

# РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХОЖДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ МНОГОКАНАЛЬНОГО ГЕТЕРОДИН-ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Д.А. Калашников, А.В. Федоров, С.А. Финюшин, Е.А. Чудаков, И.В. Шмелев, И.С. Гнутов, Л.К. Антонюк, А.О. Яговкин, М.В. Жерноклетов, А.В. Дергунов, М. П. Калинин, М.Ю. Батьков

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Методика лазерного гетеродин-интерферометра (PDV) [1]-[3] по эксплуатации удобнее своих предшественников Фабри-Перо и VISAR, не уступает им в точности и превосходит по простоте обработки получаемых результатов. Ещё одним неоспоримым преимуществом гетеродин-интерферометра является его универсальность, применимость в экспериментах широкого спектра направленности.

## **Введение**

Отдельным направлением газодинамических исследований является регистрация процессов, реализующихся при схождении оболочек. Непрерывность и высокая точность получаемых данных выделяют лазерный гетеродин-интерферометр среди других методик, используемых в указанной области. Многоканальность измерений позволяет контролировать работу нагружающего устройства а также выявлять особенности протекания процесса в зависимости от точки зондирования (включения, неоднородности).

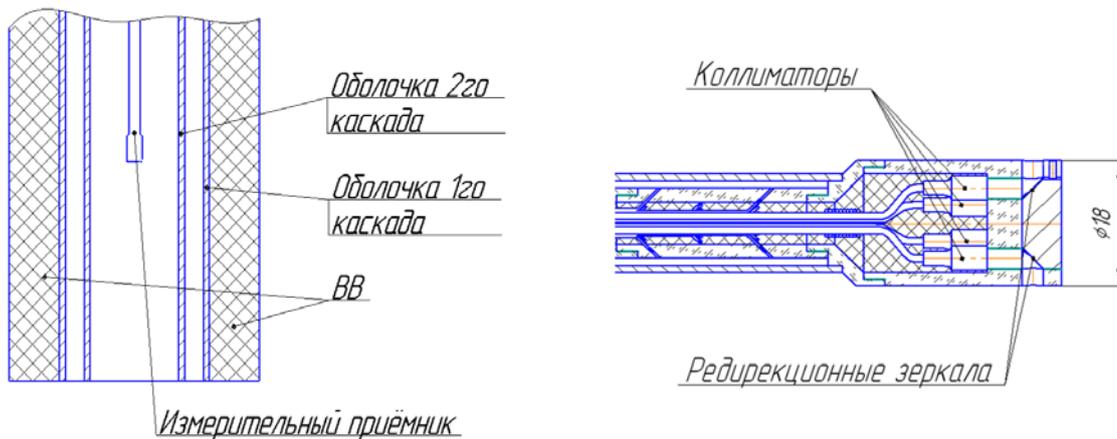
В докладе описаны адаптационные подходы, разработанные с целью использования гетеродинных измерений в условиях сложной конфигурации тестируемых образцов – при исследовании схождения оболочек с цилиндрической и сферической геометрией.

## **Регистрация схождения стальной цилиндрической оболочки**

В цилиндрическом устройстве с двухкаскадной схемой расположения оболочек, исследовалось схождение стальной оболочки второго каскада (рисунок 1а). Оболочка второго каскада обжималась оболочкой первого каскада через промежуточный газовый слой из аргона с начальным давлением 40 атм. Нагружение осуществлялось продуктами взрыва цилиндрического заряда ВВ по поверхности с помощью многоточечной системы инициирования. Целью измерений была регистрация динамики схождения оболочки, контроль однородности сжатия а также наличия пыления с внутренней поверхности оболочки второго каскада при схождении к центру.

В эксперименте использовалось пять измерительных каналов PDV. Датчики (коллиматоры) устанавливались в приёмнике на радиусе 9 мм от оси устройства. База измерения составляла 51 мм. Общий вид измерительного приёмника представлен на

рисунке 1б. Он проектировался на основе медных ридирекционных зеркал с целью минимизации его размеров и увеличения базы регистрации.

