

10. A.L. Vereshchagin Conditions for mechanical destruction of detonation nanodiamonds during their isolation and processing // Polzunovsky Vestnik, 2017, No. 1, p. 73-77.
11. E.V. Agafonova, Yu.V. Moshchensky, M.L. Tkachenko Determination of the thermodynamic melting parameters of sulfamethoxazole, trimethopropyme, carbamide, nicodine and their double eutectics by the method of differential scanning calorimetry // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2013, V.87, No. 8, p.1291-1294.
12. Matteo Gallidabino, Francesco S. Romolo, Celine Weyermann Characterization of the volatile organic gunshot by the headspace sorptive extraction // Anal. Bioanal. Chem., 2015, v.407, No. 23, p.7123–7134.
13. Bekirov T.M. Primary processing of natural gases. М. ; Chemistry, 1987, 256р.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ПРЕДЕТОНАЦИОННОГО УЧАСТКА В ОБРАЗЦАХ ИЗ ФЛЕГМАТИЗИРОВАННОГО ОКТОГЕНА ОТ СКОРОСТИ И РАЗМЕРА СФЕРИЧЕСКОГО УДАРНИКА

*Г.В. Белов, А.А. Седов, И.В. Олейников, Н.И. Шустова, А.В. Кудашов, А.В. Шишканов,
Е.С. Митин, Г.А. Козлов, И.Н. Порошин, М.А. Тяпин, А.Н. Тюрин, А.М. Груздев*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Для прогнозирования параметров взрыва деталей из ВВ в условиях ударного воздействия важно иметь информацию о динамике развития взрывчатого превращения, которая характеризуется, в первую очередь, возможностью возбуждения детонационного режима взрыва и размером участка ВВ на котором этот режим устанавливается (преддетонационный участок). Такая информация может быть получена путем численного моделирования условий конкретной задачи с использованием адекватной модели инициирования. Для создания и верификации модели инициирования необходим набор экспериментальных данных для представительного диапазона начальных и граничных условий. Большинство таких данных, например [1], [2], получены в условиях плоского ударноволнового нагружения образцов ВВ. В то же время, согласно [3], на динамику развития взрывчатого превращения влияние оказывает и геометрия фронта входящей в образец ударной волны (УВ). Масштаб этого влияния выявлен недостаточно. Поэтому целью данной работы являлось получение экспериментальной зависимости длины преддетонационного участка в образцах из флегматизированного октогена от скорости и размера сферического ударника вблизи пороговых условий инициирования детонации.

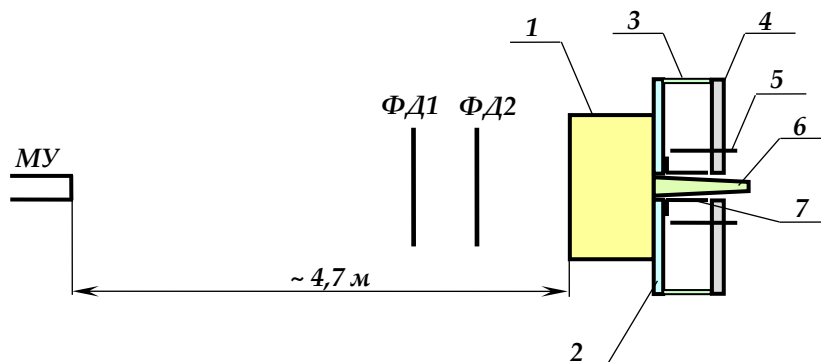
1 Постановка экспериментов

Схема проведения экспериментов представлена на рисунке 1.

Исследуемые образцы из флегматизированного октогена представляли собой цилиндры диаметром 120 мм и высотой 60 мм.

Нагружение образцов ВВ осуществлялось стальными ударниками двух типов:

- 1) сферической формы (диаметр 14,3 мм);
- 2) имитатором сферического ударника диаметром 30 мм (рисунок 2).



МУ – метательное устройство; 1 – исследуемый образец ВВ; 2 – стальная пластинка-индикатор ($\varnothing 150$ мм; $h=2$ мм) с отверстием; 3 – шпилька; 4 – кольцо из пенопласта; 5 – контактные датчики (четыре пары); 6 – облучатель (полистирол); 7 – защитный экран; ФД1, ФД2 – датчики регистрации скорости ударника

