

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества

## **КУРСОВАЯ РАБОТА**

**Исследование движения ударных волн теневым методом**

Выполнила студентка 2 курса 207 группы  
Милицина Анна

Научный руководитель  
к.ф-м.н., доцент Мурсенкова И.В.

**Москва**  
**2020 г.**

## Оглавление

Аннотация.....	3
1. Введение .....	4
2. Экспериментальная установка и условия проведения экспериментов .....	7
3. Обработка экспериментальных изображений.....	12
4. Заключение .....	16
5. Список использованных источников .....	17
Приложения.....	18

## Аннотация

Целью данной работы является изучение теневого метода получения изображений на примере движения плоской ударной волны в канале ударной трубы и разработка метода определения координат неоднородностей на основе сканирования поля изображения. Была поставлена экспериментальная задача зарегистрировать высокоскоростным теньевым методом плоскую ударную волну в канале с прямоугольным препятствием, а также задача обработки теневого изображения течений с ударной волной в канале разрядной камеры, в том числе в плазменной области после инициирования импульсного объемного разряда.

В ходе экспериментальной работы высокоскоростной камерой были зарегистрированы теньевые изображения с движущейся ударной волной в канале. С помощью программы сканирования интенсивности изображений определены координаты фронтов ударных волн и рассчитаны скорости для трех типов течения в разрядной камере: а) при движении плоской ударной волны по каналу без препятствия, б) при движении волны по каналу с прямоугольным препятствием, в) при инициировании импульсного объемного разряда перед ударной волной.

В результате исследования показано, что анализ теневого изображения эффективен для получения точной информации о движении фронта ударной волны.

## 1. Введение

Теневые методы применяются в различных областях науки и техники для получения изображения прозрачных, но оптически неоднородных объектов, для которых характерно изменение в пространстве оптического показателя преломления. Приведем несколько характерных примеров. В оптике – это контроль производства оптических элементов. В аэродинамике и баллистике – исследования обтекания тел газовыми потоками. В физике горения и взрыва – определение температурных полей и скачков плотности в газовых средах.

В обычных условиях «почти прозрачные» объекты сами по себе не видны или видны очень плохо, поскольку они практически не отражают, не преломляют и не поглощают свет. Однако при их освещении параллельным пучком света на экран проецируется теневая картина, на которой неоднородности можно наблюдать даже при небольшом различии между показателями преломления исследуемого объекта и окружающего его воздуха. Это и есть классический теневой метод (рис. 1).

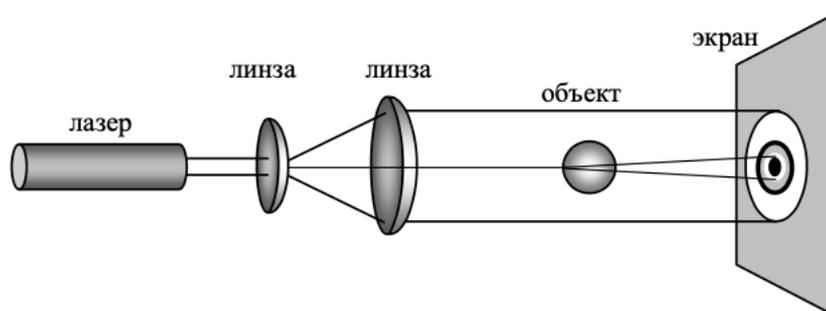


Рис. 1

Он основан на освещении объекта вспомогательным источником направленного излучения. Световой пучок расширяется до необходимого размера с помощью формирующей оптики и направляется на экран, образуя равномерно освещенное поле визуализации в отсутствии неоднородности. Прохождение параллельного пучка света через неоднородность вызывает отклонение оптических лучей. Их траектории определяются принципом Ферма – световой луч распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время. Отклонение лучей от своего первоначального направления приводит к их смещению на экране и перераспределению интенсивности в поле визуализации. Благодаря изменениям интенсивности на экране формируется изображение неоднородностей – теневая картина.

Для стационарных объектов, параметры которых не изменяются во времени, изображение неоднородностей можно наблюдать непосредственно на экране. В случае быстротекущих процессов для визуализации неоднородностей применяется метод теневого фотографирования. Объект освещается импульсным источником излучения, а теневая картина фиксируется обычными методами фотографической или фотоэлектронной регистрации изображения. По такой теневой фотографии (тенеграмме) можно с большой точностью определить форму и границы неоднородности. Наиболее четко фиксируются объекты с резким изменением показателя преломления. Например, ударные волны, высокоскоростные газовые струи, вихри, зоны турбулентности и т.д. Кроме того, для получения качественного изображения импульсный источник подсветки должен обладать высокой яркостью и очень короткой длительностью излучения,

определяющей экспозицию. Выбор момента экспозиции обеспечивается синхронизацией между источником излучения и исследуемым объектом.

Высокоскоростная теньевая фотография широко используется и для исследования плазмы. Первые эксперименты по визуализации быстропротекающих процессов в плазме были выполнены с помощью искровых источников подсветки. Однако появление лазеров значительно расширило возможности теневого метода. Лазеры быстро вытеснили искровые источники в системах визуализации, а активное развитие лазерной техники привело к созданию новых уникальных диагностических комплексов. В настоящее время лазерными системами теневого фотографирования оснащены практически все крупные установки, на которых проводятся исследования импульсной плазмы.

Анализ теневого изображения дает качественную информацию о распределении показателя преломления в плазменном объекте. В первую очередь определяются координаты областей плазмы с резким изменением величины показателя преломления (ударные волны, границы турбулентностей и др.), а также зоны непрозрачности. Теневой метод обладает высокой наглядностью и информативностью.

Проведение теневого исследования предполагает, что поглощением зондирующего излучения можно пренебречь. Кроме того, длина волны зондирующего излучения должна быть много меньше характерного размера исследуемой неоднородности. В этом случае распространение зондирующих лучей подчиняется законам геометрической оптики. Оптические схемы теневого фотографирования разнообразны и отличаются друг от друга элементами формирующей оптики, системами регистрации изображения и методами защиты от собственного излучения плазмы.

