

## Быстрая теневая визуализация импульсного разряда в коротком газовом промежутке

© С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, А.А. Козлов, В.О. Ревазов, Р.Х. Якубов

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ВНИИА),  
127055 Москва, Россия  
e-mail: vniia4@vniia.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 3 июля 2022 г.

Принято к публикации 3 июля 2022 г.

Методом тенеграфии с наносекундным временным разрешением проведено исследование процесса коммутации короткого (1 mm) газонаполненного промежутка, инициируемого искровым разрядом по поверхности диэлектрика. Обнаружены присутствие ударной волны, распространяющейся от катодного пятна, и признаки промежуточного накопления вкладываемой энергии в виде энергии возбуждения молекул газа или турбулентного течения газа.

**Ключевые слова:** теневая визуализация, газовый разряд, ударные волны, коммутаторы.

DOI: 10.21883/JTF.2022.10.53244.106-22

### Введение

Изучение ударных волн (УВ) представляет интерес не только для фундаментальной науки, но и с точки зрения практического применения. В последнее время интенсивно развивается сравнительно новая область физики плазмы-плазменная аэродинамика. Задачи плазменной аэродинамики связаны с вопросами взаимодействия плазменных образований с высокоскоростными потоками воздуха и различных газовых смесей. Электрический разряд в газе рассматриваются как эффективный способ подвода энергии к потоку газа в результате джоулевой диссипации энергии электрического тока разряда [1,2]. С практической точки зрения это можно использовать, например, для перестройки ударно-волновых конфигураций перед летательным аппаратом, управляя обтеканием, или использовать как эффективный способ воспламенения воздушно-топливных смесей в двигателях. Ударно-волновые явления возникают при большом энерговкладе в малом объеме за короткий промежуток времени, например, при искровых разрядах в воздухе. Следует отметить, что течение газа, вызванное искровым разрядом, отличается от мгновенного взрыва, так как время движения УВ соизмеримо со временем энерговыделения. Физическая картина явлений, возникающих при распространении ударных волн в термически неравновесной слабоионизованной плазме, до сих пор изучена недостаточно, ввиду сложности этой картины.

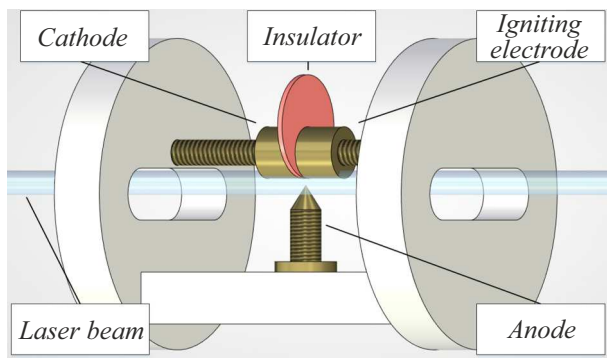
В настоящей работе представлены результаты исследования процесса коммутации короткого воздушного промежутка, инициируемого с помощью вспомогательного искрового разряда по поверхности диэлектрика, методом теневой визуализации с наносекундным временным разрешением. Далее в тексте будем иногда использовать для краткости термин тенеграфия.

### 1. Схема эксперимента

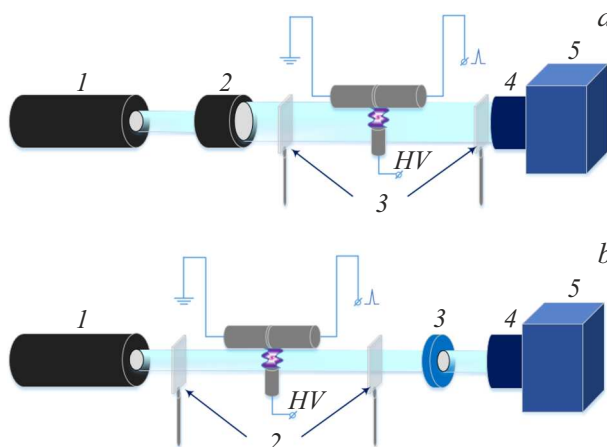
В проведенных исследованиях использовалось компактное газонаполненное разрядное устройство. Разрядное устройство представляло собой трехэлектродную систему, основными элементами которой являются катод, поджигающий электрод, и диэлектрическая шайба, разделяющая катод и поджигающий электрод, и отдельно расположенный анод (рис. 1).

Вспомогательный инициирующий искровой разряд происходит по поверхности диэлектрической (керамика типа корунд) шайбы толщиной 0.4 mm на участке поверхности, наиболее приближенном к поверхности анода, между заземленным катодом и поджигающим электродом при подаче на поджигающий электрод высоковольтного импульса напряжения положительной полярности и амплитудой до 3 kV. Продолжительность инициирующего разряда составляет менее 0.1  $\mu$ s. Амплитуда тока — до 10 A. Основной дуговой разряд происходит между цилиндрическим катодом и коническим анодом, который находится под положительным потенциалом 3.5 kV. Разряд в промежутке катод–анод протяженностью 1 mm инициировался в воздухе при атмосферном давлении. Разряд представлял собой затухающие колебания силы тока с периодом 2  $\mu$ s, амплитуда которых в первом полупериоде разряда достигала 4.5 kA. Разряд переходит в режим короткого замыкания в течение промежутка времени менее 0.2  $\mu$ s после старта инициирующего разряда [3].

В качестве источника зондирующего излучения использовался импульсный твердотельный лазер, испускающий световой импульс длительностью 2.5 ns на полувысоте с несущей длиной волны  $\lambda = 1.06 \mu$ m. С помощью генератора задержанных импульсов осуществлялась синхронизация запуска лазера и генерации иници-



**Рис. 1.** Схема эксперимента по получению теневых изображений разряда с помощью просвечивания лучом импульсного лазера.



**Рис. 2.** *a* — первый вариант оптической схемы эксперимента: 1 — зондирующий лазер, 2 — увеличивающий объектив, 3 — оптические фильтры, 4 — увеличивающий объектив, 5 — видеокамера; *b* — второй вариант оптической схемы эксперимента: 1 — зондирующий лазер, 2 — оптические фильтры, 3 — диафрагма с отверстием 3 мм, 4 — увеличивающий объектив, 5 — видеокамера.

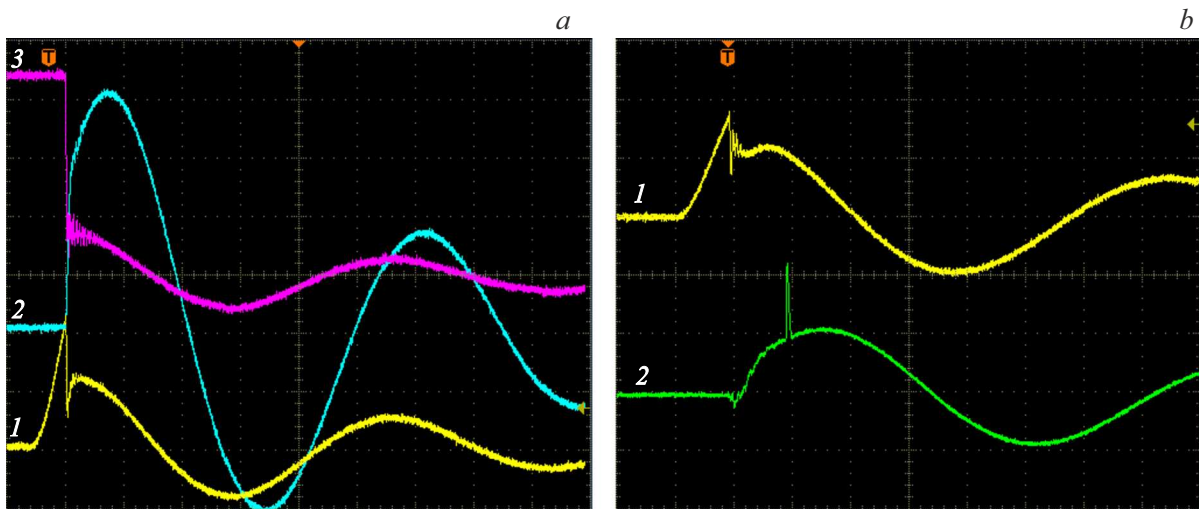
рующего высоковольтного импульса. Диаметр практически параллельного пучка излучения на выходе из лазера составлял около 3 мм. Зондирование исследуемого объекта выполнялось в двух вариантах (рис. 2). В первом варианте с помощью вспомогательного объектива диаметр пучка лазерного излучения предварительно увеличивался в 2 раза, чтобы расширить область зондирования и упростить юстировку, и затем уже уширенный пучок излучения проходил через разрядное устройство как показано на рис. 1. Далее зондирующее излучение попадало в еще один объектив, который производил дополнительное уширение пучка, что позволяло получить увеличенное изображение объекта. Затем пучок попадал на входное окно высокоскоростной видеокамеры OPHIR Spiriton BGS—USB—SP928—OSI, которая регистрировала теневое изображение исследуемого объекта в диапазоне длин волн 190–1100 нм с временем экспозиции единичного

кадра  $60 \mu\text{s}$ . Во втором варианте для зондирования исследуемого объекта использовался пучок лазерного излучения без предварительного уширения, но излучение, прошедшее область разряда, коллимировалось, что уменьшало вклад в формируемое изображение разряда той части лазерного излучения, которая под воздействием явления рефракции отклонилась от первоначального направления распространения.

