

# Физика детонации и лазерная интерферометрия

А. В. ФЕДОРОВ

В 1982 г. А. Л. Михайлов написал отчет-предложение, где обосновал создание во ВНИИЭФ лазерной доплеровской методики для исследований газодинамических процессов. В 1983 г. за основу приборной методики были взяты газовый йодный лазер, применяемый в отделении 13, и



А. Л. Михайлов

интерферометры Фабри-Перо. Регистрация интерферограмм велась на имевшийся в нашем распоряжении обычный фотохронограф с оптико-механической коммутацией изображения. Для согласования инфракрасного излучения йодного лазера (длина волны 1,315 мкм) с областью спектральной чувствительности фотопленки его излучение преобразовывалось во вторую гармонику (0,658 мкм) на кристаллах дигидроарсената цезия (ДСДА). Выходная мощность излучения лазера позволяла это сделать при надлежащей фокусировке.

Группа состояла из А. Л. Михайлова, Б. А. Поклонцева, А. В. Федорова, А. В. Меньшиха и, позже, Н. Б. Ягодина. Уже в 1983 г. аппаратный комплекс был создан и получены первые результаты регистрации в лабораторных условиях скорости движения лайнеров, метаемых электровзрывом. В 1985 г. лазерный интерферометрический комплекс по схеме Фабри-Перо (ЛИФП) был собран в каземате на площадке и начались исследования ударно-волновых и детонационных процессов с применением взрывчатых веществ. В 1988 г. в состав комплекса был введен твердотельный рубиновый лазер мощностью 150 Вт, более удобный в обращении. С его помощью в дальнейшем и были получены излагаемые ниже научные результаты. Йодный лазер с преобразованием излучения во вторую гар-

монику по технологическим причинам ушел в прошлое. Остановимся на некоторых интересных результатах, полученных при исследовании детонации.

## Детонация по Щёлкину

В 1926 г. англичане Кэмпбелл и Вудхед открыли явление спиновой газовой детонации. (От английского spin – кручение, штопор). Здесь воспламенение газовой смеси сосредоточено в ядре (голове спина), фронт горения движется вперед и одновременно вращается вокруг оси трубы, куда помещался газ. За ядром, как хвост за головой кометы, тянется зона горения, заполняющая всё сечение трубы. Теорию спиновой детонации в газах создал в 1945 г. К. И. Щёлкин (Докл. АН СССР. 1945. Т. 47. С. 501).



К. И. Щёлкин

Также было выяснено, что спиновая детонация возникает вблизи пределов ее распространения, и ядро спина представляет собой косую ударную волну. При увеличении диаметра трубы, когда на ее сечении могут разместиться два и более косых скачка, возникает двух-, трех- и более головной спин. В 1959 г. Я. К. Трошин и Ю. Н. Денисов показали, что по поверхности детонационного фронта может двигаться много возмущений, которые отражаются друг от друга с локальными усилениями и пульсациями волн.

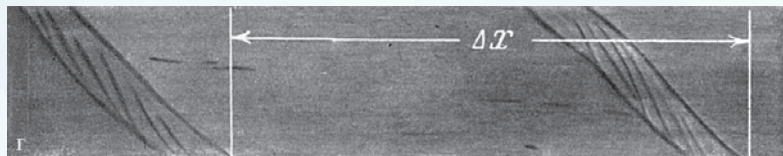
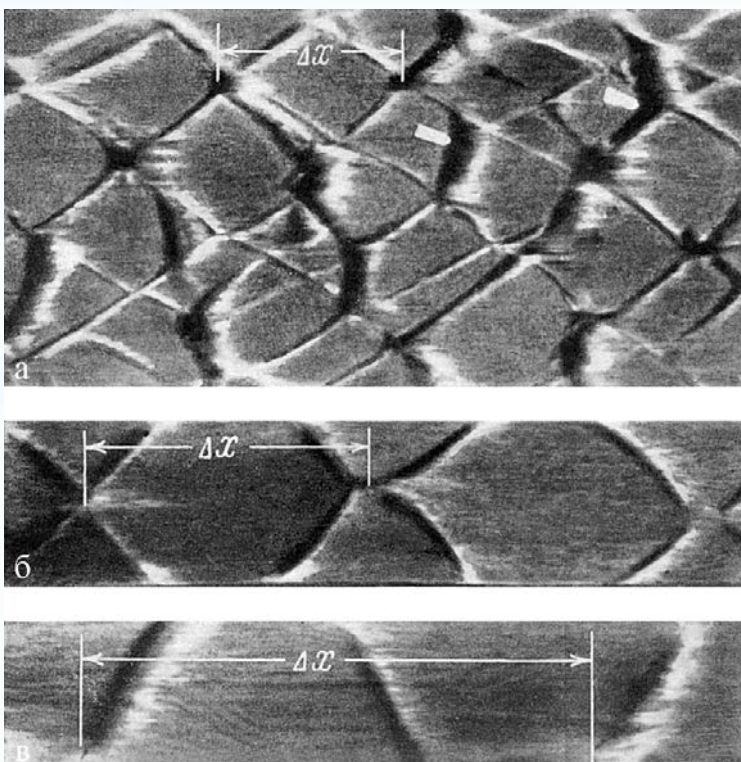