Рисунок 1. Схема проведения экспериментов

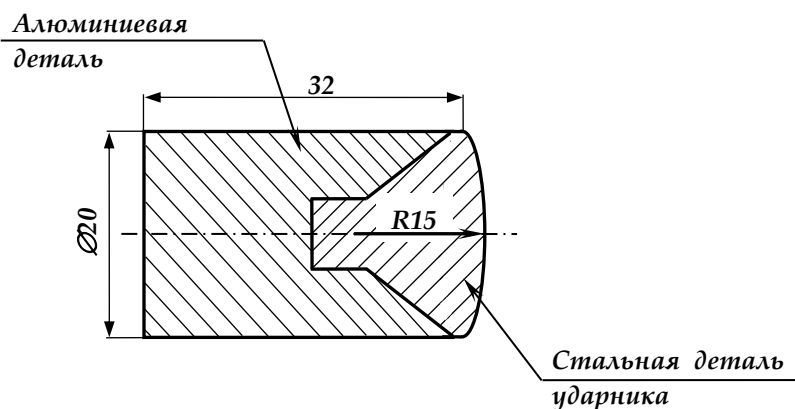


Рисунок 2. Имитатор сферического ударника

Параметры конструкции имитатора стального сферического ударника выбраны таким образом, чтобы при скоростях удара ~ 1000 м/с (ожидаемая пороговая скорость удара) диаметр неразгруженной боковыми волнами разрежения контактной площадки (~ 11 мм) был меньше диаметра сферической части ударника (19 мм) с некоторым «запасом». «Запас» обеспечивал получение корректных результатов при отклонениях оси ударника до ~ 18 градусов.

Ударники разгонялись метательным устройством калибра 20 мм. Скорость удара варьировалась массой навески пластического ВВ и регистрировалась с помощью электроконтактных датчиков и радиointерферометра.

Регистрация параметров взрывного процесса в образце ВВ проводилась двумя методиками: электроконтактной и радиointерферометрической.

С помощью электроконтактной методики регистрировалась скорость ударника и тип взрывного процесса (детонация или низкоскоростной режим взрывчатого превращения (НСР ВП)), выходящего к тыльной поверхности образца. Для этого на тыльной поверхности образца крепилась пластинка-индикатор. Скорость пластинки-индикатора на базе 2 – 8 мм являлась характеристикой взрывного процесса: $\sim 0,5$ км/с – НСР ВП, $\sim 2,5$ км/с – детонация [4]. Погрешность измерения скорости ~ 12 %.

Радиointерферометрическая методика использовалась для регистрации развития взрывного процесса от момента удара до его выхода на тыльную поверхность образца ВВ. Кроме того, она позволяла регистрировать и скорость ударника при подлёте к образцу ВВ. В экспериментах использовался радиointерферометр ПРИ-03 с длиной волны зондирующего излучения 3,2 мм [5].

2 Результаты экспериментов и их анализ

Результаты регистрации процесса взаимодействия ударника с образцом ВВ радиоинтерферометрической методикой на примере опыта с иницированием детонации и двух опытов с иницированием НСР ВП иллюстрируются рисунками 3, 4, 5.

На рисунке 3 приведена исходная интерферограмма опыта с иницированием детонации в образце ВВ при воздействии ударника диаметром 30 мм со скоростью 997 м/с. Низкочастотный колебательный процесс до момента времени ~ 6537 мкс соответствует полёту ударника к образцу ВВ. На временном участке $\sim 6537 - 6543$ мкс зарегистрирован режим стационарной детонации (высокочастотный процесс) в образце. После ~ 6543 мкс детонация выходит на тыльную поверхность образца.

На рисунке 4 приведена исходная интерферограмма опыта с отказом в иницировании детонации ВВ при воздействии ударника диаметром 30 мм со скоростью 882 м/с. По сравнению со случаем иницирования детонации на временном участке позже момента удара (7353 мкс) интерферограмма имеет достаточно сложный и многочастотный общий вид.