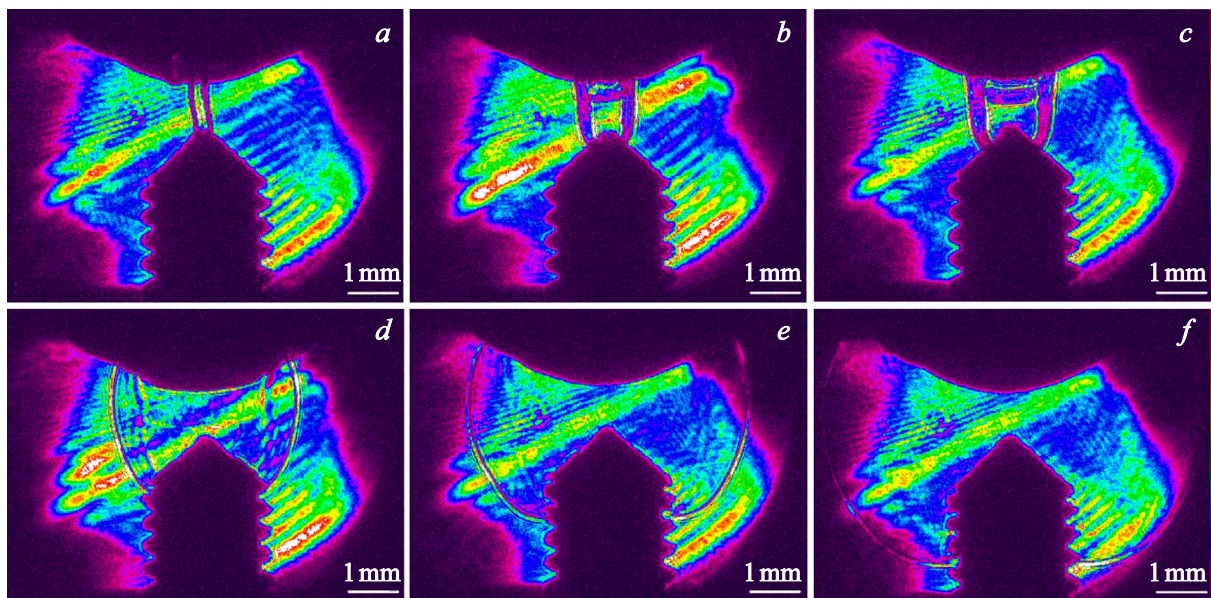
В первом случае мы получили схему теневого зондирования параллельным пучком с повышенным пространственным разрешением. Во втором случае была реализована схема зондирования исследуемого объекта, которая в большей степени реагировала на области с высоким градиентом плотности вещества. В каждом разряде регистрировалось единичное теневое изображение промежутка катод—анод с определенной временной привязкой относительно момента коммутации схемы инициирующего искрового разряда по поверхности диэлектрика.

Использование программного обеспечения системы цифровой обработки и формирования изображения, зафиксированного с помощью видеокамеры, позволяло „вычистить“ фоновую засветку. Подбор соответствующих поглощающих оптических фильтров, размещенных на пути распространения лазерного излучения, дал возможность, с одной стороны, вырезать узкий диапазон длин волн вблизи несущей волны лазерного излучения  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$  и полностью исключить свечение плазмы. С другой стороны, подбор фильтров обеспечивал такую величину интенсивности лазерного излучения, достигающего видеокамеры, при которой не происходило пересыщения пикселей видеокамеры, но получаемое изображение, в свою очередь, оказалось достаточно ярким. Ниже в тексте изображения приведены в цвете по следующим соображениям. Используемый нами лазер-осветитель, т.е. источник зондирующего излучения, имеет достаточно неоднородное поле излучения в поперечном сечении. В этих условиях использование цветовой палитры позволяет легче отделить на получаемом изображении неоднородности, обусловленные качеством источника зондирующего излучения, от оптических неоднородностей в исследуемом объекте. Вертикальная цветная полоска в правой части соответствующих рисунков демонстрирует относительную интенсивность (или флюээнс энергии) прошедшего зондирующего излучения — при перемещении снизу вверх указанный параметр увеличивается.

В ходе экспериментов регистрировались следующие осциллограммы: импульсного напряжения, подаваемого на поджигающий электрод; силы тока в промежутке катод—анод, сигнала с фотодатчика, фиксирующего импульс зондирующего лазерного излучения (рис. 3). Все это позволяло осуществить временную привязку регистрируемых изображений к фазе развития разрядов как инициирующего, так и основного.



**Рис. 3.** Осциллограммы сигналов, регистрируемых в эксперименте: *a* — луч № 1 — напряжение в промежутке катод–поджигающий электрод, луч № 2 — ток в промежутке катод–анод, луч № 3 — напряжение в промежутке катод–анод. Чувствительность: луч № 1 — 1 kV/div, луч № 2 — 1 кА/div, луч № 3 — 1 kV/div; *b* — луч № 1 — напряжение в промежутке катод–поджигающий электрод, луч № 2 — сигнал с фотодатчика, фиксирующего импульс зондирующего лазерного излучения. Чувствительность: луч № 1 — 1 kV/div, луч № 2 — 2kV/div. Развертка — 400 ns. На сигнал с фотодатчика накладывается низкочастотная наводка от тока, протекающего в цепи разряда в промежутке катод–анод.



**Рис. 4.** Изображения пространственной области катод–анод, зарегистрированные через 0.4 (*a*), 0.7 (*b*), 0.8 (*c*), 1.2 (*d*), 2.0 (*e*), 3.2 μs (*f*) от момента начала протекания тока в основном разряде. Изображения получены при использовании оптической схемы теневого зондирования параллельным пучком.

## 2. Результаты использования двух оптических схем

Анализ изображений, полученных в серии экспериментов с использованием схемы теневого зондирования параллельным пучком показал, что зондирующее лазерное излучение позволяет зарегистрировать особенности пространственной структуры оптической среды

при разряде в области межэлектродного промежутка катод–анод. Полученные изображения (рис. 4) в области основного разряда между катодом и анодом отражают процесс распространения УВ в газе, причем первоначально она близка цилиндрической соосной аноду, а затем по мере распространения трансформирующаяся в сферическую волну. Наблюдаются два скачка плотности (СП), т.е. две области разрыва. Первый

из них (передний) соответствует фронту УВ, второй (задний) — возможно, представляет собой контактную границу между фронтом УВ и каналом протекания тока. Если данное предположение верно, то с самого начала и до момента времени  $0.8\mu\text{s}$  после старта разряда УВ имеет скорость большую, чем скорость расширения канала тока. А примерно в момент  $1.2\mu\text{s}$  после старта происходит отрыв УВ от канала тока, и изображение второго СП в дальнейшем визуально не фиксируется.

Формирование УВ обусловлено расширением канала тока в окружающую среду со сверхзвуковой скоростью. Геометрическая форма используемого анода за счет соответствующей пространственной структуры электрического поля обеспечивает преимущественное развитие разряда вдоль оси симметрии анода (или вблизи нее). Кроме того, использование уширенного пучка зондирующего излучения позволило осуществлять пространственную привязку наблюдаемых объектов в достаточно широком временном интервале.