Прямо-теньевое изображение получают при отсутствии каких-либо оптических приборов между оптической неоднородностью, освещаемой пучком света, и плоскостью регистрации. В схеме, изображенной на *рис. 2 а*, зондирование осуществляется параллельным пучком, расширенным до требуемого размера поля визуализации с помощью телескопической системы. В методе светящейся точки (*рис. 2 б*) прямо-теньевое изображение получают при освещении объекта расходящимся пучком, который формируется из лазерного пучка с помощью короткофокусной линзы. Теньевое изображение плазмы регистрируют в плоскости, перпендикулярной к направлению зондирования. Для защиты теневого изображения от собственного излучения плазмы применяется интерференционный фильтр (ИФ) с максимумом пропускания на рабочей длине волны  $\lambda$  лазерного источника.

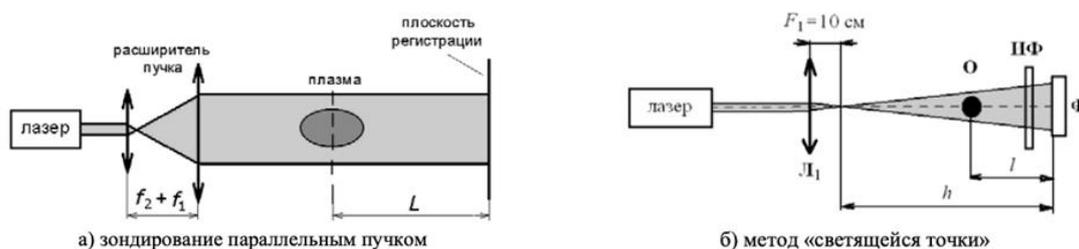


Рис. 2 Оптические схемы визуализации неоднородности прямо-теньевым методом

В прямо-теновом методе с осесимметричной неоднородностью относительные изменения освещенности экрана описываются соотношением:

$$\frac{\Delta I}{I} \approx L \int_{z_1}^{z_2} \left( \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} \right) dz$$

т. е. определяются второй производной от показателя преломления, проинтегрированной по линии наблюдения.

Прямо-теновая методика особенно удобна для визуализации ударных волн, турбулентных струй и т.д., где изменение второй производной велико. Перед ударной волной  $\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} > 0$  и лучи расходятся, образуя на экране область с пониженной освещенностью; за ударной волной лучи сходятся и увеличивают освещенность. Поэтому изображение ударной волны на прямо-теновом снимке состоит из двух характерных полос – темной и светлой (см. рис. 4.4, а). Темная полоса всегда относится к переднему фронту волны – области низких давлений. В общем случае, при образовании прямо-тенового изображения, неоднородность выглядит на экране всегда в виде темного участка. Светлые же участки изображения на экране образуются лучами, пришедшими из других областей пространства после отклонения их другими неоднородностями. Там, где отклонения не очень велики, светлые полосы располагаются рядом с темными. Такого эффекта можно достигнуть при соответствующем выборе расстояния между изучаемой неоднородностью и экраном. [1, 3, 5]

## 2. Экспериментальная установка и условия проведения экспериментов

Все эксперименты проводились на ударной трубе с разрядной камерой (рис. 3, 4-6) [2-5]. Внутренняя область разрядной камеры является продолжением камеры низкого давления сечением  $24 \times 48 \text{ мм}^2$ . В рабочей секции длиной 17 см противоположные стенки образованы плоскопараллельными кварцевыми стеклами без изменения поперечного сечения канала. Поверхностные скользящие разряды (плазменные листы) площадью  $30 \times 100 \text{ мм}^2$  располагаются на двух противоположных стенках рабочего участка на расстоянии 24 мм друг от друга, между ними может быть инициирован объемный разряд. (Эксперименты №3, 4). Рабочим газом является воздух под давлением 3-250 торр.

Теневые изображения газодинамического поля течения в экспериментах регистрировались высокоскоростной камерой (рис. 3, 3) с частотой кадров до 150000 к/с. Оптическая система (рис. 3, 2-3) теневого зондирования формировала излучение непрерывного лазера (532 нм) и направляла его перпендикулярно стеклам разрядной камеры. С помощью сигналов пьезоэлектрических датчиков давления в канале ударной трубы измерялась скорость ударных волн и осуществлялась синхронизация процессов в экспериментах [2, 3]. Направление оси X совпадает с направлением распространения исходной плоской ударной волны. Протяженность разрядной области вдоль направления движения ударной волны составляла 10 см; конец электродов принимался за нулевое значение координаты x. С помощью системы откачки (рис. 3, 6) камера низкого давления откачивалась до 5-50 торр. Резкий разрыв диафрагмы между камерами высокого и низкого давления приводил к образованию ударной волны.

