

Рисунок 8. Параметрическое представление векторного поля

Данные параметры являются исходными для порождения схем кольцевых палитр. Наиболее предпочтительны схемы, основанные на представлении комплексных чисел в параметрах модуля и угла поворота, где используются модуль m и угол  $\alpha$ . Видимый разрыв на ее представлении (рисунок 8) – это скачок  $\alpha$  от  $+\pi$  к  $-\pi$ , что не является разрывом для тригонометрических функций. Кольцевые палитры должны быть по возможности контрастными, непрерывными вместе с первой производной, не содержать цвета нулевого значения (обычно белого или черного), иметь возможность поворота для выбора наиболее представительной раскраски. Классическая кольцевая палитра представляет собой косинусы угла со сдвигом в 120° между цветовыми компонентами, но она имеет малый контраст. Повысить контраст можно, перейдя к квадратам косинусов, применяя экспоненцирование и логарифмирование, небольшие отклонения от шага в 120°. Более удобными являются палитры с углом кратностью 2 для одного из цветов, явно разделяющие ортогональные направления. Но наиболее эффективными видятся палитры, задаваемые сложными функциями. Их создание весьма трудоемко, но с их применением можно добиться наилучшего восприятия результата.

# РЕГИСТРАЦИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ВОЅ МЕТОДОМ

С.И. Герасимов, А.Л. Михайлов, К.В. Тотышев, Н.А. Трепалов

РФЯЦ – ВНИИЭФ, Саров, Россия СарФТИ НИЯУ «МИФИ», Саров, Россия

### Введение

В ряде случаев, при отработке различных боеприпасов (БП) необходимо измерить параметры ударной волны (УВ). В настоящее время для измерения параметров УВ широко применяются датчики давления (ДД). ДД позволяют измерять зависимость давления от времени в конкретной точке пространства (обычно несколько датчиков, расположенных в одной плоскости). Регистрация сигналов осуществляется, как правило, по традиционной схеме «ДД – согласующее устройство – регистратор». При этом с одной стороны, количество датчиков ограничено с точки зрения построения подробной R(t) диаграммы с десятками экспериментальных точек, с другой, существующим физических датчикам величин С электрическим способом вывода информационного сигнала присущ недостаток, связанный с наличием переходных характеристик в электрических цепях [1]. Кроме того, в случае отражения распространение УВ имеет сложный характер. Процесс отражения сферической УВ от плоской поверхности представлен на рисунке 1. После того как регулярное отражение становится невозможным ( $\alpha > \alpha^*$ ), падающая ударная волна (ПУВ) и отраженная (ОУВ) отходят от поверхности и образуется третья УВ, которую называют волной Маха или головной УВ (ГУВ) [2]. Таким образом необходимо четко идентифицировать зависимости, полученные с помощью ДД, и вид УВ.



Рисунок 1. Отражение сферической УВ от плоскости

Для регистрации УВ применяются и оптические методы. Оптические методы основаны на изменении параметров излучения в зависимости от оптических свойств исследуемой среды. К наиболее известным оптическим методам относятся теневой метод, интерференционный метод, шлирен метод, а также BOS (Background oriented schlieren) метод. Одним из главных преимуществ BOS метода по сравнению с остальными оптическими методами является простота его реализации. Схема экспериментальной установки BOS метода состоит из некогерентного источника света, фонового экрана, видеокамеры И компьютера С программным обеспечением [3, 4]. BOS метод позволяет визуализировать УВ и проследить за ее распространением в пространстве.

Ниже представлены результаты применения BOS метода для регистрации УВ и последующей оценки ее параметров.

# 1. Видеорегистрация слабых ударных волн

С помощью BOS возможно визуализировать области в оптически прозрачной среде, имеющие градиент показателя преломления (n), и чем больше значение n, тем проще

визуализировать эти области. УВ характеризуется скачкообразным изменением давления и плотности и, как следствие, образованием градиента показателя преломления.



Рисунок 2. Электрический взрыв проволочки (t = 0,86 мс)



Рисунок 3. Результат визуализации УВ

На рисунках 2 и 4 приведены результаты отработки технологии BOS для регистрации слабых УВ. Производилась видеорегистрация электрического взрыва проволочки и последующая визуализация созданной УВ. На рисунке 2 приведен один из кадров видеорегистрации, а на рисунке 3 результат визуализации. В качестве источника высокого напряжения использовался накопитель с энергией разрядного контура 216 Дж и уровнем напряжения 12 кВ. Взрывалась медная проволочка диаметром 0,09 мм и длиной 30 мм.

# 2. Визуализация ударных волн в условиях полигонных испытаний

Специфика полигонных испытаний предъявляет жесткие требования к измерительному оборудованию, в частности по критерию «живучести» и зоне регистрации. Оптическая регистрация

позволяет выбрать интересующую зону регистрации и при этом расположить оборудование на безопасном расстоянии. Применение BOS метода позволяет визуализировать крупномасштабные оптические неоднородности, на рисунках 4 и 5 приведен один из таких примеров.