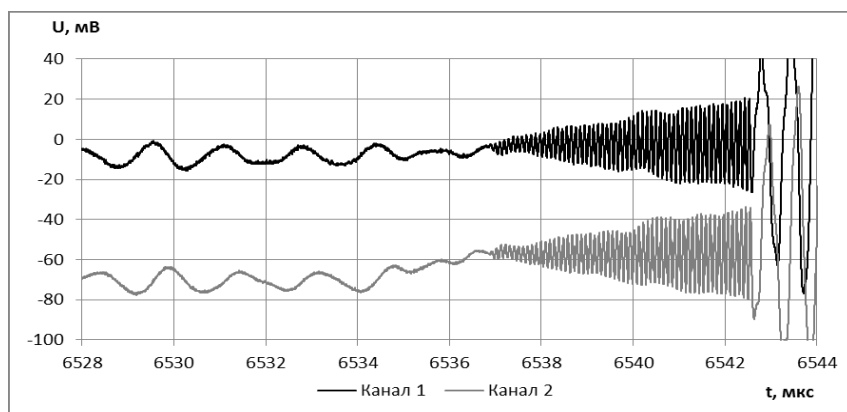


Рисунок 3. Экспериментальная интерферограмма

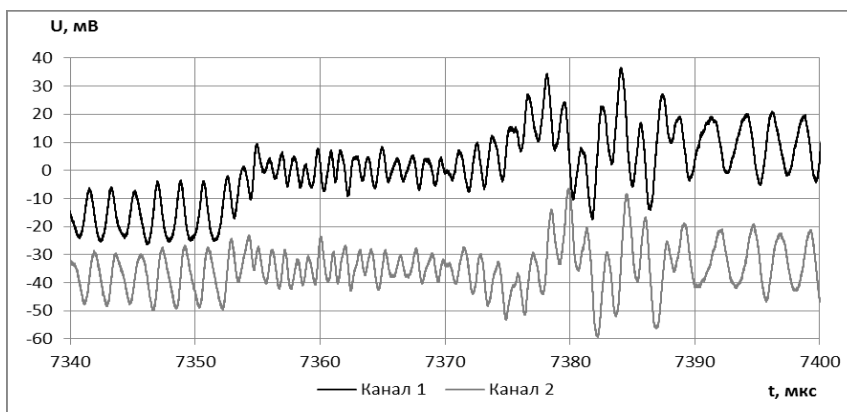


Рисунок 4. Экспериментальная интерферограмма

Для определения скорости ударника строилась X-t диаграмма его полёта. Чтобы минимизировать влияние отклонения траектории ударника относительно оси антенны радиоинтерферометра для аппроксимации использовался максимально удаленный от образца ВВ участок траектории. Коэффициент наклона аппроксимирующей прямой позволил получить оценку скорости ударника. Для определения точного времени касания ударником образца ВВ зависимость, описываемая аппроксимирующей прямой, вычиталась из X-t диаграммы.

На рисунке 5 представлена X-t диаграмма детонационного процесса.

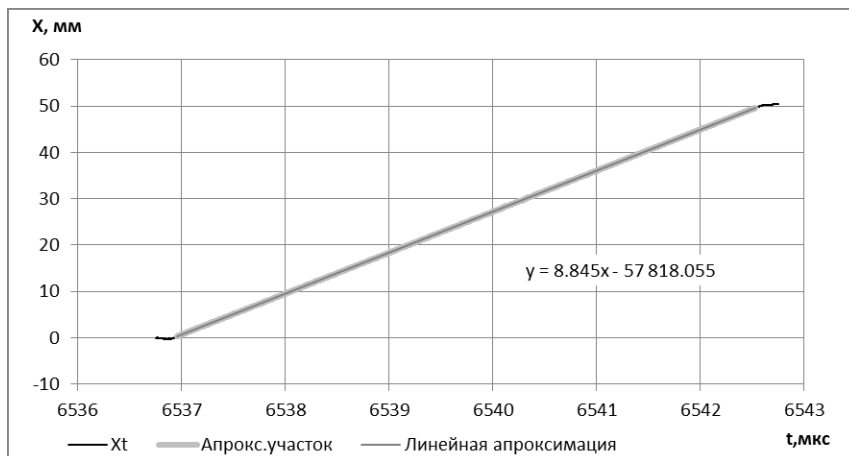


Рисунок 5. X-t диаграмма детонационного процесса (опыт: $d_{уд}=30$ мм, $V=997$ м/с)

Из графика рисунка 5 видно, что средняя скорость детонации составила в опыте 8845 м/с. Времена начала стационарной детонации и её выхода на свободную поверхность образца определялись вычитанием аппроксимирующей прямой из X-t диаграммы детонационного процесса. Глубину возникновения детонации определяли совмещением момента окончания детонации с толщиной образца ВВ.

Результат регистрации скорости взрывчатого превращения в образце ВВ при отсутствии детонации (опыт: $d_{уд}=14,3$ мм, $V=1216$ м/с) показан на рисунке 6. Момент удара и момент смещения пластинки-индикатора на базу 2 мм показаны вертикальными линиями. Как видно, скорость распространения взрывного процесса по мере прохождения по образцу ВВ снижается от ~ 1500 м/с до ~ 600 м/с. Время от момента удара до момента возникновения взрывчатого превращения составило ~ 5 мкс.