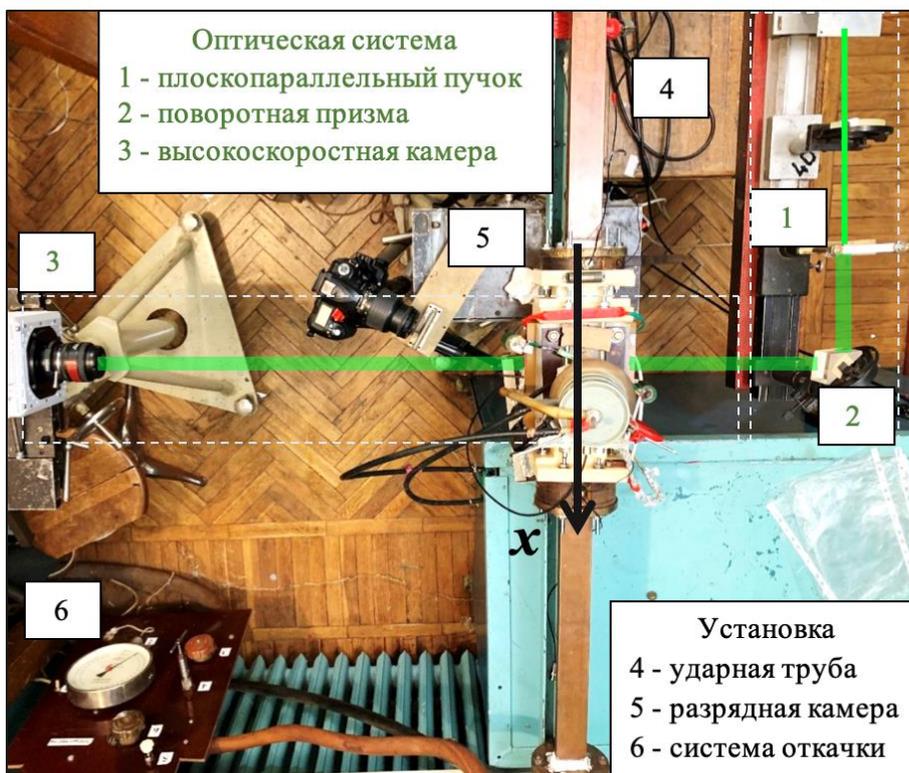


Рис. 3. Экспериментальная установка (вид сверху)

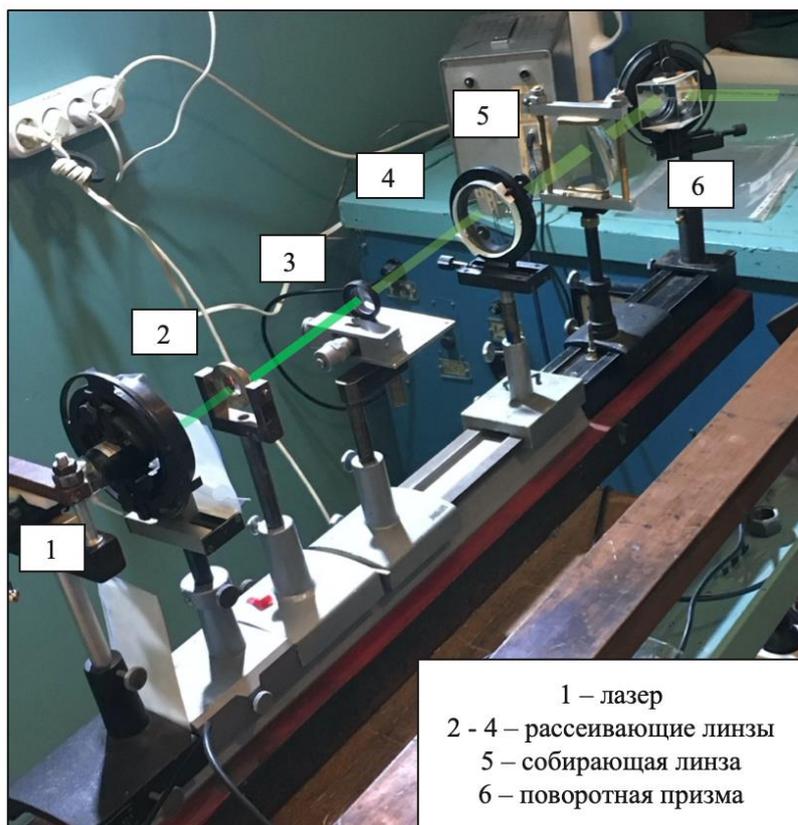


Рис. 4. Оптическая система

Условия проведения экспериментов для трех типов течения в канале разрядной камеры, которые были обработаны, приведены в Таблице 1. Частота съемки составляла 150 000 кадров в секунду, экспозиция кадра 1 мкс. База измерения скорости ударной волны была 103 см (№1, №3, №4) и 140 см (№2). В канале ударной трубы при давлении воздуха  $p_0$  вдоль оси X распространяется ударная волна.

Таблица 1. Экспериментальные условия

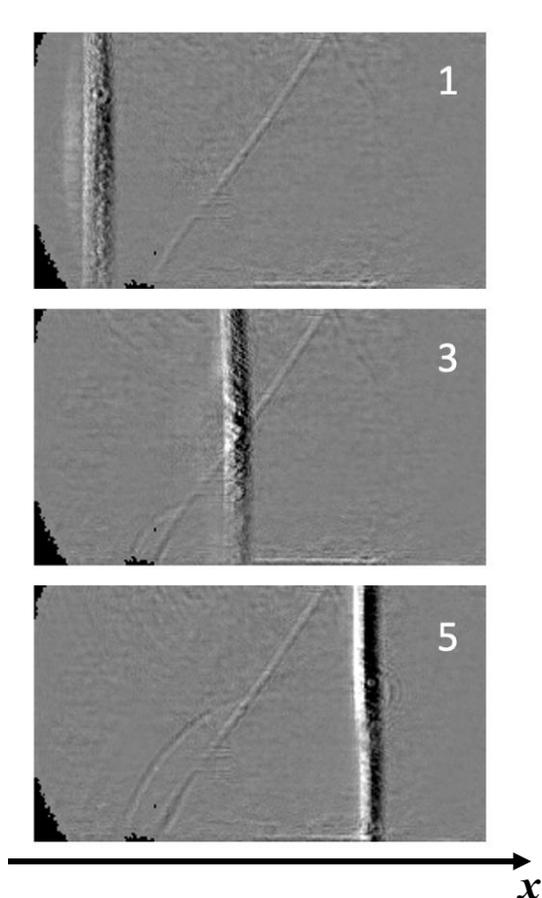
№	Начальное давление $p_0$ (торр)	Число Маха ударной волны $M$	Скорость УВ (м/с)	Дата, примечания*	Тип течения
1	50	2,20	750	05.05.2017	а) плоская УВ в канале
2	25	3,37	1157	16.01.2020 *при участии автора	б) плоская УВ в канале с прямоугольным препятствием
3	50	2,31	793	05.05.2017 $X = +5$ мм	в) при инициировании импульсного объемного разряда; $X$ - положение УВ в момент разряда
4	50	1,95	669	05.05.2017 $X = -9$ мм	

1. Движение плоской ударной волны по каналу без препятствия.