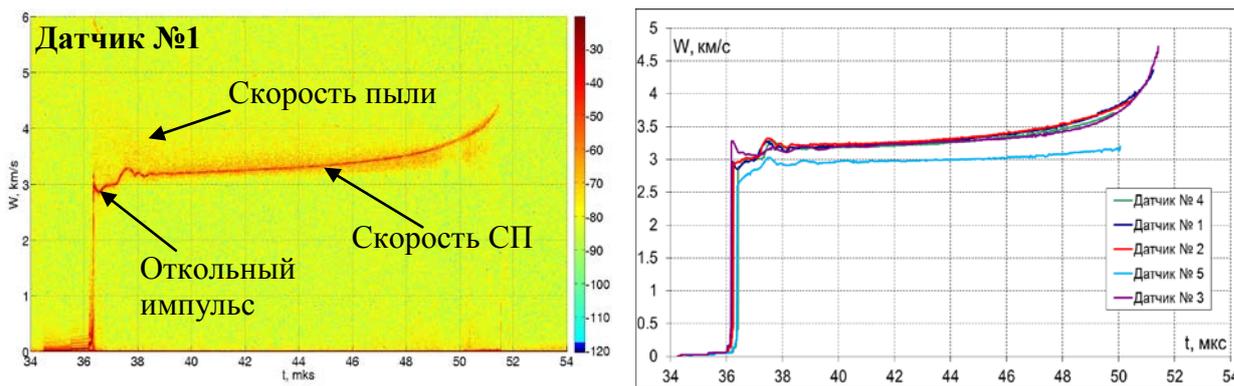


а) Исследуемое устройство

б) Измерительный приёмник

**Рисунок 1 – Исследуемое устройство и измерительный приёмник**

Характерная спектрограмма, а также профили скорости, зарегистрированные в опыте с помощью датчиков PDV, представлены на рисунке 2.



а) Характерная спектрограмма

б) Экспериментальные профили

**Рисунок 2 – Экспериментальные данные**

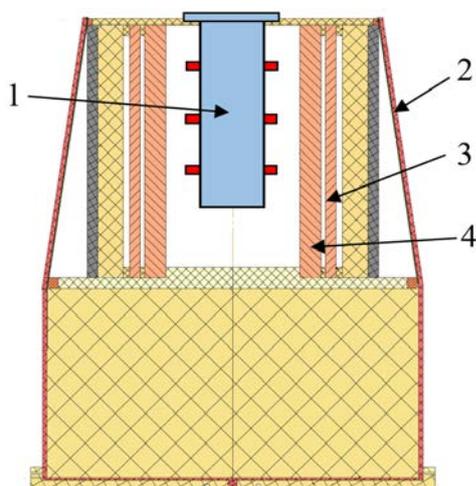
На начальном участке записей (рисунок 2,  $t=34..36$  мкс) регистрируется низкоскоростной ступенчатый разгон, обусловленный рециркуляцией ударных волн в аргоне между оболочками первого и второго каскада устройства. За низкоскоростной частью следует скачок скорости до  $W \approx 3,0$  км/с, соответствующий выходу ударной волны на исследуемую поверхность. Затем по ряду каналов видны откольные импульсы – средняя величина откольной прочности составила  $\sigma_{отк} = 2,52$  ГПа. Далее на экспериментальных профилях следует плавный набор скорости в течение  $\sim 12$  мкс, после чего начинается стадия кумулятивного схождения. Отсутствие откольного импульса, несколько заниженная скорость на квазистационарном участке и отсутствие быстрого набора скорости на кумулятивной фазе схождения на профиле канала №5 в сравнении с

остальными каналами, а также другие отличия в конфигурации профилей, полученных по разным каналам, могут свидетельствовать о разнородности нагружения и подтверждают преимущества использования многоканальной системы регистрации.

Пыление поверхности оболочки зарегистрировано лишь по двум из пяти датчиков. Отсутствие данного эффекта на остальных каналах, по всей видимости, говорит о неравномерном характере выброса частиц. Это может быть обусловлено как влиянием нагружающей системы на развитие неустойчивостей на свободной поверхности материала (вследствие асимметричности), так и локальными особенностями поверхности (неоднородности, включения) в точках зондирования.

