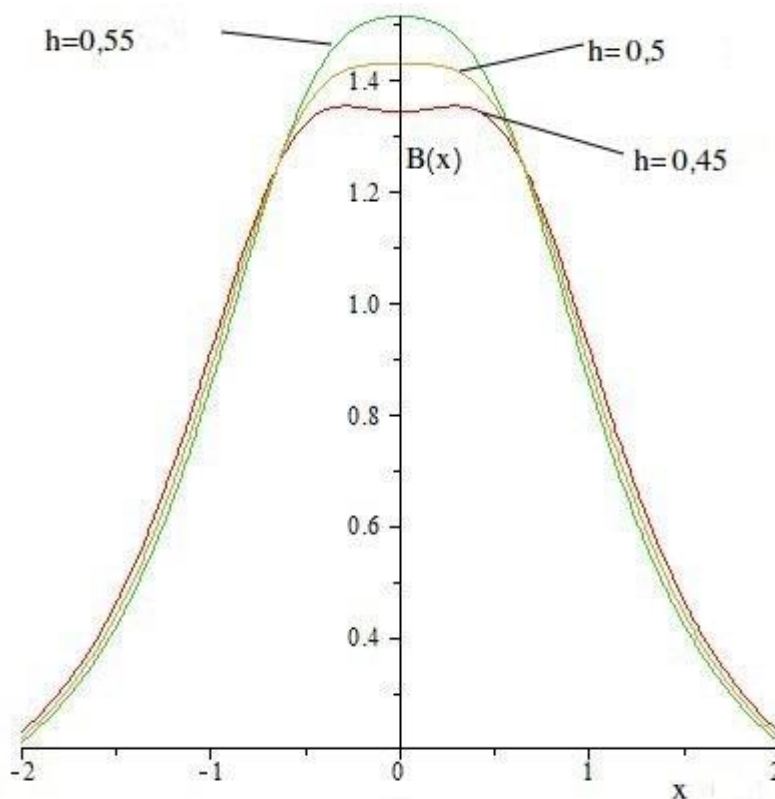


Рис. 7. График поля  $B(x)$  для разных расстояний между витками.

Магнитное поле катушки из  $2n$  витков в средней точке при  $h = R/2$  будет определяться по формуле:

$$\frac{2nI\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{(h^2 + R^2)^{3/2}} = \frac{nI\mu_0 R^2}{\left(\frac{5}{4}R^2\right)^{3/2}} \approx (9 * 10^{-7}) \frac{nI}{R} \quad (9)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

### 3.2 Устранение помех

Во время детонации происходят различные химические реакции. В этих реакциях образуются ионы и электроны, которые могут влиять на измерения. Для устранения паразитных полей можно поместить рядом с датчиком заземленную иглоку так, чтобы она немного торчала из плоскости рамки. Тогда паразитная ёмкость, создаваемая во время детонации, занулится. Основываясь на предыдущих опытах, можно утверждать, что заземленная иглока почти не вносит вклад в изменение магнитного поля.