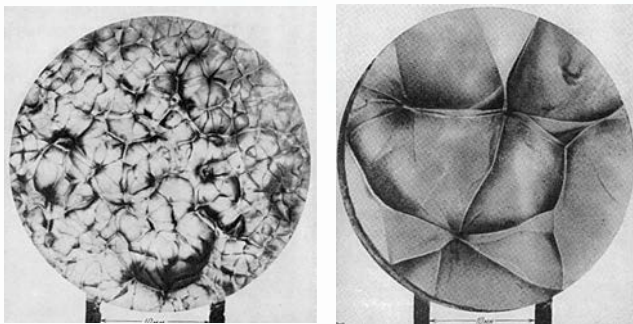
Фото следового отпечатка спиновой детонации на боковой стенке трубы. Видна тонкая структура спина в виде косых линий



Следовые отпечатки пульсирующей газовой детонации на боковой поверхности трубы. Размер ячейки  $\Delta x$  растет на трех отпечатках от 1 до 6 мм при уменьшении давления газа в трубе в 8 раз

В местах отражений волн смесь зажигается легче, чем в косых скачках, а фронт детонации пульсирует. Таким образом, создаются зоны с более высокой, чем в плоской волне, температурой – очаги воспламенения.

Таким образом, Я. К. Трошин и Ю. Н. Денисов открыли явление ячеистой структуры детонационной волны. Тогда же Б. В. Войцеховский (незадолго до этого уехавший вместе с академиком М. А. Лаврентьевым из Сарова в Новосибирск) экспериментально обнаружил существование поперечных детонационных волн, объясняющих явление спиновой детонации. Р. И. Со-

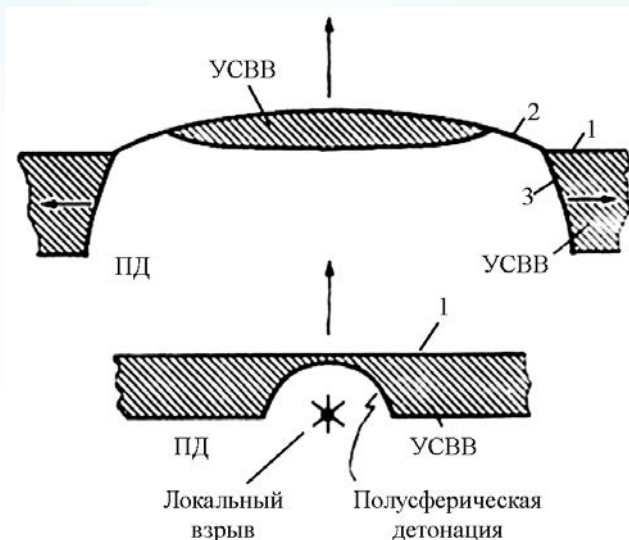


Следовые отпечатки ячеек пульсирующей детонации на торце трубы для двух давлений газовой смеси