Видно, что в области СП во фронте УВ вещество более оптически плотное, чем перед фронтом волны, но отчасти оно остается оптически прозрачным. В то же время можно заметить, что непосредственно за первым СП, там где должна находиться так называемая зона релаксации, мы наблюдаем некий переходный слой, вещество, которое оказывается оптически мало и прозрачным для зондирующего излучения. Причем толщина этого слоя между первым и вторым СП постепенно возрастает, по крайней мере, на стадии цилиндрической волны. Можно обратить внимание на то обстоятельство, что указанный переходный слой отчетливо виден на изображениях цилиндрической ударной волны, а по мере перехода в стадию сферической волны он просветляется и становится незаметным.

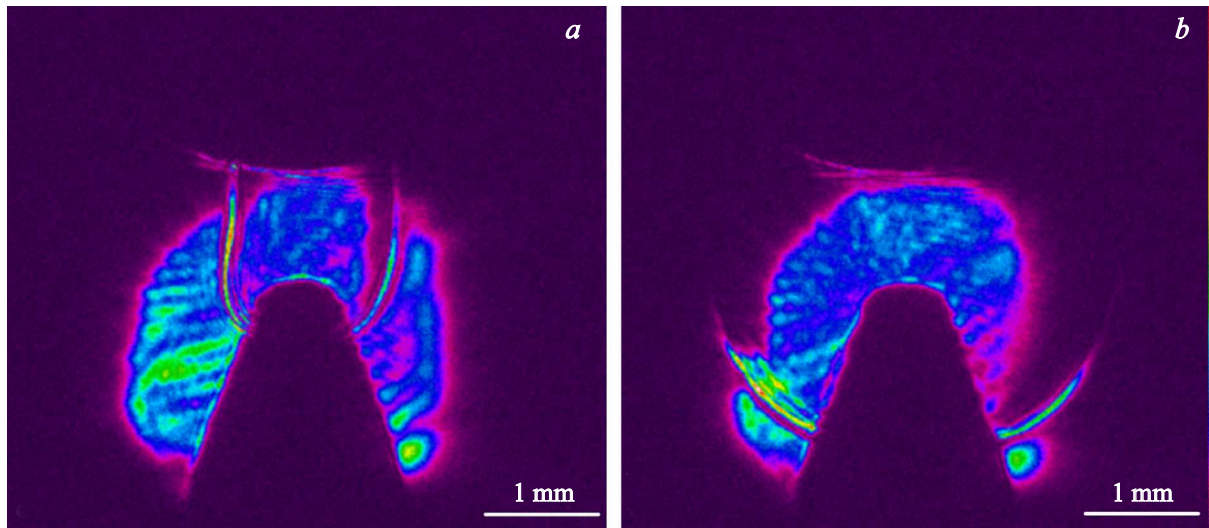
СП имеет наибольший градиент во фронте ударной волны ввиду его малой толщины — теоретически порядка длины свободного пробега частиц в газе. Плотность вещества за СП также имеет градиент [4].

Интересно отметить, что в данной серии экспериментов помимо изображений ударной волны, создаваемой каналом тока основного разряда, нам удается наблюдать изображение еще одного объекта, расположенного внутри области, уже подвергшейся воздействию процесса ударного сжатия (рис. 4, *a, b*). Это узкая область пространства слегка изогнутой формы, вытянутая в направлении, перпендикулярном поверхности цилиндрической ударной волны, отличающаяся пониженной интенсивностью прошедшего через нее зондирующего излучения и весьма похожая по толщине и интенсивности прошедшего излучения на изображения сферической ударной волны искрового канала. Направление изгиба заставляет предположить, что это ударная волна или катодный факел, распространяющийся из малой ( $\leq 100\mu\text{m}$ ) области на поверхности катода. Отдельно необходимо отметить, что при использовании данной оптической системы в случае инициирования основного разряда в вакууме мы не наблюдали не только ударных волн, что вполне

естественно, но и каких-либо признаков повышения плотности вещества в межэлектродном промежутке, например, в виде выброса катодного или анодного факела. Напрашивается вывод о том, что мы наблюдаем скорее ударную волну, создаваемую в результате выброса вещества из катодного пятна искрового и далее дугового разряда или в результате расширения канала искрового разряда по поверхности диэлектрика, а не фронт катодного факела. Катодное пятно локализовано вблизи того места, где произошел пробой по поверхности диэлектрика, разделяющего катод и поджигающий электрод, о чем свидетельствует наблюдаемый характер эрозии поверхности катода.

В серии экспериментов с использованием схемы без предварительного уширения зондирующего пучка и коллимированием зондирующего излучения, прошедшего область разряда, была несколько изменена форма анода. Был уменьшен угол раствора конуса и увеличен радиус кривизны его вершины с целью обеспечить возможность наблюдения как цилиндрической, так и сферической стадии развития ударной волны в условиях уменьшенного диаметра пучка зондирующего излучения (рис. 5).

Изменение оптической схемы эксперимента привело к тому, что заметные изменения претерпел характер регистрируемых изображений. Во-первых, во фронте УВ ранее следовали друг за другом узкие области сначала просветления, а затем — затемнения, что было вызвано наличием СП и соответствующим градиентом показателя преломления. Теперь же перед указанной областью просветления появилась еще одна узкая, но ясно наблюдаемая зона затемнения, которая, вероятно, находится перед фронтом УВ. Особенность оптической схемы зондирования в данном случае позволяет предположить, что в этой вновь обнаруженной области пространства вещество находится в состоянии, которое приводит к сильному рассеянию зондирующего излучения на градиентах показателя преломления. Например, это может быть состояние турбулентности (завихрения), т.е. в данной области пространства образуются многочисленные хаотические скачки плотности. Во-вторых, в целом изображение области за фронтом УВ оказывается затемненным по сравнению с пространством перед фронтом УВ, чего не наблюдалось в первом варианте зондирования. Опять-таки это обстоятельство может быть связано с турбулентным состоянием вещества. В-третьих, наиболее бросающееся в глаза отличие — наблюдается появление области сразу за фронтом УВ, причем как на стадии цилиндрической, так и сферической волны, совершенно непроницаемой для зондирующего излучения. Причем ширина указанной области — наибольшая у поверхности катода, и постепенно уменьшается в направлении к аноду, а с течением времени только возрастает. В-четвертых, следует отметить, что ранее регулярно присутствующий (при использовании схемы теневого зондирования параллельным пучком) на изображениях объект, распространяющийся вдоль оси основного разряда и трактуемый выше в качестве



**Рис. 5.** Изображения пространственной области катод–анод, зарегистрированные через  $0.9$  (а) и  $1.2 \mu\text{s}$  (б) от момента начала протекания тока в основном разряде. Изображения получены при использовании оптической схемы с коллимированием зондирующего лазерного излучения, прошедшего через исследуемый объект.

предположения как УВ из области формирования катодного пятна, в данной постановке эксперимента не наблюдался.