### 3.3. Ход выполнения эксперимента

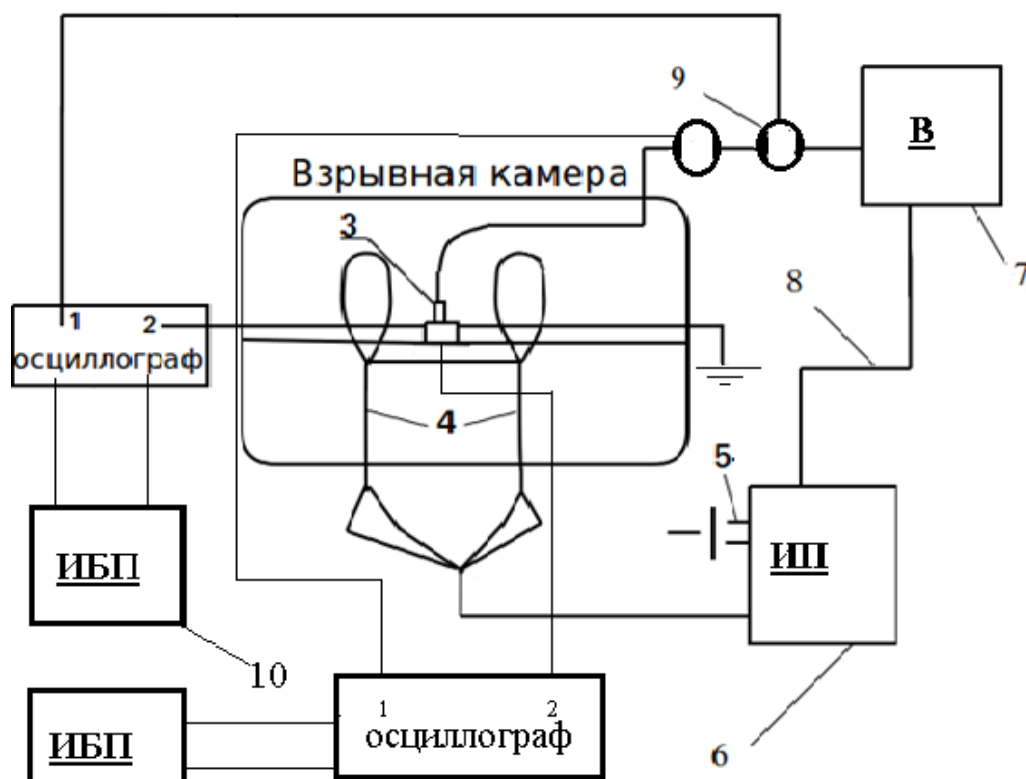


Рис. 8. Схема эксперимента: 1,2 - каналы осциллографа; 3 - датчик с зарядом; 4 - катушка; 5 - ключ запуска; 6 - источник питания; 7 - взрывной прибор; 8 - провод, по которому передаётся импульс для взрыва; 9 - пояс Роговского; 10 - бесперебойник.

Как взрывной прибор В, так и источник питания катушки ИП развивают импульсы тока на уровне 1000 А, которые изменяются за микросекунды (В) либо десятки микросекунд (ИП). Поэтому особое внимание уделялось подавлению помех. Внешние оплетки измерительных кабелей, передающих сигнал на

осциллографы, заземлены в одной точке внутри взрывной камеры и, следовательно, гальванически соединены. Поэтому каждый сигнал приходится подавать на отдельный осциллограф (который имеет 4 входа, казалось бы, вполне достаточно для сигнала запуска и двух рамок). Но если использовать входы одного осциллографа, возникает короткозамкнутая петля по внешним оплеткам и «массе» осциллографа, замкнутый контур, в котором возникают значительные индуктивные наводки. По той же причине оба осциллографа питаются от отдельных источников бесперебойного питания (ИБП), которые перед измерением отключаются от сети 220 В. Иначе также возникают помехи: замкнутая петля по земле и/или нулю сети, это как бы огромный датчик (замкнутый контур), который может «поймать» извне паразитное изменение потока магнитного поля.

Собираем схему (Рис. 8), помещаем экспериментальный образец во взрывную камеру и подключаем все провода. Источник питания подаёт ток на катушку 1000А и вырабатывает импульс запуска взрывного прибора. После взрыва записываем данные с осциллографов. Один из осциллографов записывает сигнал с горизонтального датчика, другой-с вертикального.

Размеры рамки: вертикальный размер-2.52 мм, горизонтальный размер- 2.46 мм. Радиус катушки 12 см.

Ток в катушке 1кА. Поле в катушке 0.15 Тл. Длина иголки над датчиком 2,8 мм. Радиус иголки 0,3 мм.