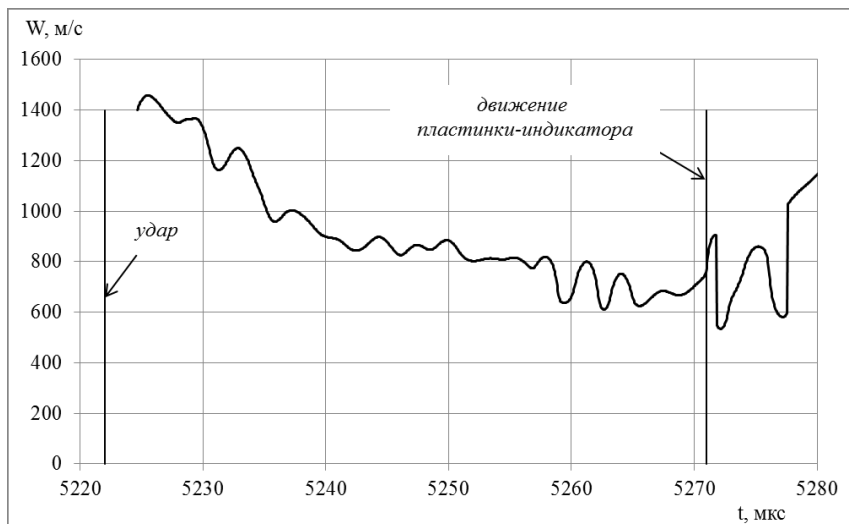


Рисунок 6. W-t диаграмма взрывчатого превращения (опыт: $d_{уд}=14,3$ мм, $V=1216$ м/с)

Результат регистрации скорости взрывчатого превращения в образце ВВ при отсутствии детонации для ударника с $d_{уд}=30$ мм ($V=882$ м/с) показан на рисунке 7.

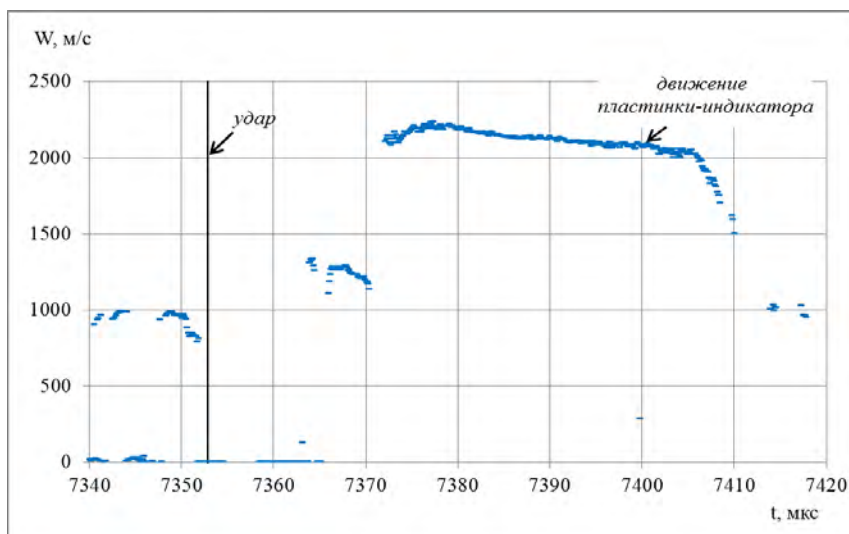


Рисунок 7. W-t диаграмма взрывчатого превращения (опыт: $d_{\text{УД}}=30$ мм, $V=882$ м/с)

Время касания ударником образца ВВ на диаграмме показано вертикальной линией. Стрелкой показан момент смещения пластинки-индикатора на базу 2 мм. Время от момента удара до момента возникновения взрывчатого превращения составило ~ 11 мкс. В момент времени 7364 мкс на интерферограмме проявляется слабовыраженная спектральная компонента, соответствующая скорости около 1300 м/с, которая наблюдается до 7370 мкс со спаданием скорости до 1150 м/с. В районе 7373 мкс начинается отчётливый отклик процесса, идущего со скоростью 2100 - 2200 м/с.

Результаты опытов по скорости ударника, давлению входящей в образец УВ, величине преддетонационного участка, времени задержки инициирования детонации, радиусу кривизны входящей в образец УВ, скорости пластинки-индикатора представлены в таблице.