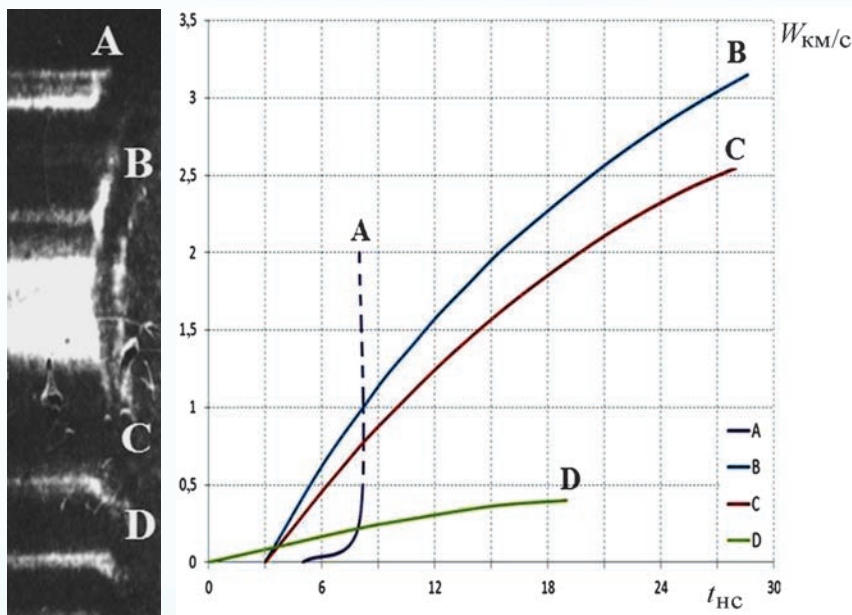
лоухин провел детальное исследование структуры детонационной волны в газах, условия перехода горения в детонацию, структуры спиновой детонации и причин ее возникновения. В 1965 г. работы Я. К. Трошина, Б. В. Войцеховского и Р. И. Солоухина были отмечены Ленинской премией (К. И. Щёлкин Ленинскую премию получил за первое серийное термоядерное изделие раньше – в 1958 г. А Ленинская премия, в отличие от Звезды Героя, давалась только один раз). Из этих исследований ясно, что явление детонации куда богаче классической одномерной модели Зельдовича–фон Неймана–Деринга (ЗНД-модель).

А. Н. Дремин с сотрудниками позже наблюдал пульсирующий детонационный фронт в жидких гомогенных низкочувствительных ВВ. Было установлено, что в ВВ сначала распространяется ударная, а затем по ударно-сжатому и нагретому ВВ – детонационная волна. По фронту волны от точек локальных взрывов движутся косые и поперечные детонационные волны. При их столкновении реализуются повышенные давления, где участок фронта уходит вперед, попадает

в холодное ВВ и происходит срыв реакции. Данная ситуация воспроизводится многократно – так распространяется пульсирующая многого-



Картина распространения пульсирующего детонационного фронта в жидких ВВ по А. Н. Дремину: 1 – прямая ударная волна, 2 – косая детонационная волна, 3 – поперечная волна детонации, ПД – продукты детонации, УСВВ – ударно-сжатое ВВ



Интерферограмма и зависимости нарастания скорости в пульсирующем детонационном фронте, зарегистрированные на линиях (A, B, C, D) с помощью лазерного интерферометра Фабри-Перо

ловая детонация по Щёлкину. Было установлено, что такая детонация характерна только для низкочувствительных ВВ на пределах ее распространения.

А. Н. Дремин с сотрудниками даже разбавляли жидкие ВВ инертном, чтобы возникал пульсирующий режим детонации. Таким образом, считалось, что пульсирующая детонация существует только в газах и низкочувствительных жидких ВВ. Но все оказалось сложнее.

В конце 1990-х гг. с помощью более тонкого инструмента – лазерного интерферометра Фабри-Перо нами было показано, что пульсирующий фронт существует и в мощных высокочувствительных смесевых жидких ВВ, типа горючее/окислитель. При малом количестве горючего в смеси фронт был стабильный и устойчивый в соответствии с моделью ЗНД. Если увеличить количество горючего до некоторого предела, фронт становится неустойчивым и пульсирующим. В местах столкновения детонационных волн давление в наших экспериментах достигало 55 ГПа, при срыве реакции давление в ударной волне равнялось 17 ГПа, при среднем давлении детонации во фронте 21,4 ГПа. Например, для смеси тетранитрометан/нитробензол 74/26 (цифры обозначают процентное содержание компонентов) на разных интерференционных линиях (схема ЛИФП хороша для некоторых приложений тем, что в каждый момент времени каждая конкретная точка интерферограм-

мы однозначно соответствует конкретной точке зондируемой поверхности) зарегистрированы разные темпы нарастания массовой скорости на границе жидкое ВВ/окно до  $W = 0,4-3,2$  км/с (максимальное давление в ЖВВ для  $W = 3,2$  км/с составило 55 ГПа). Разные интерференционные линии регистрируют разные профили и разное время выхода волны на границу ЖВВ/окно из LiF. Кривизна детонационного фронта приводит к развороту этой границы, уходу лазерного луча со щели регистратора и обрыву записи.