### **3.4 Экспериментальные данные и их обработка**

Изображения с осциллографа:

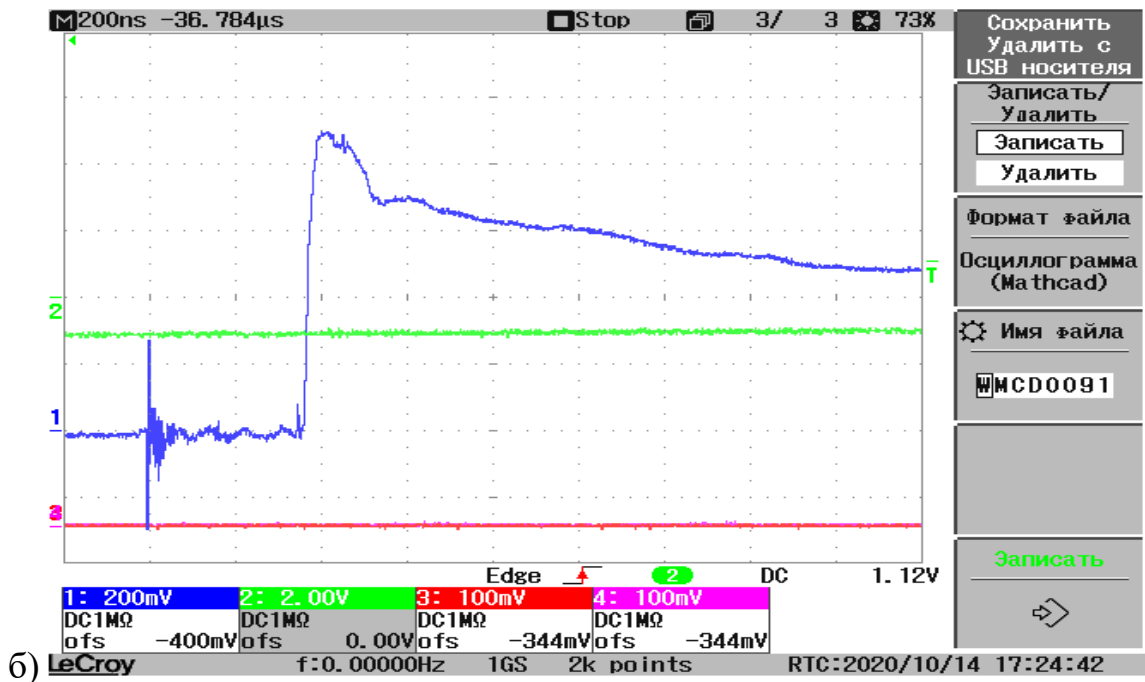
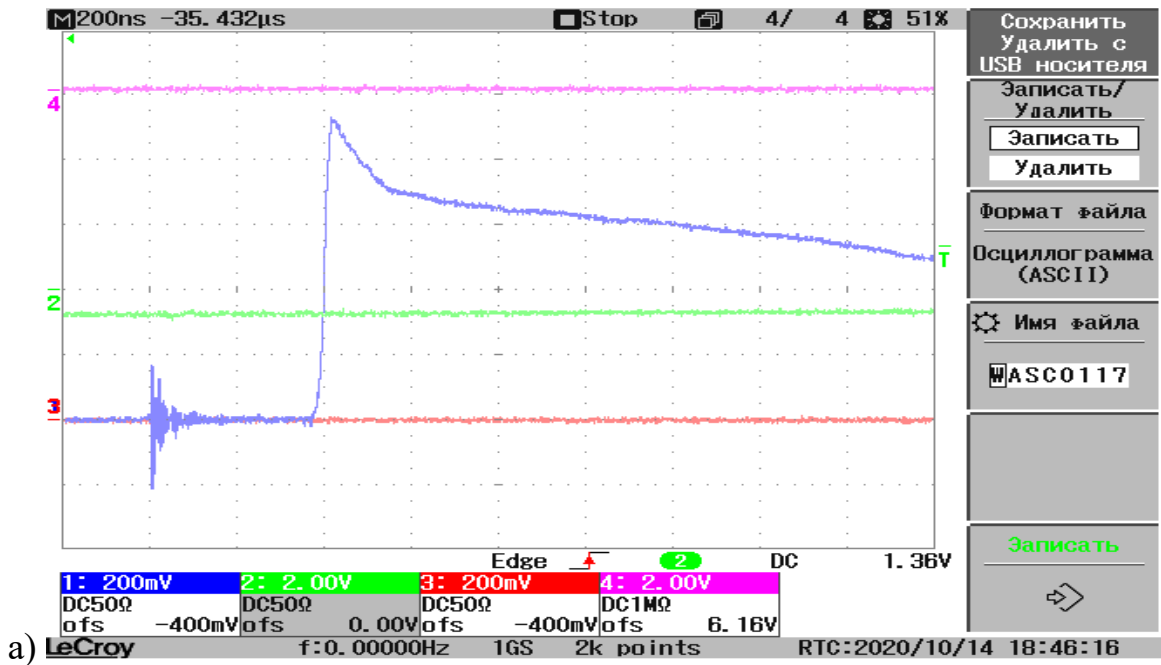