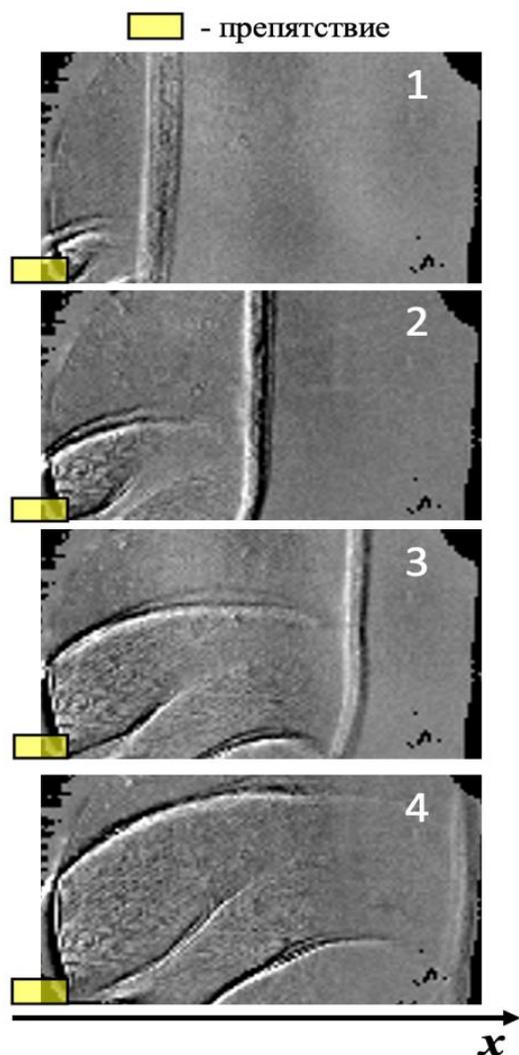
На *рис. 5* приведены кадры теневой высокоскоростной съемки, полученные в ходе *Эксперимента №1*. Время между кадрами 1 и 3, 3 и 5 составляет 13,4 мкс. Фронт ударной волны движется равномерно. Скорость движения, определенная по кадрам,  $v = 748 \pm 4$  м/с совпадает с измеренной по сигналам пьезодатчиков.

2. Движение плоской ударной волны по каналу с прямоугольным препятствием.

В *Эксперименте №2* оптические приборы были направлены на нижнюю область разрядной камеры: препятствие видно в левом нижнем углу изображений на *рис. 6*. Для контроля в области съемки на расстоянии  $\sim 10$  мм от переднего края препятствия был расположен вертикальный репер (на фото на *рис. 7* отсутствует). Время между приведенными кадрами составляет 6,7 мкс. По сигналам датчиков с помощью обработки осциллограммы давления была определена скорость УВ 1157 м/с.



*Рис. 5. Теневые изображения поля течения (Эксперимент №1)*



*Рис. 6. Теневые изображения после прохождения УВ препятствия (Эксперимент №2)*

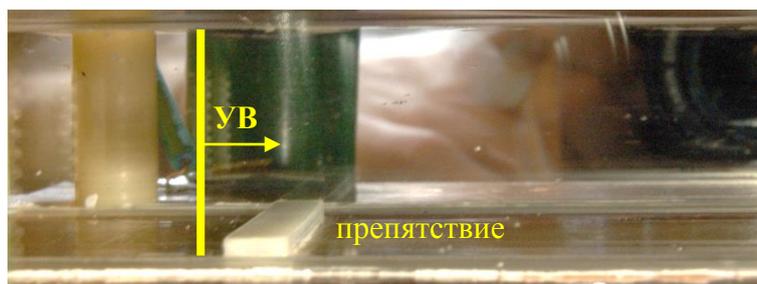
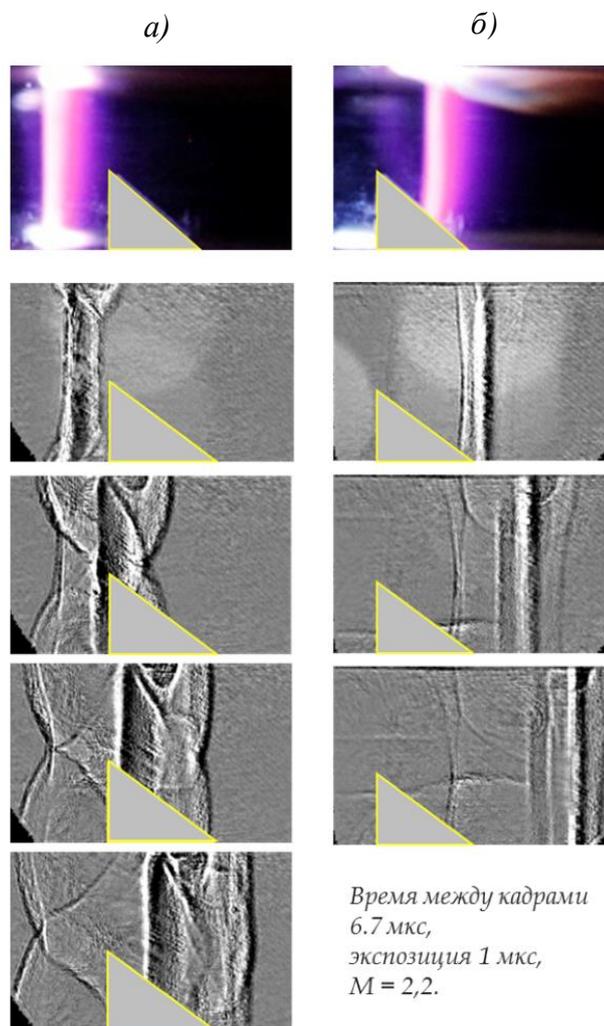


Рис. 7. Разрядная камера с препятствием

На рис. 6 приведены теневые изображения, полученные в ходе эксперимента №2. После прохождения препятствия верхняя часть фронта движется с постоянной скоростью, а нижняя часть – замедляется. Также наблюдается дифракция УВ: появляются ударные волны, отраженные от нижней стенки и образовавшиеся вблизи препятствия. Ударно-волновая конфигурация изменяется с течением времени в результате движения и взаимодействия всех волн друг с другом.