Рисунок 4. Выстрел из пороховой баллистической установки (t = 4,695 мс)



Рисунок 5. Результат визуализации УВ

## 3. Эксперимент

Для экспериментального подтверждения возможности оптической регистрации УВ проведены постановочные опыты. Производился подрыв заряда шарообразной формы диаметром 70 мм, состоящего из взрывчатого вещества ПВВ-7 массой 250 г. Заряд располагался на высоте 2 м. Проводилась как оптическая регистрация (OP) сформировавшейся УВ, так и регистрация с помощью ДД, расположенных на одной прямой. На рисунке 6 представлена расстановка оборудования на рабочем поле. Видеорегистрация УВ осуществлялась на фоне экрана с частотой съемки 9300 кадр/с и временем экспозиции 10 мкс. На рисунке 7 приведен один из полученных кадров и результат визуализации УВ в момент времени 5,5 мс после подрыва. Визуализирована как первичная (1), так и вторичная (2) ПУВ. Путем обработки результатов визуализации УВ получена диаграмма перемещения фронта первичной ПУВ  $R_{\phi}(t)$ , результат представлен на рисунке 8. Используя зависимость  $R_{\phi}(t)$ , найдены значения скорости и избыточного давления во фронте ПУВ (рисунок 9, 10). На рисунке 11 представлены профили давлений, полученные с помощью ДД, и значения, полученные по результатам ОР. На рисунке 11 так же приведены дискретные значения избыточного давления во фронте ОУВ полученные путем перерасчета  $R_{\phi}(t)$  диаграммы ПУВ. В данном

случае под ОУВ имеется УВ отраженная от верхней (торцевой) поверхности корпуса ДД представляющего собой цилиндр диаметром порядка 5 см в центре которого располагается ДД (см. рисунок 6).



Рисунок 6. Расстановка оборудования на рабочем поле



Рисунок 7. Исходная информация (а) и результат визуализации (б) УВ



Рисунок 8. Результаты ОР распространения фронта ПУВ



Рисунок 9. Зависимость скорости распространения фронта ПУВ



Рисунок 10. Зависимость избыточного давления во фронте ПУВ



Рисунок 11. Величины давлений, полученные путем пересчета результатов ОР и наложенные на профили давлений ДД

# 4 Видеорегистрация ударных волн при проведении натурных испытаний

Используя BOS технологию при проведении различных опытов, можно повысить информативную отдачу. На рисунке 12 приведена схема оптической регистрации при проведении одного из таких опытов. Проводилась видеорегистрация подхода объекта испытаний (ОИ) к преграде. На рисунке 13 представлены некоторые из кадров видеорегистрации с результатами визуализации УВ. После обработки результатов визуализации получена зависимость избыточного давления во фронте УВ от времени, результаты представлены на рисунке 14 совместно с данными, полученными с помощью ДД.







Рисунок 13. Движение ОИ со сверхзвуковой скоростью и образованием УВ (а, б); распространение УВ от взрыва ОИ (в, г)



Рисунок 14. Профили давлений и результаты ОР

#### Заключение

Представленные данные подтверждают возможность использования оптических методов, а именно BOS метода, для регистрации УВ, возникающих как при взрыве, так и при движении тел со сверхзвуковыми скоростями. Получаемые данные регистрации позволяют проследить за распространением УВ в пространстве, а также, в случае взрыва, оценить степень асимметрии взрывного энерговыделения, определить параметры УВ, сформировавшейся в результате взрыва ОИ и оценить мощность взрыва. ВОЅ метод является дистанционным, что позволяет проводить регистрацию на безопасном расстоянии.

## Список литературы

- 1. Толстиков И.Г. Новые методы измерения параметров ударной волны // Забабахинские чтения. Сборник работ VIII международной научной конференции по физике высоких плотностей. 2005.
- 2. Физика взрыва. Под ред. Л.П. Орленко Изд. 3-е перер. Т.1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
- 3. Meier G.E.A. Computerized background-oriented schlieren // Experiments in Fluids. 33. 2002. P. 181-187.
- 4. Richard H. and M. Raffel. «Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method.» Institute of Physics Publishing, Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 1576–1585.

# НЕСПЕКТРАЛЬНЫЙ АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ОДИНОЧНОГО ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА ИЗ PDV-ДАННЫХ

Н.Б. Аникин, А.В. Павленко

## РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск, Россия

## Введение

К настоящему времени диагностика PDV (photonic Doppler velocimetry) широко используется в ударно-волновых экспериментах. В основе метода лежит определение временной зависимости допплеровского сдвига частоты лазерного излучения, отраженного от движущегося объекта. Несмотря на распространенность и зрелость методики, ее точность и временное разрешение до сих пор были либо неудовлетворительны, как в случае использования оконного преобразованием Фурье, либо неизвестны, как в случае использования Гильберта.

Теоретическое обоснование PDV методики в целом и оценки временного разрешения и погрешности, в частности, наибольшее развитие получили в работах D.H. Dolan. Наилучшего временного разрешения удалось добиться в работе [1] в предположении, что полезный PDV-сигнал состоит из единственной гармоники. Тем не менее, авторы не смогли приблизиться к пределу временного разрешения в половину периода, поскольку скорость вычислялась методом оконного преобразования Фурье.

Целью настоящей работы было создание, теоретическое обоснование и тестирование на экспериментальных сигналах метода обработки PDV-сигнала, имеющего разрешение порядка периода доплеровских биений, малочувствителеного к изменению во времени амплитуды первой доплеровской гармоники, и к присутствию в сигнале случайного шума, высших доплеровских гармоник и «средней линии».

#### Метод фильтрации сигнала

В основу метода положено свойство периодичности допплеровских гармоник. Усреднение экспериментального сигнала по половине моментального периода доплеровской гармоники существенно уменьшает интенсивности, как высших доплеровских гармоник, так и высокочастотной