Рис. 10.Изображения с осциллографа.

а) вертикальный датчик, б) горизонтальный датчик.

## RDX, 160 $\mu\text{m}$ , $\rho=1.15 \text{ г/см}^3$

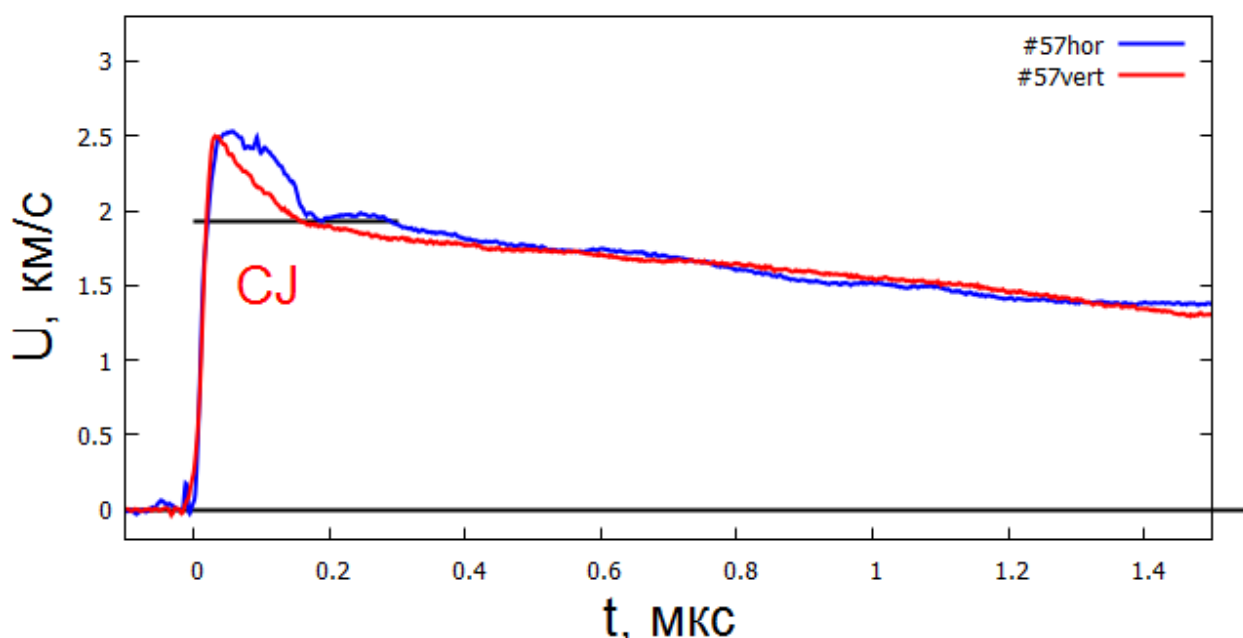


Рис. 11. Графики скорости, по данным вертикальной (красная линия) и горизонтальной (синяя линия) рамок

В идеале, когда фронт волны плоский и ВВ. однородно, сигналы с двух датчиков должны быть одинаковы, так как оргстекло движется точно вниз со всюду одинаковой скоростью. Отличие графиков, увеличивающееся со временем, возможно, если фронт волны имеет заметную кривизну. Подробно про влияние кривизны на показания датчиков можно посмотреть в приложении.