3. Движение ударной волны по каналу разрядной камеры после инициирования импульсного объемного разряда.

В зависимости от положения плоской ударной волны относительно разрядного объема, как показали фотоизображения свечения, ток объемного разряда может протекать как перед фронтом, так по фронту ударной волны [3]. В первом случае (*Эксперимент №4, рис. 8, а*) происходят распады газодинамических разрывов на левой границе плазменного объема, содержащей фронт ударной волны (слева – спутный поток, справа – плазма разряда), и на правой границе (плазма разряда – покоящийся воздух). При распаде исходной плоской ударной волны образуются две ударные волны и контактная поверхность, а на границе плазма-неподвижный воздух образуются ударная волна, контактная поверхность и волна разрежения [3, 5]. Одна из образовавшихся ударных волн движется вправо по области релаксирующей плазмы, сжимая ее и вызывая длительное послесвечение. Поверхностные разряды инициируют ударные волны, движущиеся в поперечном к фронту исходной ударной волны направлении и влияющие на структуру течения в целом. Ударно-волновая конфигурация изменяется с течением времени в результате движения и взаимодействия всех волн друг с другом. Во втором случае (*Эксперимент №3, рис. 8, б*) при выходе фронта ударной волны за пределы разрядного объема, структура свечения разряда и структура ударно-волновой конфигурации после разряда другие. В объеме образуются две ударные волны, движущиеся в противоположные стороны, и две КП, ограничивающие область газа, по которому протекал ток разряда. Поверхностные разряды создают ударные волны в спутном потоке и более интенсивные вблизи фронта ударной волны [4].



*Рис. 6. Изображения свечения разряда и теневые изображения после разряда в экспериментах №4 и №3 [3]*

### 3. Обработка экспериментальных изображений

Расчет скорости ударной волны по теневым изображениям, полученным в ходе эксперимента, проводится с помощью программы сканирования интенсивности. Для *Эксперимента №2* определялась координата максимального градиента освещенности изображения на разных участках в области фронта ударной волны.

Порядок работы с программой по сканированию интенсивности (см. *Приложения*):

- 1) Дать программе доступ к исследуемому изображению;
- 2) Указать границы сканирования по оси X: для этого необходимо заполнить поля x1, x2;
- 3) Указать высоту, на которой будет проводиться сканирование: для этого необходимо заполнить поля y1, y2;
- 4) Указать диапазон высот по оси Y: для этого необходимо заполнить поле HalfWidth;
- 5) Нажать кнопку «Show Profile»;
- 6) Затем программа построит зависимость интенсивности в диапазоне выбранной высоты от координаты (см *рис. 10*) и запишет на компьютер два файла с координатами точек.

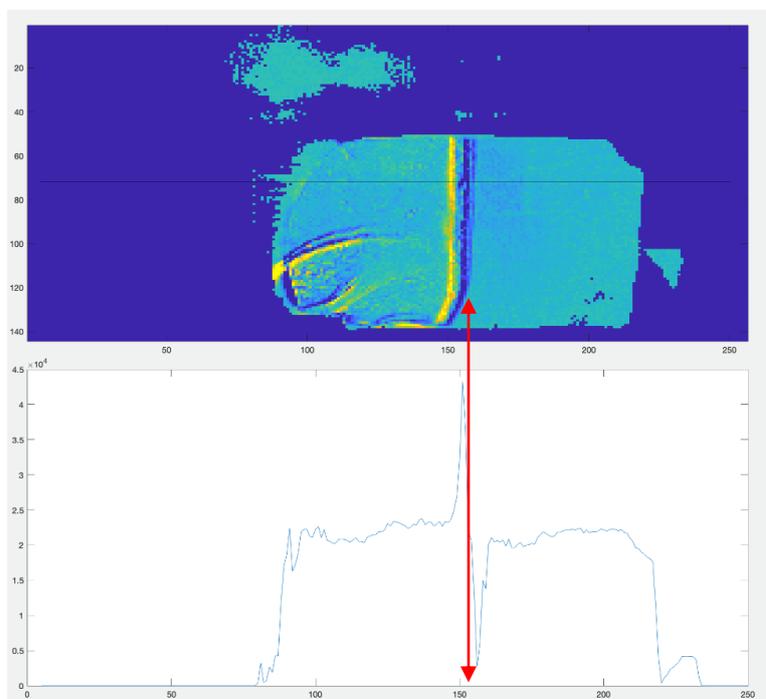
The screenshot shows a software interface with the following fields and values:

x1:	5	x2:	250
y1:	72	y2:	72
HalfWidth:	41		

At the bottom, there is a button labeled "Show Profile".

*Рис. 7. Скриншот рабочих полей программы*

Используя полученные данные, можно построить зависимость координаты фронта ударной волны от времени.



*Рис. 8. Скриншот результата работы программы на примере теневого изображения из эксперимента №2, красной стрелкой обозначена координата, которую необходимо определить.*

Для пересчета координаты фронта УВ из условных единиц в мм определяется длина репера с известными размерами (1 см):

$$\Delta x = x_{\text{к}} - x_{\text{н}} = 98 - 64 = 34 \text{ (y. e.)}$$

Таблица значений. Эксперимент №2.

Кадр	t, мкс	x, y.e.	Sx, y.e.	x, мм	Sx, мм
1	6,7	130	1	38,24	0,29
2	13,4	156	1	45,88	0,29
3	20,1	184	1	54,12	0,29
4	26,8	210	1	61,76	0,29
репер		34		10	

Строится зависимость координаты, определенной с помощью программы, от времени для участка фронта вблизи верхней стенки канала, вдали от препятствия. Проводится линейная аппроксимация.