### **Регистрация схождения медной цилиндрической оболочки**

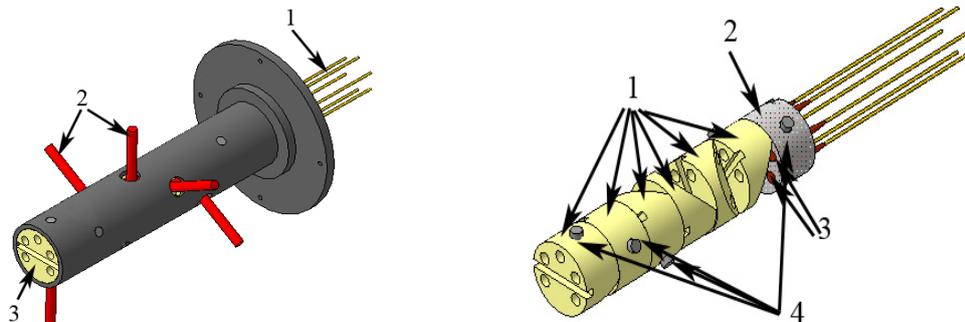
В эксперименте по исследованию особенностей процессов разрушения медного цилиндра использовался метод соударения (рисунок 3). Разгон цилиндрического ударника до требуемой скорости осуществлялся с помощью устройства, в котором за счет энергии взрыва тонкого слоя ВВ, инициируемого в режиме скользящей детонации, ускорялся тонкий ( $\Delta=0,5$  мм) конический медный лайнер [4]. Угол раствора конической оболочки, её толщина, а также толщина ВВ подбирались так, чтобы обеспечить приемлемую степень синхронности подлёта лайнера к двухслойному цилиндрическому демпферу («трансформатору импульса»), внутри которого располагался медный цилиндрический ударник.



1 – измерительный приёмник; 2 – ВВ; 3 – ударник; 4 – образец

**Рисунок 3 – Схема исследуемого устройства**

Для регистрации с помощью метода PDV был разработан составной измерительный приемник. Конструкция базируется на оптических коллиматорах в количестве шести штук и ридирекционных отражателях лазерного излучения. Как показано на рисунке 4, подобный приёмник позволяет регистрировать скорость схождения цилиндрического образца в области  $360^\circ$ , через каждые  $60^\circ$ .

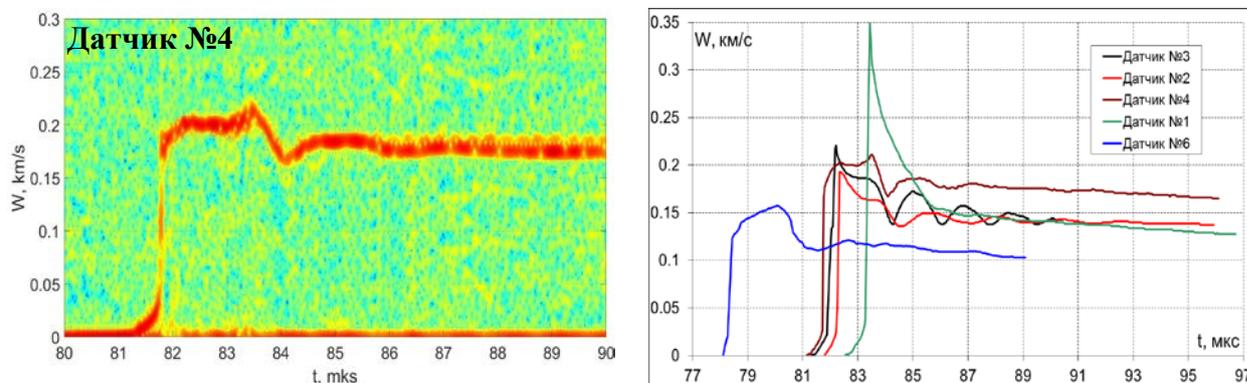


1 – волокна коллиматоров; 2 – инфракрасное излучение; 3 – отражатели лазерного излучения

**Рисунок 4 – Измерительный приёмник**

Характерная спектрограмма, полученная в опыте, а также профили скорости внутренней поверхности цилиндрического образца приведены на рисунке 5. На экспериментальных зависимостях наблюдается выход ударной волны на исследуемую поверхность и последующее схождение медной оболочки со скоростями на уровне 120-180 м/с. Практически по всем каналам регистрируются откольные импульсы, средняя величина откольной прочности составила  $\sigma_{отк}=0,56$  ГПа.