В мощных смесевых ЖВВ окислитель является взрывчатым веществом, а горючее не детонирует. Горючее тормозит химическую реакцию и увеличивает критическое давление ини-

цирования детонации. Когда величина критического давления меньше давления детонации, фронт устойчив. Когда величина критического давления превышает давление детонации, тогда природа ищет другие пути для инициирования ВВ и они реализуются в пульсирующей детонации по Щёлкину. Здесь уже окислитель детонирует в косых и поперечных волнах и вступает в реакцию с горючим. Причем такие мощные составы настолько чувствительны, что детонация в них реализуется в тонких жидких слоях, толщиной в доли миллиметра (см. статью Е. В. Зотова «Запах жидкого ВВ», «Атом», 2007, № 33).

### Детонация монокристаллов ВВ

В мире в основном исследуется детонация гетерогенных смесевых ВВ, но нас интересовали параметры детонации, когда ВВ представляет собой монокристалл. Выращивание таких кристаллов представляет сложную технологическую задачу. Когда мы впервые увидели такой монокристалл октогена размером с куриное яйцо, то загорелись идеей найти такие кристаллы и исследовать их детонационные характеристики. Такие большие монокристаллы выращивали когда-то в Казанском научно-исследовательском технологическом университете (КНИТУ). Автор этих работ был уже на пенсии, и все просьбы к его коллегам вырастить монокристаллы ВВ не увенчались успехом. Но нам сопутствовала удача.



*Исследователи физики детонации: Д. В. Назаров, А. В. Федоров, В. А. Давыдов, А. В. Меньших, С. А. Финюшин*

Однажды наш коллега из отделения 19 В. Н. Лашков сказал, что у них на складе давно лежат какие-то монокристаллы ВВ, и они их собираются уничтожить. Мы быстро нашли эти монокристаллы. К сожалению, большинство из них имели размеры с ноготок, но нашлось и несколько крупных монокристаллов размером до 14 мм. Это были монокристаллы ТЭНа в кристаллографической ориентации (100) и кристаллы октогена в ориентации (111). Для исключения боковых разгрузок мы их в опытах окружали пластическими ВВ с близкими детонационными характеристиками, а детонацию в них вводили составами на основе ТЭНа и октогена. В результате в монокристаллах были зарегистрированы самые высокие параметры детонации. Так, например, для монокристалла октогена давление в химпике составило 61 ГПа (тогда как для гетерогенного состава с содержанием октогена около 95 % давление равнялось 49 ГПа). Давление детонации монокристалла ТЭНа составило 43 ГПа вместо 39 ГПа для гетерогенного состава. Также сильно увеличилась длительность зоны химической реакции, что согласуется с моделью развития детонации на дефектах структуры. Для монокристалла октогена длительность зоны увеличилась в 3 раза до 270 нс, а для монокристалла ТЭНа – до 95 нс.

Что касается традиционных гетерогенных смесевых взрывчатых составов, содержащих индивидуальное ВВ и технологические связки, то лазерная доплеровская диагностика позволила обнаружить в них гетерогенность (неоднородность) течения продуктов взрыва за фронтом детонационной волны и разнородность по площади ее фронта – явлений, до сих пор не учитываемых в практических приложениях. В общем-то, эти неоднородности кажутся удивительными, учитывая гетерогенность смесевых ВВ, но возникает вопрос – каковы масштабы гетерогенности течений, как они связаны со структурой и составом исходного ВВ и проявляется ли она в гомогенных твердых ВВ. (В газах и жидкостях, как мы видели, проявляется.) Эти вопросы еще ждут своих исследователей.

**ФЕДОРОВ Алексей Викторович** –  
кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник ИФВ,  
лауреат премии Правительства РФ