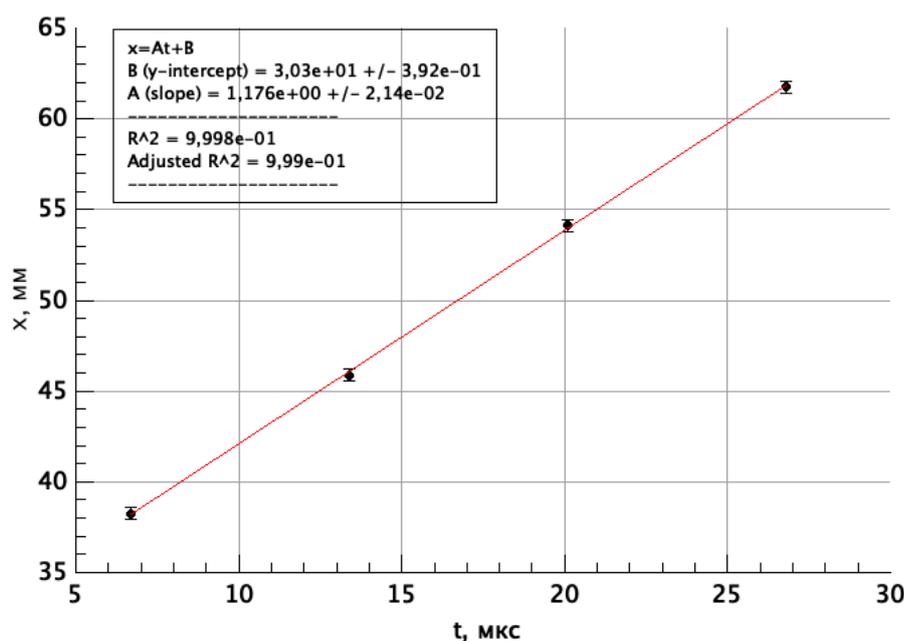


Рис. 11. Зависимость координаты фронта УВ от времени в Эксперименте №2

$$A = v = 1176 \pm 21 \text{ м/с}$$

Аналогичная обработка кадров проведена для Экспериментов №1, 3.

В Эксперименте №1 образуется ударная волна, которая движется равномерно (см рис. 12) в неизменном направлении. Скорость движения, определенная по кадрам,  $v = 748 \pm 4 \text{ м/с}$  совпадает с измеренной по сигналам пьезодатчиков.

Таблица значений. Эксперимент №1.

Кадр	t, мкс	x, у.е.	Sx, у.е.	x, см	Sx, см
1	6,7	47	1	0,67	0,01
2	13,4	79	1	1,13	0,01
3	20,1	114	1	1,63	0,01
4	26,8	144	1	2,06	0,01
5	33,5	187	1	2,67	0,01
6	40,2	222	1	3,17	0,01
репер		70		1,00	

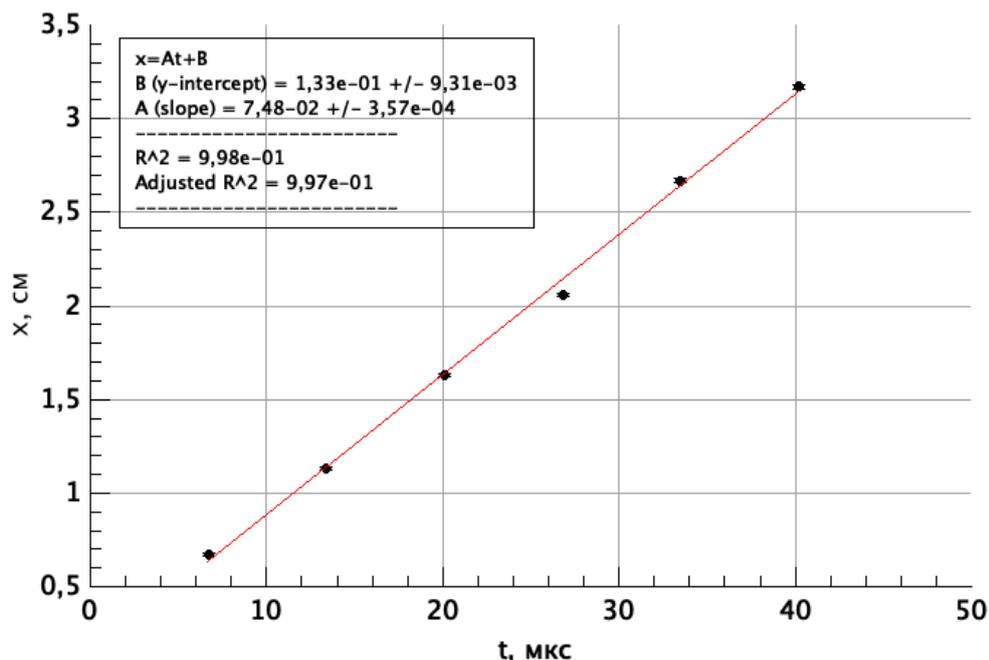


Рис. 12. Зависимость координаты фронта UV от времени в Эксперименте №1  
 $A = v = 748 \pm 4$  м/с

В Эксперименте №3 образуются две ударные волны, движущиеся от области разряда, и две контактные поверхности (КП), ограничивающие область газа, по которому протекал ток разряда (рис. 13,а). Скорости двух ударных волн в лабораторной системе координат  $v_1 = 804 \pm 10$  м/с и  $v_2 = 542 \pm 20$  м/с (рис. 13,б). Скорость первой больше, чем скорость исходной ударной волны. Вторая волна движется навстречу спутному потоку, и перемещается вправо с меньшей скоростью.

Таблица значений. Эксперимент №3.