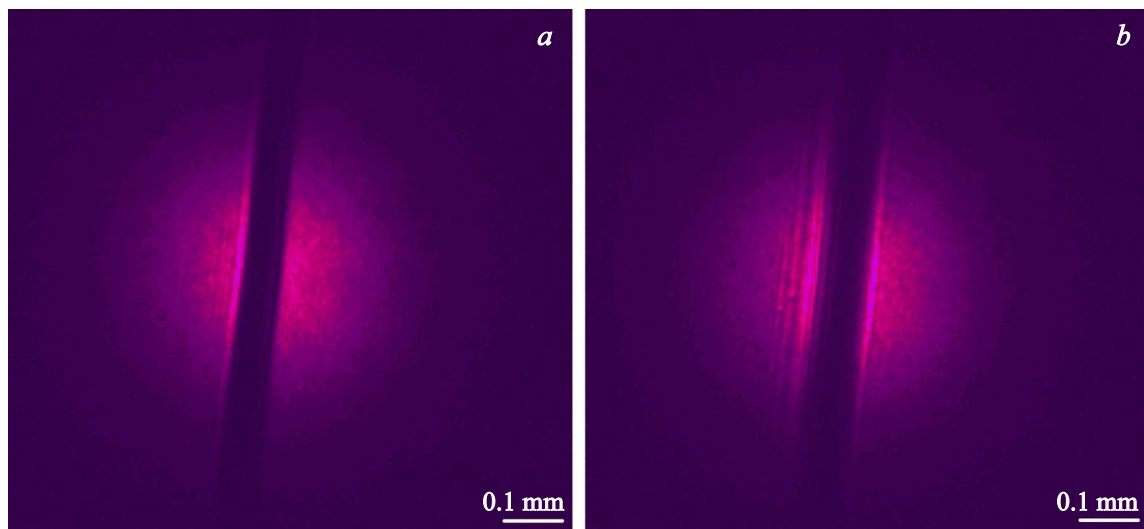
Таким образом, сравнивая характер зарегистрированных с использованием двух оптических схем изображений межэлектродного промежутка катод–анод в процессе развития дугового разряда можно отметить следующие обстоятельства. После прохождения УВ, обусловленной развитием канала дугового разряда, газовая среда практически в течение всего времени наблюдения находится в особом оптическом состоянии и обладает повышенной способностью к поглощению и рассеиванию зондирующего излучения. В наибольшей степени эти свойства обнаруживаются в некотором переходном слое (или точнее двух слоях вероятно различной природы), находящемся сразу за СП во фронте ударной волны и имеющим толщину  $0.08\text{--}0.6 \text{ mm}$  при теньевом зондировании и  $0.2\text{--}1.2 \text{ mm}$  при зондировании с коллимацией прошедшего излучения. В обоих случаях наблюдается увеличение толщины слоя с течением времени. В первом случае переходный слой полупрозрачен для зондирующего излучения и его толщина примерно одинакова вдоль фронта УВ и имеет хорошо различимую заднюю границу на стадии цилиндрической волны. Мы идентифицировали его как зону релаксации. Можно предположить, что зона релаксации, располагающаяся между двумя регистрируемыми СП, играет с одной стороны роль контактной границы между фронтом УВ и каналом протекания тока, а с другой — поршня, вызывающего появление УВ. Во-втором случае — переходный слой полностью непрозрачен для зондирующего излучения, а толщина слоя наибольшая у катода и постепенно уменьшается при приближении к аноду вплоть до полного исчезновения слоя. В первом случае переходный слой

наблюдается только на стадии цилиндрической волны и сходит на нет при трансформации волны в сферическую. Во-втором — наличие слоя фиксируется как на стадии цилиндрической волны, так и на стадии сферической волны.

При использовании оптической схемы теневого зондирования обнаружен объект, обладающий повышенной способностью к поглощению и рассеиванию зондирующего излучения и распространяющийся в области, подвергшейся воздействию ударной волны, в направлении от катода к аноду. Указанный объект регулярно наблюдался на стадии цилиндрической волны. На стадии трансформации цилиндрической волны в сферическую волну ( $0.8 \mu\text{s}$  после старта основного разряда) и далее объект перестает регистрироваться. При использовании оптической схемы зондирования с коллимацией прошедшего излучения подобный объект не наблюдался.

Когерентное лазерное излучение будет испытывать дифракцию на фронте ударной волны, если ее толщина сопоставима с длиной волны излучения. Теоретически так и должно быть. Технически мы не в силах наблюдать газодинамический разрыв такого масштаба, например, в силу размытия изображения в результате рефракции [5]. Вероятно, действуют и физические причины реального размытия фронта УВ, например, проникновение за фронт УВ электронов и излучения, ионизирующих нейтральный газ [4].

Анализ литературы дает дополнительную пищу для размышлений. Качественные теньевые изображения плотной плазмы разрядов в вакууме не обнаруживают следов дифракции [6–8]. Качественные изображения УВ в плотном газе, возникающие под действием движущихся со сверхзвуковой скоростью тел, не обнаруживают следов дифракции [5]. Авторы [9] получили теньевые изображе-



**Рис. 6.** Теневые изображения проволоочки: *a* — „хорошая“ фокусировка, дифракционная картина не наблюдается; слева на проволочке виден блик; *b* — „плохая“ фокусировка, наблюдается дифракционная картина.

ния катодной плазмы на начальной стадии разряда в газе, причем в качестве катода выступала проволочка диаметром  $30\ \mu\text{m}$ , и также ничего похожего на интерференционные полосы не наблюдали. В работе [10] представлены теневые изображения лазерной плазмы продуктов абляции твердотельной мишени в атмосфере, на которых отсутствуют следы дифракции. В некоторых сообщениях фигурируют теневые изображения, несущие следы полосатых структур, напоминающих картину дифракции. Например, в [11] на изображениях края области газа высокого давления, нагреваемой лучом лазера, наблюдаются периодические структуры, похожие на интерференционные полосы. В работе [12] приведены изображения лазерной плазмы из продуктов абляции в воздухе, и на краю плазменного факела кое-где видны полосы, похожие на интерференционные. Пожалуй наиболее интересный в данном случае результат получен авторами работы [13]. При получении тенеграмм факела лазерной плазмы в атмосферном воздухе было обнаружено следующее обстоятельство. Наблюдаемая ширина полос (СП и т.п.) зависит от точки фокусировки видеокамеры. При фокусировке в центре УВ изображение ее фронта имеет минимальную толщину, кроме того, ничего похожего на интерференционные полосы не наблюдается. При изменении точки фокусировки (ближе, дальше) толщина изображения фронта увеличивается и появляются полосы, похожие на интерференционные. Речь во всех приведенных примерах идет о теневой визуализации различных объектов с помощью импульса лазерного излучения оптического диапазона наносекундной или менее длительности. Позволим себе сделать некоторый вывод по приведенным выше данным. Вероятно, наличие или отсутствие картины дифракции на получаемых теневым методом изображениях макрообъектов, подобных выше описанным, обладаю-

щих значительными градиентами оптической плотности, определяется в первую очередь качеством фокусировки оптической системы, формирующей изображение. Кроме того, нельзя исключать, что поток электронов и излучения, способных ионизовать нейтральное вещество перед фронтом УВ, может привести к формированию неких периодических структур в плазме перед фронтом УВ [14].

Был проведен контрольный опыт. На месте исследуемого объекта разместили проволочку диаметром  $70\ \mu\text{m}$  и получили ее теневые изображения с помощью лазерного осветителя (гелий-неоновый лазер с  $\lambda = 0.622\ \mu\text{m}$ ), представленные на рис. 6.

В условиях „хорошей“ фокусировки видеокамеры на проволочку мы наблюдали отчетливое изображение проволоочки и дифракционная картина отсутствует. В условиях „плохой“ фокусировки изображение проволоочки несколько размыто и наблюдается дифракционная картина, причем ширина полос не зависит от степени дефокусировки. Полная ширина первой (самой широкой) дифракционной полосы (которая пропорциональна  $(\lambda)^{1/2}$ ) в пересчете на рабочую длину волны зондирующего излучения составит  $30\ \mu\text{m}$  по объекту при том, что ширина регистрируемой области скачка плотности во фронте УВ составляет  $\sim 140\ \mu\text{m}$ , а наименьшая ширина элементов регистрируемой пространственной структуры разряда, которые напоминают картину дифракции, составляет  $\sim 120\ \mu\text{m}$ . Напрашивается вывод о том, что явление дифракции даже в том случае, когда фокусировка оптической системы оказывается не самой удачной (что неизбежно при некоторых наблюдающихся эволюциях геометрии изучаемого объекта от разряда к разряду при общей хорошей ее повторяемости) не способно замаскировать реальные особенности регистрируемых изображений. Достижимое пространственное разреше-

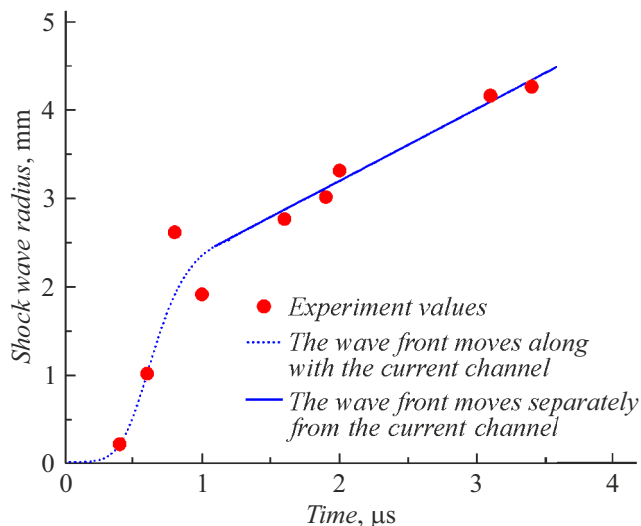
ние можно принять равным по крайней мере половине диаметра проволочки, т.е.  $\sim 35 \mu\text{m}$ .