Как видно, амплитудно-временные характеристики профилей скорости как и времена выхода ударной волны на внутреннюю поверхность оболочки существенно различаются в зависимости от канала измерения (от точки зондирования). Таким образом, на основе многоканальных измерений можно говорить, что в эксперименте не удалось достичь симметричности нагружения цилиндрического образца.



а) Характерная спектрограмма

б) Экспериментальные профили

**Рисунок 5 – Экспериментальные данные**

Максимальная разновременность начала движения внутренней поверхности оболочки на зондируемом участке по высоте мишени составила  $\sim 4,4$  мкс. Наиболее ранний момент выхода ударной волны регистрирует датчик №6, располагавшийся на минимальном расстоянии от нижнего торца цилиндра (со стороны инициирования детонации). Самый поздний момент начала движения внутренней поверхности оболочки зарегистрирован в точке зондирования датчика №1, находящейся на максимальном расстоянии от нижнего торца цилиндра. Такое заметное различие по моменту выхода

ударной волны между датчиками №1 и №6 указывает на наличие осевой составляющей в скорости движения толстостенного ударника и, соответственно, лайнера. Таким образом, совокупность экспериментальных зависимостей, полученных с помощью многоканальных измерений PDV, позволяет проследить динамику течений, реализующихся в мишени как в радиальном, так и в осевом направлениях.

### Исследование хрупкого разрушения сферической оболочки

На чугунном образце проводилось исследование особенностей разрушения сферической оболочки при её сжатии. Толщина оболочки составляла 4 мм. Радиус внутренней границы исследуемой оболочки составлял  $R=16,5$  мм, внутренний радиус измерительного приёмника –  $R=15$  мм, таким образом, база регистрации достигала 31,5 мм. Нагружение осуществлялось слоем пластического ВВ толщиной 10 мм с инициированием в одной точке – в полюсе оболочки. Регистрация осуществлялась с помощью 13 датчиков PDV, размещённых в полусферическом приёмнике по двум меридианам, на углах:  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $70^\circ$  и  $90^\circ$  (рисунок 6).

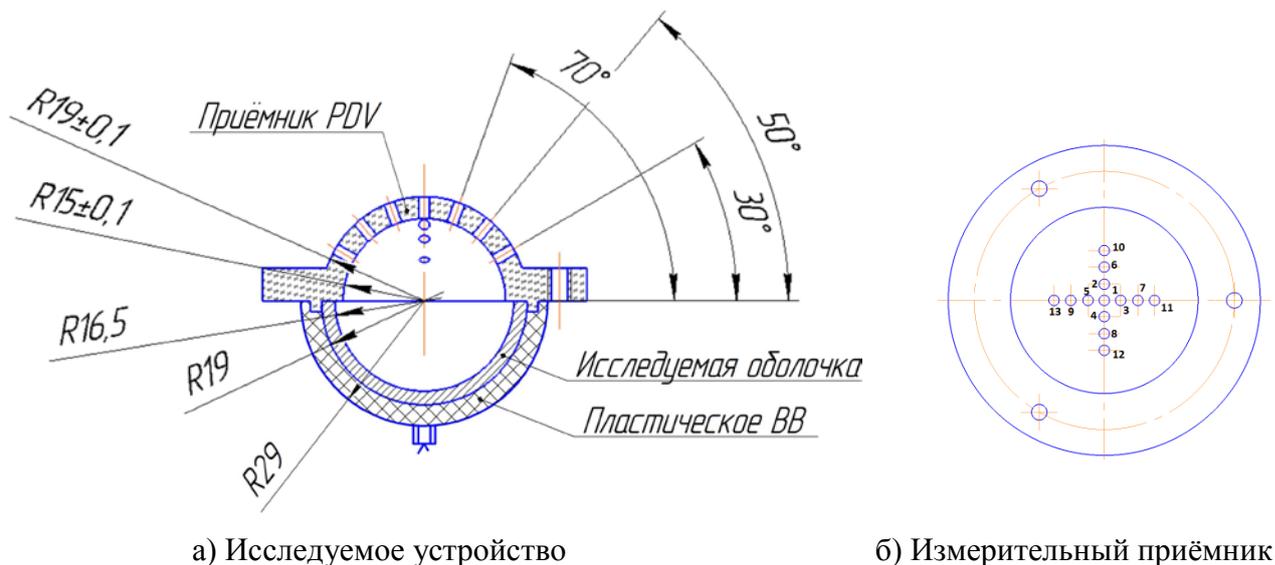


Рисунок 6 – Схема исследуемого устройства

Характерные спектрограммы, зарегистрированные в опыте, представлены на рисунке 7.