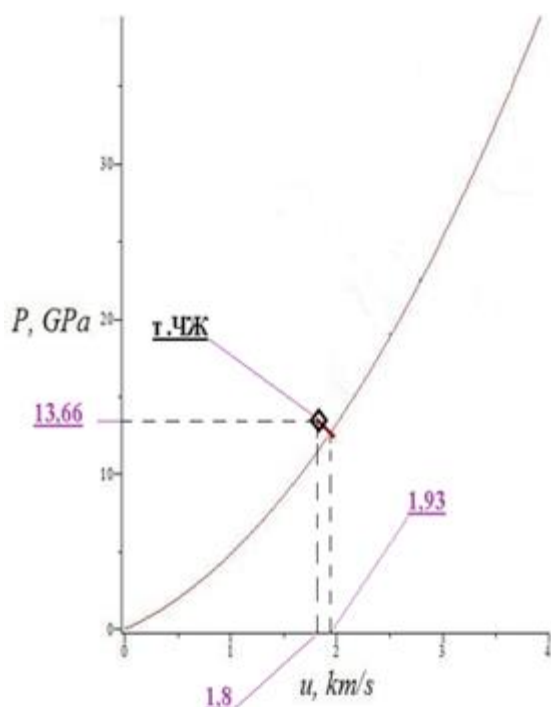


Рис. 10. Связь давления и массовой скорости в оргстекле и ВВ.

Из экспериментальных данных можно утверждать, что через 0,4 мкс после начала графики почти сливаются воедино, следовательно, кривизна фронта в данном опыте была несущественна. Вначале есть небольшие различия, следовательно, некоторая неоднородность вещества присутствует. Также по излому графиков в интервале от  $t=0$  мкс до  $t=0,17$  мкс можно оценить время реакции (время полного сгорания ВВ.)

Основной источник погрешностей – размер рамки (измерялся на микроскопе, однако рамка не идеально прямоугольная, и к тому же может деформироваться при взрыве). Эти погрешности

в сумме могут дать ошибку около 5%. Поскольку измерения качественные (наличие или отсутствие пика Неймана, соответствие формы сигнала модели ЗНД), эти ошибки не существенны.

Параметры ЧЖ для гексогена оценивались по литературным данным, а теоритический уровень скорости границы раздела – поРУ – диаграмме (рис.13).

На рисунке приведена ударная адиабата оргстекла и точка Чепмена — Жуге для ВВ. Скорость границы раздела определяется по пересечению адиабаты разгрузки ВВ. и ударной адиабаты оргстекла.

#### **4. Вывод**

Изучена детонация взрывчатым веществом электромагнитным методом. Максимальная массовая скорость вещества(оргстекла)составила 2,5 км/с, при ожидаемом значении уровня Чепмена – Жуге 1,93 км/с. Точка Чепмена — Жуге хорошо согласуется с результатом эксперимента. Погрешность измерения скорости составляет несколько процентов.

#### **5. Литература**

1. В.В Митрофанов. Теория детонации. Учебное пособие. Новосибирск, НГУ 1982 год. - 92 стр.
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Гидродинамика, Том 6.
3. A. P. Ershov, A. O. Kashkarov, E. R. Prueel, N. P. Satonkina, V. V. Sil'vestrov, A. S. Yunoshev, and A.V. Plastinin. Nonideal detonation regimes in low density explosives // Journal of applied of physics V.119, № 7 (2016) 075903
4. А.А. Воробьёв, В.С. Трофимов, К.М. Михайлюк, А.Н. Королев, Г.Б. Брауэр Исследование инициирования детонации в литом тротиле динамическим методом. // Физика горения и взрыва. Академия наук СССР Сибирское отделение. Том 21 № 2. 1985 г. Стр. 106-116.