### 3. Анализ результатов наблюдения пространственной структуры ударных волн

Результаты одной из серий экспериментов отображены в виде графической зависимости наблюдаемого перемещения фронта УВ (точнее СП), сформированной под действием основного разряда, в направлении, перпендикулярном по отношению к оси разрядного промежутка  $r_{dis}(t)$ , от времени, прошедшего с момента начала протекания тока основного разряда (рис. 7).

Характер полученной диаграммы похож на характер подобных (или ей аналогичных) графиков, приводимых в научной литературе другими авторами [4,14–19]. Большинство авторов приводит диаграммы зависимости  $r_{dis}(t)$  для ударных волн в плотных газах, на которых также присутствует линейный участок, отвечающий достаточно поздней фазе распространения фронта волны с постоянной скоростью  $\sim 10^2\text{--}10^3 \text{ m/s}$ . Принято считать твердо установленным, что рассматриваемый участок диаграммы соответствует ситуации отрыва фронта УВ от стенок канала разряда. Авторы [5,9] приводят диаграммы, на которых имеется два практически линейных участка, отвечающих двум разным скоростям. На ранней стадии — более высокой скорости, на поздней — примерно на порядок величины меньшей скорости.

Имеется, однако, существенное отличие от результатов, полученных нами. Начальный участок зависимости  $r_{dis}(t)$ , полученной в указанных работах, не



**Рис. 7.** Диаграмма зависимости смещения УВ, образованной при формировании канала основного разряда, в направлении, перпендикулярном к оси разряда, от времени, прошедшего с момента начала протекания тока в разряде. Смещение отсчитывается от оси разряда. Погрешность измерений в пределах экспериментальных точек.

имеет точки перегиба, отвечающей максимуму скорости распространения волны, как это наблюдается у нас. Линейный участок нашей диаграммы соответствует скорости равной  $8 \cdot 10^2 \text{ m/s}$ , а вот максимальная скорость на начальном (нелинейном на нашей диаграмме) участке значительно превышает эту величину и лежит в диапазоне  $(4\text{--}5) \cdot 10^3 \text{ m/s}$ . Одновременно необходимо признать, что, если мы допускаем существование на нелинейном участке диаграммы перегиба, то должен существовать участок медленного расширения, предваряющий область достижения максимума скорости. Скорость, соответствующая данному участку (до 250 ns) на нашей диаграмме, составляет  $\sim (4\text{--}5) \cdot 10^2 \text{ m/s}$ . Авторы [20] наблюдали при самопробое короткого газового промежутка в похожей геометрии электродной системы сразу после старта формирования системы микроканалов, расширяющихся с такой же скоростью, вплоть до момента слияния каналов через 20 ns после старта. Используя данные авторов работы [4] можно сделать оценку температуры и относительного уплотнения среды за фронтом ударной волны. Для участка, на котором достигается максимальная скорость фронта волны — 6000 K и  $\sim 10$ . Приведенное значение температуры согласуется с известными значениями температуры в катодном пятне, фиксируемой методами спектроскопии в оптическом диапазоне [21].

Что касается обнаруженного нами объекта, распространяющегося вдоль оси основного разряда в направлении от катода к аноду, то придется сначала вернуться к вопросу о его природе.

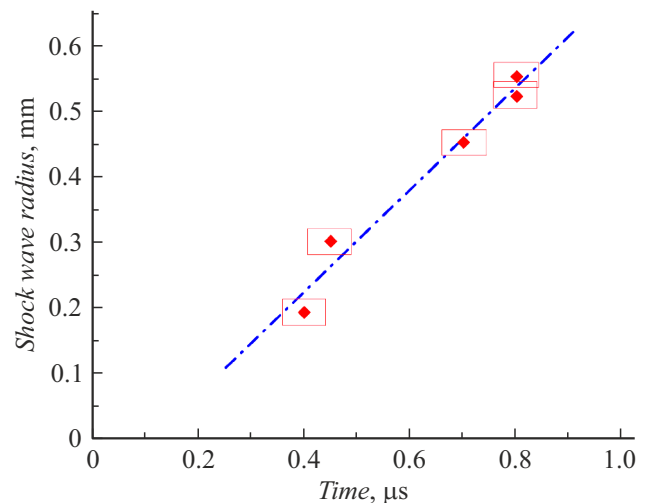
В качестве альтернативы уже предложенной гипотезы о том, что данный объект — это УВ, напрашивается предположение о явлении, которое наблюдается в различных плазменных экспериментах таких как, например, тлеющий разряд, лазерная плазма, самосжатые разряды (Z-пинчи), взрывающиеся проволочки и лайнеры. Речь идет о явлении стратификации плазменного столба (или плазменного факела). Отметим сразу, что явление стратификации в каждом подобном эксперименте задается причинами вполне определенного характера. При разлете лазерной плазмы в фоновом газе стратификация плотности наблюдается за фронтом УВ и возникает за счет разделения контактной границей лазерной плазмы и УВ [22,23], что не противоречит нашей гипотезе. Более того, при интенсивности лазерного излучения в пятне фокусировки  $\sim 10^9 \text{ W/cm}^2$  даже в твердотельной мишени начинается образование УВ [24]. Заметим, что в центрах взрывной эмиссии электронов, образующих катодное пятно, достигается именно такая или даже более высокая плотность потока энергии [25]. Если материал мишени имеет сложный элементный состав, то за счет кулоновского взаимодействия заряженных частиц в плазме возможно пространственное разделение плазменного сгустка по атомным массам, но в разреженном газе [26], что не соответствует нашим условиям. В тлеющем разряде процессом, приводящим к стратификации (появлению волн ионизации), является

ионизация электронным ударом опять же разреженного газа и дрейфовый перенос электронов [27–29]. Во взрывающихся лайнерах, реализуемых путем пропускания мегаамперных токов, возникает пространственная плазменная структура в виде радиально вытянутых сгустков в результате прорыва магнитного потока вследствие нарушения локального баланса между подачей и ионизацией плазмообразующего вещества с одной стороны, и сносом его силами Ампера из зоны плазмообразования с другой [30]. Поперечная по отношению к оси разряда стратификация плазмы в Z-пинчах вызывается нарушением равновесия между газокинетическим давлением плазмы и давлением магнитного поля разрядного тока силой  $\sim 10$  кА и более, что приводит к развитию магнитогидродинамической неустойчивости и формированию локальных перетяжек и радиальных выбросов плазмы [6]. Таким образом, правомерность гипотезы о природе объекта, распространяющегося вдоль оси основного разряда в направлении от катода к аноду, находит свое подтверждение.

Зависимость перемещения  $r_{cp}(t)$  обнаруженного нами объекта, распространяющегося вдоль канала основного разряда, от времени, прошедшего с момента старта разряда представлена на рис. 8.

При линейной экстраполяции указанной зависимости среднее значение скорости распространения рассматриваемого объекта составит  $8 \cdot 10^2$  м/с. Полученная величина сопоставима с величиной тепловой скорости атомарных частиц  $\sim 10^3$  м/с, которые могут испускаться из катодного пятна в соответствии с результатами измерений температуры вещества в катодном пятне  $\sim 0.2$ – $0.6$  эВ, выполненными методами спектроскопии в видимом диапазоне [21]. Еще большей скоростью ( $10^4$  м/с и более) обладают эмитируемые с потоком плазмы из области катодного пятна частицы, зарегистрированные нами в ходе проведения измерений методом электростатического зонда Ленгмюра при иницировании разряда в вакууме [31].

Из факта медленного распространения указанного объекта вдоль канала основного разряда приходится сделать следующий вывод. Высказываемое некоторыми авторами предположение о том, что формирование вызванной появлением катодного пятна УВ, которая, распространяясь в канале основного разряда, приводит к дополнительному нагреву и ионизации вещества в нем и является причиной преобразования канала в искровой, обладающий высокой проводимостью [19,32,33], не подтверждается. Если предположить, что рассматриваемый объект — УВ, то время замыкания промежутка катод–анод должно составить  $\sim 1.2$  мкс. Однако судя по осциллограммам разряд переходит в режим короткого замыкания, т.е. в дуговой, уже через  $0.2$  мкс [3] после старта. Стоит также отметить, что нам не удалось в ходе проведенной серии экспериментов зафиксировать изображение УВ, распространяющейся вдоль канала основного тока, позднее  $0.8$  мкс после старта разряда.