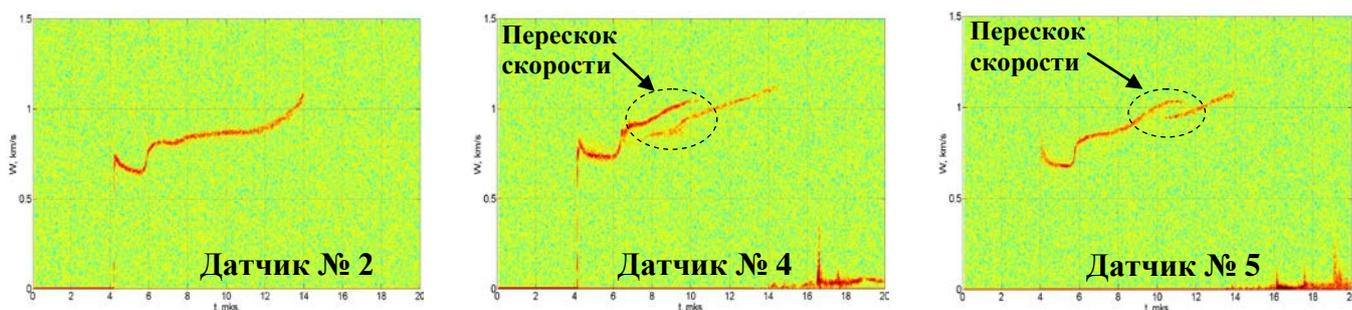
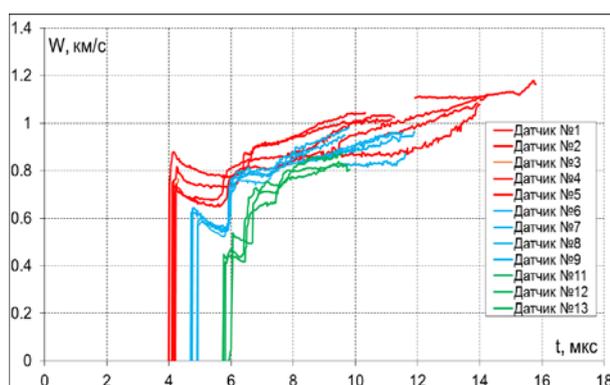


Рисунок 7 – Характерные спектрограммы

Следует отметить, что большое количество измерительных каналов позволило зарегистрировать по ряду из них характерную особенность. Так, на спектрограммах датчиков №3 и №4 (рисунок 7) наблюдается “перескок” скорости – регистрация на некотором временном промежутке (0,4-2 мкс) двух профилей скорости одновременно. Указанный эффект, может обуславливаться реологическими свойствами исследуемого материала и свидетельствовать о его хрупком разрушении. Обжатие скользящей волной приводит к возрастанию бокового давления и интенсивному росту сдвиговых напряжений в материале. По достижении определенных критических давлений пластическая деформация чугуна прекращается и реализуется хрупкое разрушение оболочки на отдельные фрагменты. Далее исследуемая поверхность движется в виде фрагментов с выраженной скоростной дисперсией, что и регистрирует методика гетеродин-интерферометра. При этом “перескоки” характерны не для всех спектрограмм. По всей видимости на исследуемой стадии явление носит локальный характер и регистрируется лишь благодаря постановке с большим количеством точек зондирования.

Вся совокупность полученных профилей скорости показана на рисунке 8.