Кадр	t, мкс	Волна	x, у.е.	Sx, у.е.	x, см	Sx, см
1	6,7	1	138	1	2,12	0,02
		2	122	1	1,88	0,02
2	13,4	1	173	1	2,66	0,02
		2	148	1	2,28	0,02
3	20,1	1	205	1	3,15	0,02
		2	168	1	2,58	0,02
4	26,8	1	244	1	3,75	0,02
		2	194	1	2,98	0,02
репер			65		10	

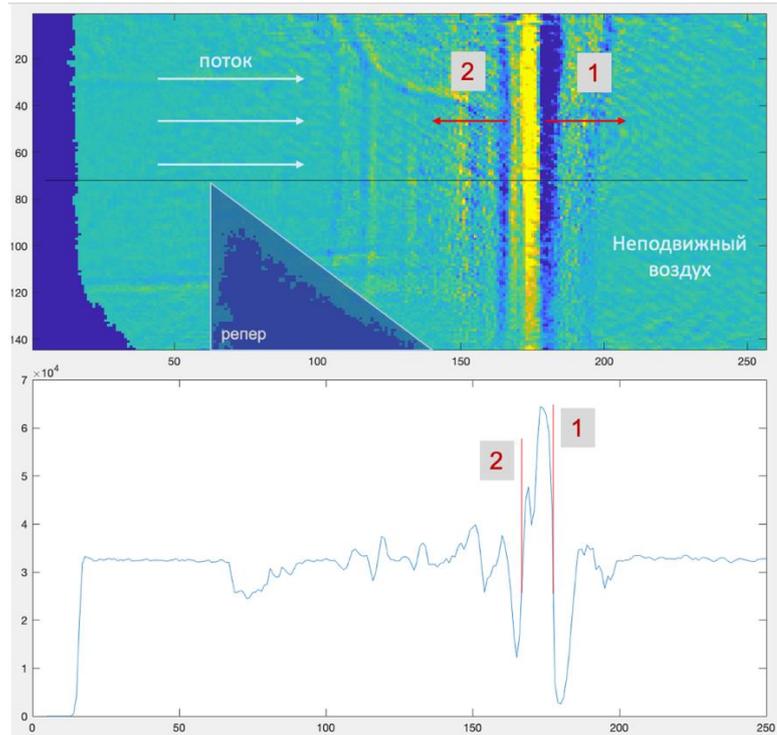


Рис. 13. а) Пример обработки изображения в Эксперименте №3

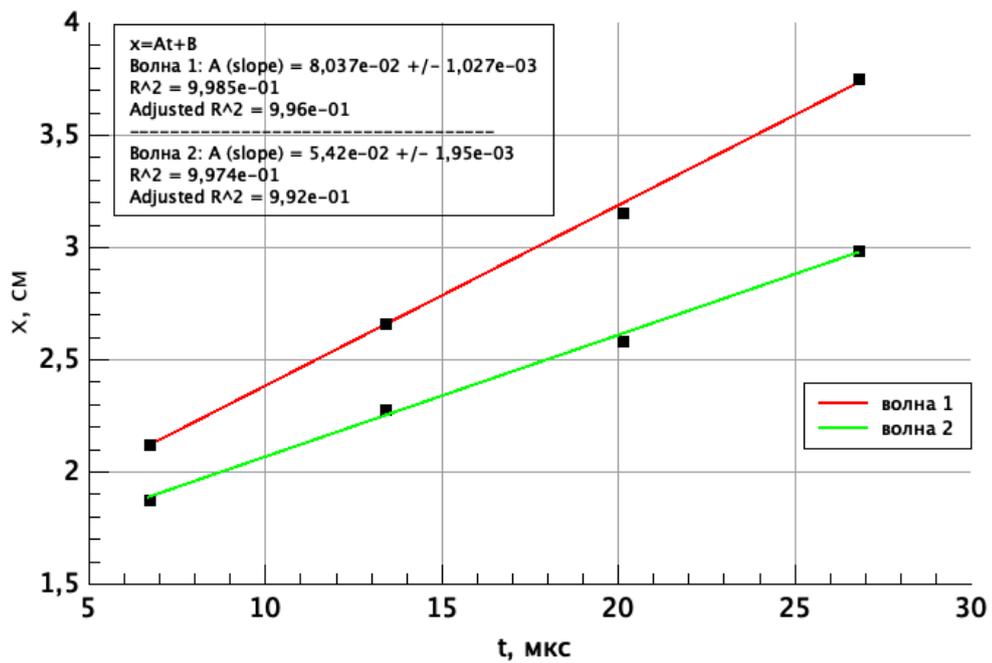


Рис. 13. б) Зависимость координаты фронта УВ от времени в Эксперименте №3

#### 4. Заключение

В результате работы был изучен теневой метод получения изображения на примере движения плоской ударной волны в канале ударной трубы. С помощью данного метода были получены теневые изображения движущейся ударной волной в канале с препятствием. Полученные высокоскоростной камерой серии теневых изображений поля течения позволили исследовать динамику идущих ударных волн.

Также был разработан метод определения координат неоднородностей на основе сканирования поля изображения. Этим методом были определены координаты фронтов ударных волн в разрядной камере и рассчитаны их скорости для трех типов течения: а) при движении плоской ударной волны по каналу без препятствия, б) при движении волны по каналу с прямоугольным препятствием и в) при инициировании импульсного объемного разряда перед ударной волной. Полученные значения скоростей сходятся в пределах погрешности со значениями, определенными с помощью пьезодатчиков (а, б), что говорит о точности метода обработки теневых изображений.

В результате исследования показано, что анализ теневого изображения эффективен для получения точной информации о движении фронта ударной волны.