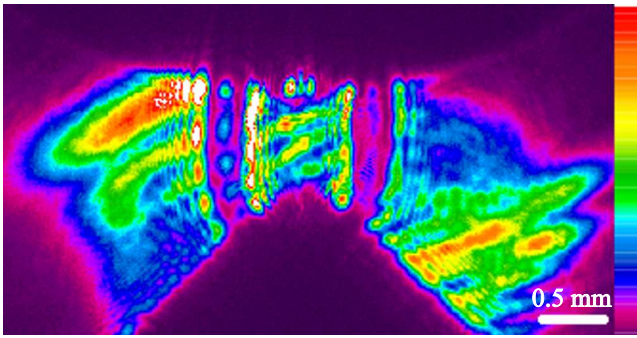


**Рис. 8.** Диаграмма зависимости перемещения объекта, распространяющегося вдоль канала основного разряда, от времени, прошедшего с момента старта разряда. Смещение отсчитывается от поверхности катода.

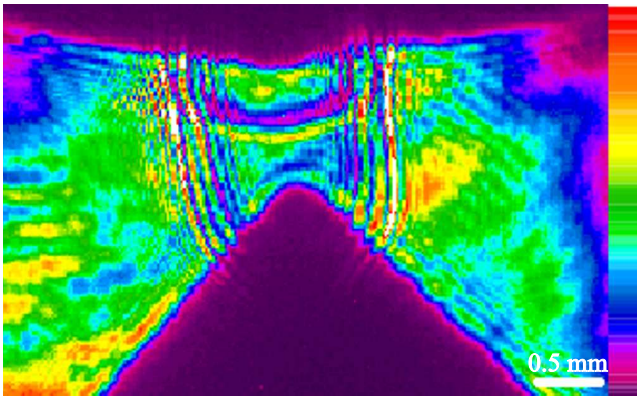
Попытаемся путем анализа имеющихся данных представить механизм возбуждения данной ударной волны. Мощность, выделяющаяся в области катодного пятна можно оценить, как произведение силы тока в разряде и катодного падения потенциала  $\sim 20$  В. Мощность, рассеивающуюся в разряде оценим, как произведение силы тока на разность потенциалов между катодом и анодом. К моменту времени  $0.4$  мкс после старта, когда удастся зарегистрировать распространяющийся вдоль оси основного разряда объект, энергия, выделившаяся в основном разряде составит  $\sim 4 \cdot 10^{-1}$  Дж, а энергия, выделившаяся в области катодного пятна  $\sim 3 \cdot 10^{-2}$  Дж. В то же время энергия, выделившаяся в иницирующем разряде по поверхности диэлектрика, составляет всего лишь  $\sim 10^{-5}$  Дж [34]. Таким образом, наблюдаемая предположительно УВ, распространяющаяся вдоль оси основного разряда, вряд ли может быть результатом расширения канала искрового разряда по поверхности диэлектрика. Вероятно ее источником является область катодного пятна основного разряда. Но вещество катодного факела не играет роль поршня. При использовании данной оптической схемы во время иницирования разряда в вакууме присутствие вещества катодного факела методами теневой визуализации не было зарегистрировано. При иницировании в газовой среде опять-таки отсутствуют наблюдаемые признаки формирования катодного факела. Генераторами УВ могли бы быть регулярно возникающие сгустки плазмы, эмитируемые из центров взрывной эмиссии электронов [25].

Обратим внимание на то обстоятельство, что первоначально обладающий, сферической геометрией объект (рис. 9), который формируется на поверхности катода и распространяется затем вдоль оси основного разряда





**Рис. 9.** Изображение пространственной области катод–анод с объектом сферической формы вблизи катода. Изображение получено при использовании оптической схемы теневого зондирования параллельным пучком.



**Рис. 10.** Изображение межэлектродного промежутка катод–анод. Изображение получено при использовании оптической схемы теневого зондирования параллельным пучком.

в направлении анода, превращается в ударную волну, приобретающую почти плоскую форму.

Данный объект не выходит за пределы области, ограниченной цилиндрической УВ, вызванной основным разрядом в промежутке катод–анод. Будет уместно предположить, что трансформация данного объекта в ударную волну, близкую по форме к плоской происходит именно благодаря взаимодействию двух ударных волн — той, которая образовалась под действием расширяющегося канала основного разряда, и той, которая образовалась в области катодного пятна. Одним из эффектов, который возникает при (косом) отражении ударных волн от поверхности препятствия, является генерация третьей волны, называемой волной Маха, которая распространяется параллельно отражающей плоскости [35]. Еще одним важным эффектом, связанным с возникновением волн Маха, является распространение сферических ударных волн, заключенных внутри цилиндрического канала. Авторы [36] показали, что сферический ударный фронт преобразуется в плоский фронт в процессе распространения внутри цилиндрического канала благодаря отражению с

образованием волн Маха. Таким образом, возможно, мы наблюдали превращение сферической ударной волны в плоскую при отражении от фронта цилиндрической УВ и генерации волн Маха.

Было отмечено, что не удалось в ходе проведенной серии зафиксировать изображения УВ, распространяющейся вдоль оси основного разряда, через  $0.8 \mu\text{s}$  после старта разряда, протекающего в промежутке катод–анод. Попробуем дать объяснение данному явлению. Известно, что при распространении сверхзвукового потока газа в более разреженную газовую среду образуется волна разрежения [37]. Обратим внимание, что перед фронтом УВ, т.е. волны сжатия, распространяющейся вдоль оси основного разряда, действительно наблюдается волна разрежения (рис. 10), а у поверхности анода наблюдается область сжатия, по-видимому, как следствие набегающего потока вещества. Возможно, столкновение указанных трех объектов приводит к релаксации УВ, не доходя до поверхности анода. Другое возможное объяснение — волна Маха перестает возникать, когда стенки полости, в которой она формируется, теряют цилиндрическую форму.

Существует еще один интересный вопрос, и состоит он в следующем. В чем причина того обстоятельства, что столь резкое ускорение движения фронта УВ, формируемой каналом тока основного разряда, происходит в интервале времени  $0.4\text{--}0.6 \mu\text{s}$  после старта? И почему несмотря на прохождение через максимум величины скорости УВ происходит монотонное увеличение ширины зоны релаксации на ее фронте? В качестве ответа можно представить следующее предположение, основанное на анализе данных, приводимых в литературных источниках. При разряде в газе первоначально, с характерными временами наносекундного диапазона, происходит передача энергии из цепи тока в энергию возбуждения молекул газа. Затем с характерными временами порядка  $1 \mu\text{s}$  по мере релаксации возбужденных состояний молекул [38,39] их энергия преобразуется в тепловую энергию или в поступательную температуру молекул газа. Что уже и приводит к быстрому расширению области протекания тока [40–42]. Причем время колебательной релаксации в кислороде при той же температуре меньше, чем в азоте, так как собственная частота в азоте в полтора раза больше, чем в кислороде, что затрудняет возбуждение колебаний в азоте. Поэтому колебательная релаксация в воздухе имеет два периода: сначала приходит в равновесие кислород, а затем азот. Присутствие паров воды, молекулы которой активно возбуждают колебания, способно уменьшать время релаксации [4]. Зависимость времени релаксации энергии колебаний молекул от степени сжатия и температуры хорошо описывается получившей проверку в экспериментах формулой [43]:

$$\tau_{rv} \approx \frac{A}{(\rho/\rho_0)} \exp\left(\frac{B}{\sqrt[3]{T}}\right),$$