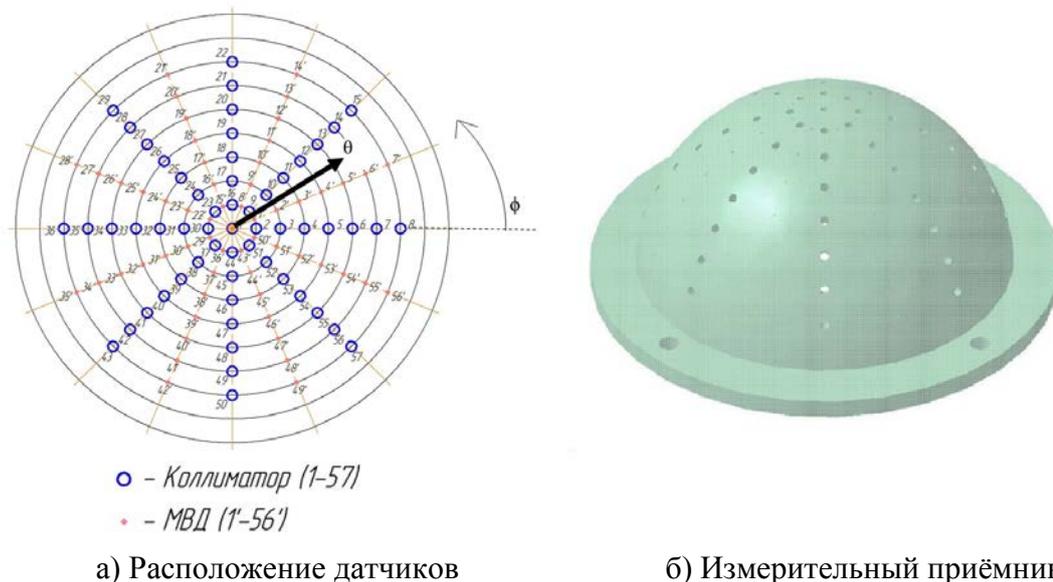


**Рисунок 8 – Экспериментальные профили**

Как видно, в эксперименте по 13 каналам зарегистрирована динамика разгона чугунной оболочки со скоростями  $W=0,44-0,78$  км/с после выхода ударной волны на исследуемую поверхность и максимальными значениями  $W=1,1-1,2$  км/с в конце записи. По амплитуде и времени выхода наблюдается распределение зависимостей на три группы (показаны разными цветами). Таким образом, прослеживается удалённость точек зондирования от инициирующего элемента: наиболее близко к нему располагались точки зондирования датчиков, выделенных на рисунке черным и красным цветами, на наибольшем расстоянии – датчики, отмеченные зелёным. Соответственно, при удалении от точки зондирования увеличивается время выхода и уменьшается амплитуда.

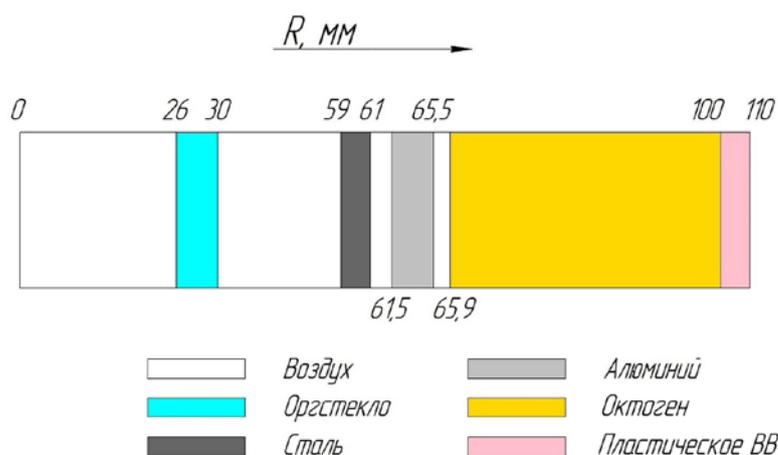
## Многоканальная регистрация схождения стальной сферической оболочки

В эксперименте по исследованию процесса схождения стальной сферической оболочки регистрация с помощью метода PDV осуществлялась по 112 измерительным каналам. Использовались оптические датчики двух видов: коллиматоры (56 шт.) и малогабаритные волоконные датчики (56 шт.) [5]. Схема расположения датчиков и общий вид измерительного приёмника представлены на рисунке 9.