## 5. Список использованных источников

- [1] Вовченко Е.Д., Кузнецов А.П., Савёлов А.С. Лазерные методы диагностики плазмы М., 2008. 204 с.
- [2] Знаменская И.А., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Экспериментальные исследования ударно-волновых процессов при импульсной ионизации поверхности канала в ударной трубе. ИФЖ, 2011. Т. 84, № 1. С. 32-37.
- [3] Знаменская И.А., Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В., Дорощенко И.А. Движение газодинамических разрывов после взаимодействия плоской ударной волны с импульсным разрядом. Proceedings of the 17 Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. Moscow, JИИТ RAS, 2018. P. 32-37.
- [4] Мурсенкова И.В., Ляо Ю., Иванов И.Э., Сысоев Н.Н. Характеристики наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха, обтекающем тонкий клин. Вестник МГУ, Сер. 3. Физика. Астрономия. 2019. № 3. С. 54-60.
- [5] Znamenskaya I., Mursenkova I., Doroshchenko I., Ivanov I. Flow analysis of a shock wave at pulse ionization: Riemann problem implementation. Physics of Fluids. 2019. V. 31, №11. 116101-(1-11)

## Приложения 1, 2, 3.

### 1.

function Face

```
global hFig hPict hGraph hDraw hProfil hClear hEdit_x1 hEdit_x2 hEdit_y1 hEdit_y2
hEdit_width

hFig = figure('OuterPosition', [50 50 1100 750]);

hPict = axes('Parent', hFig, 'Color', [1 1 1], 'Units', 'normalized', ...
            'Position', [0.02 0.52 0.6 0.45], 'FontSize', 10);

hGraph = axes('Parent', hFig, 'Color', [1 1 1], 'Units', 'normalized', ...
            'Position', [0.02 0.03 0.6 0.45], 'FontSize', 10, 'XTick', [0 1500], 'YTick',
[0 1000]);

hLabel_x1 = uicontrol(hFig, 'Style', 'text', 'Units', 'normalized',...
                    'Position', [0.72 0.54 0.025 0.03],...
                    'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center', 'String', 'x1:');

hLabel_x2 = uicontrol(hFig, 'Style', 'text', 'Units', 'normalized',...
                    'Position', [0.83 0.54 0.025 0.03],...
                    'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center', 'String', 'x2:');

hLabel_y1 = uicontrol(hFig, 'Style', 'text', 'Units', 'normalized',...
                    'Position', [0.72 0.44 0.025 0.03],...
                    'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center', 'String', 'y1:');

hLabel_y2 = uicontrol(hFig, 'Style', 'text', 'Units', 'normalized',...
                    'Position', [0.83 0.44 0.025 0.03],...
                    'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center', 'String', 'y2:');

hLabel_width = uicontrol(hFig, 'Style', 'text', 'Units', 'normalized',...
                    'Position', [0.77 0.34 0.07 0.03],...
                    'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center', 'String', 'HalfWidth:');

hEdit_x1 = uicontrol(hFig, 'Style', 'edit', 'Units', 'normalized',...
                    'BackgroundColor', 'w', 'Position', [0.72 0.5 0.08 0.04],...
                    'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center', 'String', 5);

hEdit_x2 = uicontrol(hFig, 'Style', 'edit', 'Units', 'normalized',...
                    'BackgroundColor', 'w', 'Position', [0.83 0.5 0.08 0.04],...
                    'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center', 'String', 250);

hEdit_y1 = uicontrol(hFig, 'Style', 'edit', 'Units', 'normalized',...
                    'BackgroundColor', 'w', 'Position', [0.72 0.4 0.08 0.04],...
                    'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center', 'String', 72);

hEdit_y2 = uicontrol(hFig, 'Style', 'edit', 'Units', 'normalized',...
                    'BackgroundColor', 'w', 'Position', [0.83 0.4 0.08 0.04],...
                    'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center', 'String', 72);

hEdit_width = uicontrol(hFig, 'Style', 'edit', 'Units', 'normalized',...
                    'BackgroundColor', 'w', 'Position', [0.77 0.3 0.08 0.04],...
                    'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center', 'String', 41);

hProfil = uicontrol(hFig, 'Style', 'PushButton', 'Units', 'normalized',...
                    'Position', [0.76 0.16 0.1 0.05], 'FontSize', 12, 'String', 'Show Profile', ...
                    'Callback', 'Profile');

hClear = uicontrol(hFig, 'Style', 'PushButton', 'Units', 'normalized',...
                    'Position', [0.7 0.05 0.1 0.05], 'FontSize', 12, 'String', 'Clear',...
```

```

        'Callback', 'cla');

hDefault = uicontrol(hFig, 'Style', 'PushButton', 'Units', 'normalized',...
    'Position', [0.83 0.05 0.1 0.05], 'FontSize', 12, 'String', 'Set Default',...
    'Callback', 'Set_Default');
end

```

---

## 2.

`function` Profile

```

global hFig hPict hGraph hDraw hProfil hClear hEdit_x1 hEdit_x2 hEdit_y1 hEdit_y2
hEdit_width

I = imread ('путь к файлу');
plot(I)

x1 = str2num(get(hEdit_x1, 'String'));
x2 = str2num(get(hEdit_x2, 'String'));
y1 = str2num(get(hEdit_y1, 'String'));
y2 = str2num(get(hEdit_y2, 'String'));
d = str2num(get(hEdit_width, 'String'));

x_vect = [x1 x2];
y_vect = [y1 y2];
line_num = zeros(abs(x_vect(2)-x_vect(1)+1), 1);

for i = -d : 1: d
    y_vect_sub = y_vect + i;
    line_simb = improfile(I, x_vect, y_vect_sub);
    line_bw = line_simb(:, :, 1);
    line_num = line_num + line_bw ./ (2*d + 1);
end;

x = x1 : 1 : x2;

hImage = image(I, 'Parent', hPict, 'CDataMapping','scaled');
hLine = line(x_vect, y_vect, 'Parent', hPict, 'Color', 'k');
plot(x, line_num);

fid = fopen('/Users/krevetka/Desktop/result_1.txt', 'at');
fprintf(fid, '%0.3f\n', line_num);
fclose(fid);

fid=fopen('/Users/krevetka/Desktop/result_2.txt', 'at');
fprintf(fid, '%0.3f\n', x);
fclose(fid);
end

```

---

## 3.

`function` Set\_Default

```

global hFig hEdit_x1 hEdit_x2 hEdit_y1 hEdit_y2

set(hEdit_x1, 'String', 5);
set(hEdit_x2, 'String', 250);
set(hEdit_y1, 'String', 72);
set(hEdit_y2, 'String', 72);
end

```