где  $\tau_{rv}$  — время релаксации,  $\rho/\rho_0$  — степень сжатия вещества за фронтом УВ,  $T$  — температура,  $A$  и  $B$  — постоянные, а также результаты измерений времени колебательной релаксации в кислороде и азоте в ударной трубе и параметры среды за фронтом УВ в воздухе при нормальных условиях, приведенные там же, мы осуществили некоторые оценки. На участке  $0.4\text{--}0.6\ \mu\text{s}$  после старта, когда скорость УВ достигает максимального значения, времена релаксации составили: для кислорода  $\sim 0.2\text{--}0.4\ \mu\text{s}$  и для азота  $\sim 2\text{--}3\ \mu\text{s}$ . Эффективную ширину релаксационной зоны можно оценить, исходя из соотношения [4]:

$$\Delta x \approx \frac{7}{9} \frac{D}{(\rho/\rho_0)} \tau_{rv},$$

где  $\Delta x$  — ширина релаксационной зоны,  $D$  — скорость УВ. Оценки дали следующие результаты: для кислорода  $\sim 0.04\text{--}0.1\ \text{mm}$  и для азота  $0.8\text{--}1.5\ \text{mm}$ . Сравнение с измеренной шириной зоны релаксации, наблюдаемой методом тенеграфии в параллельных лучах, показывает, что переходный слой, вероятно, ни что иное, как релаксационная зона колебаний в кислороде. Релаксационная зона в азоте, по-видимому, охватывает всю область за СП фронта УВ, что заметно по повышенному уровню рассеяния зондирующего излучения внутри этой области на изображениях, полученных при использовании оптической схемы с коллимацией. Вероятно, газ с достаточно высокой плотностью энергии молекулярных колебаний обладает повышенной способностью к рассеиванию оптического излучения.

Дополнительно обращает на себя внимание обстоятельство, которое становится заметным при использовании теневого метода формирования изображений. Пространственная структура плоской и сферической УВ является относительно простой. В случае цилиндрической волны ее пространственная структура является заметно более сложной, а именно — состоящей из чередующихся слоев сжатия и разрежения (рис. 10). По-видимому, это наглядная демонстрация результатов, полученных методами математической физики. Как показано в [35], звуковая цилиндрическая расходящаяся волна существенно отличается от сферической или плоской в том отношении, что она может иметь передний фронт, но не может иметь заднего фронта. После того как звуковое возмущение дойдет до заданной точки пространства, оно уже не прекращается в ней, лишь сравнительно медленно затухая асимптотически со временем. Возможно, что существование релаксационной зоны колебаний в кислороде поддерживается, а может быть и приводит к ее наращиванию с течением времени на стадии цилиндрической волны как раз благодаря непрекращающемуся распространению колебаний внутри цилиндрической волны. Подтверждением служит тот факт, что при трансформации цилиндрической волны в сферическую, изображение зоны релаксации достаточно быстро исчезает.

Дадим краткий комментарий по поводу двух наблюдаемых при использовании оптической схемы с коллимацией зондирующего излучения объектов. Один из них — это зона затемнения, которая, вероятно, находится перед фронтом УВ, и второй — переходный слой, полностью непрозрачный для зондирующего излучения, толщина которого наибольшая у катода и постепенно уменьшается при приближении к аноду вплоть до полного исчезновения слоя. Первый объект, появляющийся, согласно нашим наблюдениям, на стадии ускорения УВ, можно связать с развитием релей-тейлоровской неустойчивости на контактной поверхности УВ и фонового газа. Подобное явление было предсказано теоретически и обнаружено экспериментально для лазерной плазмы. Развитие неустойчивости приводит сначала к росту малых возмущений и затем переходит в стадию турбулентности [44]. Что касается второго объекта, то методами математического моделирования ранее было показано, что стационарное течение в релаксационной зоне может быть неустойчиво относительно турбулизации [4,45]. Поэтому допустимо предположить, что вещество за СП УВ в нашем случае испытывает сильную турбулентность, особенно заметную у поверхности катода, вдоль которой движется УВ. Образование турбулентного слоя, охлаждающего вещество за фронтом волны, способно повлиять на динамику токового канала, играющего роль поршня при формировании УВ [46]. Вероятно, таким образом может происходить некоторое дополнительное к вышеизложенному механизму возбуждения молекулярных колебаний „притормаживание“ процесса расширения канала тока на начальной стадии разряда. Явление турбулизации вещества, т.е. образования в нем вихревых движений и сопутствующих неоднородностей плотности в канале разряда после прохождения УВ, вносит дополнительный вклад в рассеяние зондирующего излучения [46] и поэтому особенно заметно в оптической схеме с коллимацией зондирующего излучения.

Наконец попытаемся дать комментарий по поводу объекта, который предположительно является волной Маха. Он, как уже отмечалось, не наблюдается при использовании оптической схемы с коллимацией зондирующего лазерного излучения, прошедшего через исследуемый объект. Следовательно, он если и рассеивает зондирующее излучение, то достаточно слабо. В то же время при использовании оптической схемы теневого зондирования параллельным пучком он наблюдается вполне отчетливо. Исходя из приведенных обстоятельств, можно прийти к заключению, что это УВ с высоким уровнем возбуждения молекулярных колебаний, но низким уровнем турбулентности в зоне релаксации.

В завершение выполним некоторые оценки плотности регистрируемой в разряде плазмы. Для излучения с длиной волны  $\lambda \approx 1\ \mu\text{m}$  критическая концентрация электронов в плазме составляет  $N_e^{crit} \approx 10^{21}\ \text{cm}^{-3}$ . Концентрация молекул в воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре составляет

$N_e^{\circ} = 2.4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . В оптической схеме без коллимации зондирующего излучения максимальный угол, на который может отклониться зондирующий луч, не уходя из апертуры, составляет  $\theta_{\max} \approx 12^{\circ}$ . Соответствующая концентрация электронов составляет  $N_e \approx N_e^{\text{crit}} \cdot \sin \theta_{\max} \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  [5]. Согласно данным, которые приведены в [16], в среднем относительное уплотнение в УВ, обусловленной разрядом в промежутке катод–анод, может составить 4–6, т.е.  $N_e^{\text{SW}} \approx (1.0–1.4) \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , что близко к выше приведенному результату  $N_e(\theta_{\max} \approx 12^{\circ})$ . Регистрируемая ширина скачка плотности в УВ в наших экспериментах составила  $h \approx 10^{-2} \text{ cm}$ . Соответственно градиент концентрации электронов составляет  $(N_e - N_e^{\circ})/h \approx 10^{22} \text{ cm}^{-4}$ . В оптической схеме с коллимацией зондирующего излучения  $\theta_{\max} \approx 3^{\circ}$  и  $N_e \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

## Заключение

Проведено исследование процесса коммутации короткого (1 mm) газонаполненного промежутка, инициируемого с помощью вспомогательного искрового разряда по поверхности диэлектрика, с использованием теневого метода визуализации пространственной структуры вещества в межэлектродном промежутке. Длительность зондирующего импульса лазерного излучения — 2.5 ns; длина волны — 1.06  $\mu\text{m}$ . Были использованы две оптические схемы регистрации оптических изображений — теневое зондирование параллельным пучком лучей и формирование теневого изображения при коллимации узкого пучка зондирующего излучения, после прохождения через исследуемую область пространства.

В серии экспериментов с использованием схемы с коллимированием непосредственно за фронтом УВ наблюдалось состояние вещества, в котором оно оказывается полностью оптически непрозрачным или сильно рассеивающим зондирующее излучение. При использовании метода теневого зондирования указанные области оказываются прозрачными. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что за фронтом УВ вещество испытывает сильную турбулентность, т.е. в нем происходит образование вихревых движений и сопутствующих неоднородностей плотности после прохождения УВ. Образование турбулентного слоя, охлаждающего вещество за фронтом волны, способно повлиять на динамику токового канала.

Наблюдаемая при использовании метода теневого зондирования пространственная структура цилиндрической УВ заметно сложнее пространственной структуры плоской и сферической УВ.

Зарегистрированные зависимости смещения наблюдаемых УВ от времени, прошедшего с момента начала протекания тока в разряде, имеют отличие от аналогичных зависимостей, приводимых в литературе. На начальной стадии зарегистрированные зависимости имеют нелинейный характер. Наблюдается внезапное

ускорение движения фронтов ударных волн в интервале времени 0.4–0.6  $\mu\text{s}$  после старта несмотря на то, что основная часть вкладываемой в разряд энергии уже выделилась к этому моменту времени. Возможное объяснение — предварительное накопление вкладываемой энергии в виде энергии возбуждения молекул газа.