**Рисунок 9 – Схема расположения датчиков и общий вид измерительного приёмника**

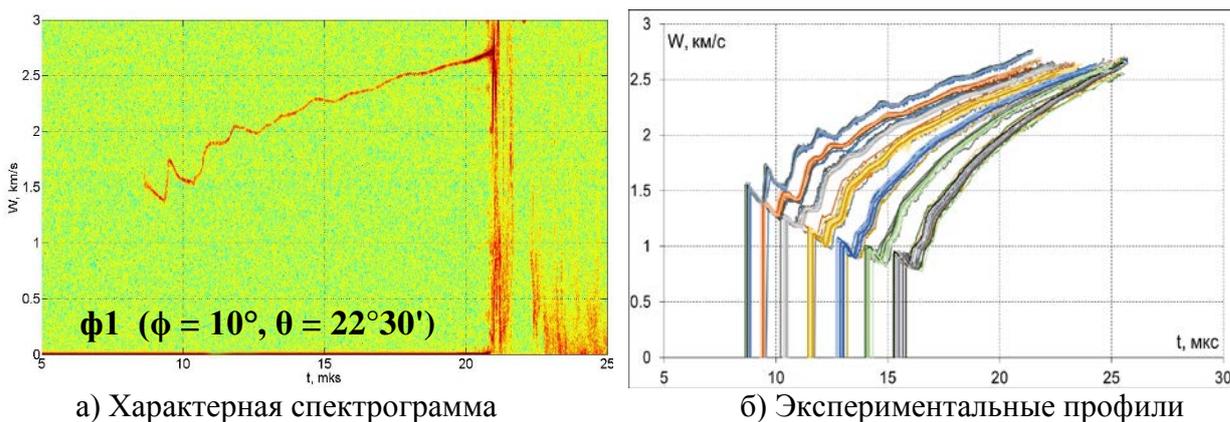
Инициирование в эксперименте осуществлялось в одной точке через слой пластического ВВ. Стальная оболочка нагружалась с помощью заряда пластифицированного октогена через алюминиевый демпфер. Послойная схема исследуемого устройства приведена на рисунке 10.



**Рисунок 10 – Послойная схема исследуемого устройства**

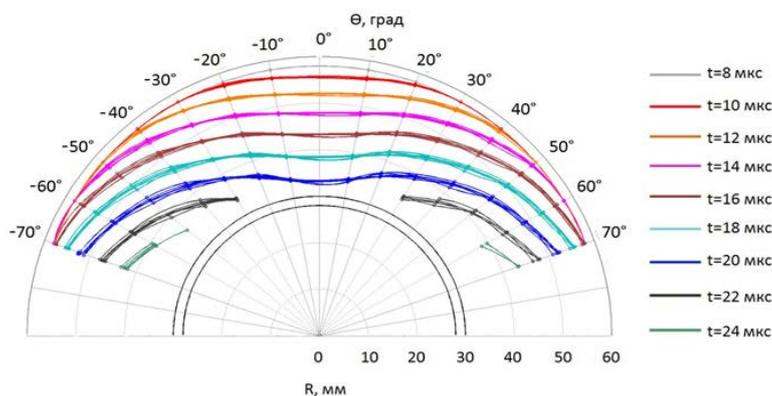
Характерная спектрограмма, полученная в опыте, а также профили скорости стальной оболочки представлены на рисунке 11. В эксперименте зарегистрирован ступенчатый разгон внутренней границы стальной оболочки. Скорость нарастает по мере

развития процесса от  $W \sim 1,55$  км/с (при выходе ударной волны на ВГО) до максимальных значений  $W \sim 2,7$  км/с (на подлёте к базе измерения  $R = 29$  мм). Длительность записей составила в среднем 14 мкс.



**Рисунок 11 – Экспериментальные данные**

Как видно, массивы информации, получаемые с помощью ста и более измерительных каналов гетеродин-интерферометра, выводит газодинамические измерения на новый уровень. С их использованием можно приблизиться к реконструкции пространственной картины развития исследуемого процесса. Так,  $R(\theta)$  диаграмма (рисунок 12), построенная по данным описываемого опыта, отображает изменение радиуса исследуемой оболочки в зависимости от величины угла  $\theta$ . Цветами показаны моменты времени, маркерами обозначены непосредственно экспериментальные точки, а сплошными линиями – их интерполяция кубическими сплайнами. Таким образом, на  $R(\theta)$  диаграмме фактически отображен реальный вид исследуемой оболочки для девяти моментов времени и шести углов  $\phi$ .