## 6. Приложение

Движение рамок при кривом фронте волны.

Обычно фронт детонационной волны не плоский, а имеет некоторую кривизну. В первом приближении его форма близка к сферической. Пусть у нас имеет место сферический фронт волны. (рис.1), под которой расположен датчик длины  $L$ .

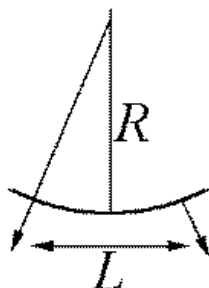


Рис. 1. Фронт волны.

Рассмотрим влияние кривизны фронта на сигнал с горизонтального датчика.

На рис.2 наглядно представлено положение горизонтальной рамки относительно  $ВВ$ . и направления магнитного поля  $В$ .

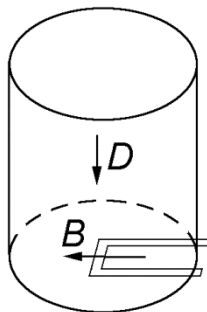


Рис. 2. Горизонтальная рамка.

Из-за кривизны фронта есть боковая составляющая скорости. Плечо рамки, кроме основного смещения вниз, будет удлиняться; смещаются в стороны и подводные проводники. Следовательно, боковое расширение будет увеличивать сигнал датчика.

Рис. 3. Вид на контур горизонтального датчика со стороны контактов.

Кажущаяся скорость в этом случае будет иметь следующий вид:

$$V_{\text{в}} = u \left( 1 + \frac{ut}{R} \right) \quad (11)$$

Где  $u$  - это истинная скорость движения вещества.

Боковое расширение на вертикальной рамке будет наоборот, уменьшать сигнал. На рис.4 представлено положение горизонтальной рамки относительно  $ВВ$ . и направления магнитного поля  $В$ .

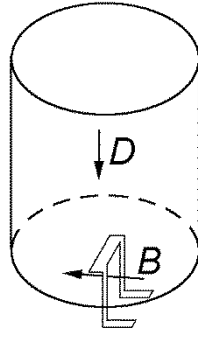


Рис. 4. Вертикальная рамка

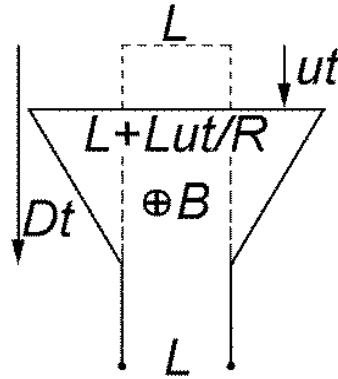


Рис. 5. Вид на контур горизонтального датчика со стороны контактов.

В этом случае кажущуюся скорость можно высчитать по формуле:

$$V_{||} = u \left( 1 - \frac{(D - u)t}{R} \right) \quad (12)$$

Признаком влияния кривизны фронта будет заметное различие сигналов, нарастающее со временем. В такой ситуации в перспективе можно будет находить истинную скорость усреднением двух сигналов:

$$u = \left( 1 - \frac{u}{D} \right) V_{=} + \frac{u}{D} V_{||} \quad (13)$$

Поскольку речь идет о небольшой поправке, скорость ударной волны  $D$  в этом уравнении можно считать постоянной, например, соответствующей массовой скорости, возникающей при разгрузке из состояния Чепмена – Жуге. Тогда имеем

$$u = \frac{V_{=}}{1 + (V_{=} - V_{||})/D} \quad (14)$$

Для условий нашего опыта при  $u = 1.93 \text{ км/с}$   $D = 2.59 + 1.52u = 5.52 \text{ км/с}$ . Если разница  $V_{=} - V_{||}$  составит, например,  $0.5 \text{ км/с}$  (около 30%), то истинная скорость будет ниже  $V_{=}$  примерно на 8%. Таковую поправку следует учитывать.