Также обнаружен объект, перемещающийся внутри области, уже подвергшейся воздействию процесса ударного сжатия, вдоль оси основного разряда. Объект первоначально обладает сферической геометрией и формируется на поверхности катода, а затем распространяется вдоль оси основного разряда в направлении анода, приобретая почти плоскую форму. Объект был идентифицирован, как УВ, распространяющаяся из области катодного пятна основного разряда.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] И.А. Дорошенко, И.А. Знаменская, А.Ю. Кузнецов, И.В. Мурсенкова, Н.Н. Сысоев. *ЖТФ*, **88** (5), 684 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2022.10.53244.106-22 [I.A. Doroshchenko, I.A. Znamenskaya, A.Yu. Kuznetsov, I.V. Mursenkova, N.N. Sysoev. *Tech. Phys.*, **63** (5), 662 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218050067]
- [2] Э.М. Бархударов, Н.К. Бережецкая, Т.С. Журавская, В.А. Кольев, И.А. Коссий, И.А. Левин, В.В. Марков, Н.А. Попов, М.И. Тактакишвили, Н.М. Тарасова, Н.М. Темчин. *ТВТ*, **48** (5), 653 (2010).
- [3] С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, А.В. Корнеев, Р.Х. Якубов. *Прикладная физика*, **4**, 39 (2019).
- [4] Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (Наука, М., 1966)
- [5] Е.Д. Вовченко, А.П. Кузнецов, А.С. Савёлов. *Лазерные методы диагностики плазмы: учеб. пособие* (МИФИ, М., 2008)
- [6] А.В. Корельский. *Лазерная диагностика плазмы в сильноточных импульсных разрядах* (Канд. дисс., МФТИ, М., 2005)
- [7] V.I. Krauz, M.A. Karakin, V.V. Myalton, V.P. Vinogradov, O.N. Krokhin, V.Ya. Nikulin, A.V. Oginov, A.E. Gurey, A.A. Tikhomirov. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*, **1** (10), 212 (2005).
- [8] Ю.Г. Калинин, А.В. Корельский, Е.В. Шашков. *Квант. электрон.*, **34** (5), 399 (2004).
- [9] Е.В. Паркевич, С.И. Ткаченко, А.В. Агафонов, А.Р. Мингалеев, В.М. Романова, Т.А. Шелковенко, С.А. Пикуз. *ЖЭТФ*, **151** (4), 627 (2017). DOI: 10.7868/S0044451017040010
- [10] Liu Tian-Hang, Hao Zuo-Qiang, Gao Xun, Liu Ze-Hao, Lin Jing-Quan. *Chin. Phys. B*, **23** (8), 7 (2014). DOI: 10.1088/1674-1056/23/8/085203
- [11] В.П. Зимаков, Н.Г. Соловьев, А.Н. Шемякин, А.О. Шилов, М.Ю. Якимов. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, **16** (4), 13 (2015).

- [12] В.В. Осипов, В.В. Платонов, В.В. Лисенков. Квант. электрон., **39** (6), 541 (2009).
- [13] T. Perhaves, J. Diaci. Strojníški Vestnik — J. Mechan. Engineer., **56** (7–8), 477 (2010).
- [14] Г.В. Найдис. ТВТ, **29** (1), 15 (1991).
- [15] И.С. Маршак. УФН, **71** (2), 229 (1962).
- [16] А.Ф. Александров, А.А. Рухадзе. УФН, **112** (2), 193 (1974).
- [17] Ch. Niemann. *Plasma Diagnostics of Discharge Channels for Neutralized Ion-Beam Transport* (Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doctors der Naturwissenschaften. Technischen Universität Darmstadt, 2002)
- [18] Х.Г. Ахмедова. Ударные волны в слабоионизованной плазме (Дисс. ДГУ, Махачкала, 2009)
- [19] С.Г. Калмыков, И.В. Мирошников, М.В. Петренко, М.Э. Сасин. Письма в ЖТФ, **37** (6), 63 (2011).
- [20] К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, В.С. Курбанисмаилов, П.Х. Омарова, Г.Б. Рагимханов, Д.В. Терешонок, А.А. Тренкин, З.Р. Халикова. Физика плазмы, **47** (1), 75 (2021). DOI: 10.31857/S0367292121010029
- [21] В.А. Иванов, М.Е. Коньжев, А.М. Зимин, В.И. Тройнов, Т.И. Камолова, А.А. Летунов. УПФ, **2** (1), 31 (2014).
- [22] В.Г. Бородин, В.М. Комаров, С.В. Красов, В.А. Малинов, В.М. Мигель, Н.В. Никитин, В.Н. Чернов, А.В. Чарухчев. Оптика атмосферы и океана, **13** (5), 482 (2000).
- [23] О.Б. Ананьин, Ю.А. Быковский, Ю.В. Еремин, Е.Л. Ступицкий, И.К. Новиков, С.П. Фролов. Квант. электрон., **18** (7), 869 (1991).
- [24] Е.Л. Ступицкий, В.А. Андрущенко. Компьютерные исследования и моделирование, **12** (3), 505 (2020).
- [25] Г.А. Месяц. *Экстоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга* (Наука, М., 2000)
- [26] О.А. Коженкова, А.А. Моторин, Е.Л. Ступицкий. Геомагнетизм и аэронавигация, **53** (5), 620 (2013).
- [27] Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов. ЖТФ, **85** (10), 42 (2015). [N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov. Tech. Phys., **60** (10), 1456 (2015).]
- [28] С.З. Сахапов. *Параметры плазмы сферически стратифицированного газового разряда* (Дисс., Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, 2008)
- [29] О.А. Синкевич, Д.А. Тараскин. ТВТ, **33** (1), 7 (1995).
- [30] К.Н. Митрофанов. *Экспериментальное исследование особенностей плазмообразования и токового сжатия плазмы лайнеров различных конструкций* (Дисс. АО „Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований“, М., 2019)
- [31] С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, А.А. Козлов, Р.Х. Якубов. Технологии ЭМС, **78** (3), 20 (2021).
- [32] Л.П. Бабич. УФН, **175** (10), 1069 (2005).
- [33] О.А. Омаров, А.А. Рухадзе. Прикладная физика, **4**, 24 (2010).
- [34] С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, А.А. Козлов, Р.Х. Якубов. Прикладная физика, **4**, 19 (2021). DOI: 10.51368/1996-0948-2021-4-19-24
- [35] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теоретическая физика: учебное пособие: для вузов. В 10 т. Т. VI, Гидродинамика*. 5-е изд. стереотип. (Физматлит, М., 2003)
- [36] M. Corsi, G. Cristoforetti, M. Hidalgo, D. Iriarte, S. Legnaioli, V. Palleschi, A. Salvetti, E. Tognoni. Appl. Spectrosc., **59**, 853 (2005).
- [37] Н.Н. Гладышев. *Гидрогазодинамика: конспект лекций* (ГОУВП СПбГТУРП, СПб., 2012)
- [38] K.G. Owen. *Measurements of Vibrational Relaxation and Dissociation of Oxygen with Laser Absorption Spectroscopy with Applications for Energy Transfer in Nonequilibrium Air* (Stanford University, 2014)
- [39] А.И. Бечина, Е.В. Кустова. Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия, **6** (1), 118 (2019).
- [40] I. Znamenskaya, E. Koroteeva, I. Doroshchenko. Phys. Fluids, **32** (9), 1 (2020). DOI: 10.1063/5.0019016.
- [41] D.A. Xu, D.A. Lacoste, C.O. Laux. IEEE Transactions on Plasma Science PSI, **42** (10), 2350 (2014). DOI: 10.1109/TPS.2014.2311328
- [42] И.А. Знаменская, И.А. Дорошенко, Д.С. Наумов, Т.А. Кули-заде. Научная визуализация, **9** (3), 77 (2017).
- [43] G.K. Vasil'ev, E.F. Makarov, V.G. Papin, V.L. Tal'roze. Sov. Phys. JETP, **37** (6), 1031 (1973).
- [44] О.Б. Ананьин, Ю.А. Быковский, Ю.В. Еремин, Е.Л. Ступицкий, И.К. Новиков, С.П. Фролов. Квант. электрон., **8** (7), 869 (1991).
- [45] Н.М. Кузнецов. УФН, **159** (3), 493 (1989).
- [46] М.Н. Шнейдер. ТВТ, **32** (1), 57 (1994).