**Рисунок 12 –  $R-\theta$  диаграммы движения оболочки в полярной системе координат**

Как следует из  $R(\theta)$  диаграммы, угловая область регистрации в данном опыте составила  $\pm 70^\circ$ . Для каждого момента времени кривые, соответствующие разным углам  $\phi$ , отличаются незначительно. Достаточно симметрично относительно центра развивается процесс и по координате  $\theta$ . Что касается смещения оболочки, то область инициирования

заметно и ожидаемо опережает периферийные зоны, образуя по мере приближения к приёмнику отчётливую двояковыпуклую форму.

## **Заключение**

В докладе представлены результаты экспериментов по многоканальной регистрации скорости схождения цилиндрических и сферических оболочек с помощью метода гетеродин-интерферометра. Описана конструкция разработанных измерительных приёмников, позволяющих проводить измерения с помощью коллиматоров PDV в экспериментальных сборках с цилиндрической и сферической геометрией. Для стальных и медных цилиндрических образцов получены профили скорости их схождения, рассчитаны параметры откольного импульса, благодаря многоканальности выявлены особенности работы устройств, связанные с разнородностью нагружения. В постановке с большим количеством точек зондирования зарегистрировано разрушение сферической чугуновой оболочки на сдвиговых деформациях. Показано, что использование ста и более каналов PDV при исследовании сферического схождения оболочки открывает возможности реконструирования пространственной картины её движения.

## **Список использованных источников**

1 O.T. Strand, D.R. Goosman, C. Martinez, and T.L. Whitworth, «Compact system for high-speed Velocimetry using heterodyne techniques», «Rev. Sci. Instrum.», 77. 2006.

2 «Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов» / Под ред. доктора техн. наук А.Л. Михайлова. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – 322 с.

3 А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, С.А. Финюшин, Д.А. Калашников, Е.А. Чудаков, Е.И. Бутусов, И.С. Гнутов. Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударно-волновом нагружении металлов. ЖЭТФ 149, 33, (2016).

4 М.Ю. Батьков, О.А. Тюпанова, М.И. Шмакова, Е.А. Чудаков, И.В. Шмелёв, Л.К. Антонюк, А.Н. Баландина, М.И. Ткаченко. Особенности откольного разрушения в меди при квазиосесимметричном схождении. Сборник докладов XVII Харитоновских чтений. Саров. 2015.

5 P. Mercier, J. Benier, A. Azzolina, J. Lagrange and D. Partouche, “Photonic Doppler Velocimetry in shock physics experiments”, 8th International conference on mechanical and physical behavior of materials under dynamic loading (DYMAT), France, 2006.

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Шмелев Илья Владимирович
2. Дата рождения 27.04.1987
3. Место работы 0340-08-03

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Фёдоров Алексей Викторович
2. Дата рождения 28.03.1954
3. Место работы 0340-08-03
4. Кандидат технических наук

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Финюшин Станислав Александрович
2. Дата рождения 07.11.1974
3. Место работы 0340-08

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Чудаков Евгений Алексеевич
2. Дата рождения 21.11.1988
3. Место работы 0340-08-03

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Калашников Денис Александрович
2. Дата рождения 25.02.1985
3. Место работы 0340-08-03

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Гнутов Иван Сергеевич
2. Дата рождения 09.09.1985
3. Место работы 0340-08-03

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Антонюк Леонид Константинович
2. Дата рождения 13.02.1984
3. Место работы 0340-08-03

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Яговкин Александр Олегович
2. Дата рождения 18.12.1986
3. Место работы 0340-08-03

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Жерноклетов Михаил Васильевич
2. Дата рождения 12.11.1945
3. Место работы 0330-04
4. Доктор физ. мат. наук

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Дергунов Андрей Викторович
2. Дата рождения 01.12.1978
3. Место работы 0330-04

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Максим Павлович Калинин
2. Дата рождения 28.01.1991
3. Место работы 0340-11-01

**Авторская учетная карточка**

1. Фамилия, имя, отчество Батьков Михаил Юрьевич
2. Дата рождения 13.12.1979
3. Место работы 0330-10-02