Таблица 1

№ опыта	Скорость удара, м/с	Давление, ГПа	Длина преддетонационного участка, мм	Задержка инициирования детонации, мкс	Радиус кривизны УВ, мм	Скорость пластинки-индикатора, км/с
Стальной сферический ударник диаметром 14,3 мм						
1	1336	9,626	5,4	0,95	1,99	2,8
2	1333	9,598	5	0,9	1,99	2,4
3	1296	9,258	7,8	1,5	1,95	–
4	1253	8,877	16	2,5	1,90	2,5
5	1232	8,68	20	4,75	1,88	–
6	1216	8,546	> 60	–	1,87	0,53
Имитатор стального шара диаметром 30 мм						
7	1179	8,06	5,7	1,0	3,85	2,6
8	1098	7,20	6,4 – 6,6	1,25	3,76	2,6
9	997	6,36	9,7	2,09	3,53	2,6
10	940	5,86	19,5 – 20,5	4,9	3,39	2,4
11	935	5,86	18,9 – 19,2	4,88	3,38	2,5
12	882	5,44	> 60	–	3,25	0,6

Средние скорости движения пластинки-индикатора на базе 2 – 8 мм при инициировании детонации составили 2,4 – 2,8 км/с, а при инициировании НСР ВП – 0,5 – 0,6 км/с.

Задержка в инициировании детонации определялась временем от момента удара до момента формирования детонационного режима.

Давления рассчитывались по ударным адиабатам для стали и флегматизированного октогена.

Радиус кривизны (r_0), входящей в образец ВВ УВ, оценивался по соотношению:

$$r_0 = R \cdot V / D,$$

где R – радиус ударника; V – скорость ударника; D – скорость УВ в образце ВВ.

Данные таблицы по условиям инициирования детонации в образцах ВВ свидетельствуют о том, что величина пороговой скорости (с учётом погрешности в её измерении ~ 4 м/с) составила:

- 1) (1224 ± 16) м/с для ударника диаметром 14,3 мм;
- 2) (909 ± 31) м/с для ударника диаметром 30 мм.

Для наглядности, данные из таблицы представлены на рисунке 8 в виде графика зависимости длины преддетонационного участка от скорости ударника, а на рисунке 9 – от давления, входящей в образец ударной волны (в логарифмических координатах). Результаты опытов, в которых формирования детонации в пределах толщины образца (60 мм) не зарегистрировано, представлены символами со стрелкой вверх, означающей, что длина преддетонационного участка больше 60 мм. Возможность в данном случае перехода в детонацию будет уже определяться динамикой развития НСР ВП, которая, как известно [3], зависит от размеров образца, наличия и параметров конструктивных ограничений (корпуса и их прочность). Возможность реализации такого перехода в данной работе не рассматривалась.

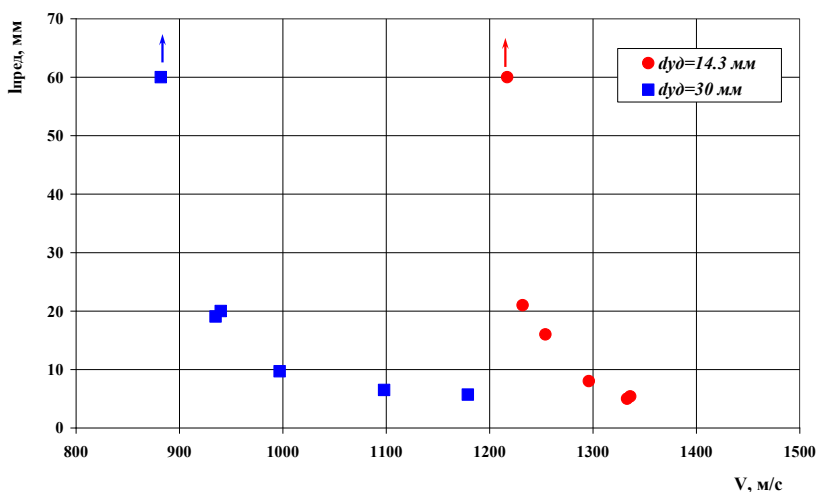


Рисунок 8. Зависимость длины преддетонационного участка от скорости ударника

Как видно из таблицы и рисунков 8 - 9, зависимость длины преддетонационного участка от скорости ударника и давления довольно сильная. При снижении скорости ударника с $d_{уд}=14,3$ мм на ~ 100 м/с ($\sim 10\%$) и ударника с $d_{уд}=30$ мм на ~ 240 м/с ($\sim 20\%$), а давления, соответственно, на 1 ГПа и на $\sim 2,2$ ГПа длина преддетонационного участка увеличивается с 5 мм до 20 мм (для $d_{уд}=14,3$ мм) и с 5,7 мм до 20 мм (для $d_{уд}=30$ мм). При достижении пороговых условий происходит отказ в возбуждении детонации (т.е. увеличение преддетонационного участка более чем на 40 мм) при снижении скорости ударника с $d_{уд}=14,3$ мм всего на ~ 30 м/с (2,5%) и на ~ 60 м/с (6,6%) для $d_{уд}=30$ мм.

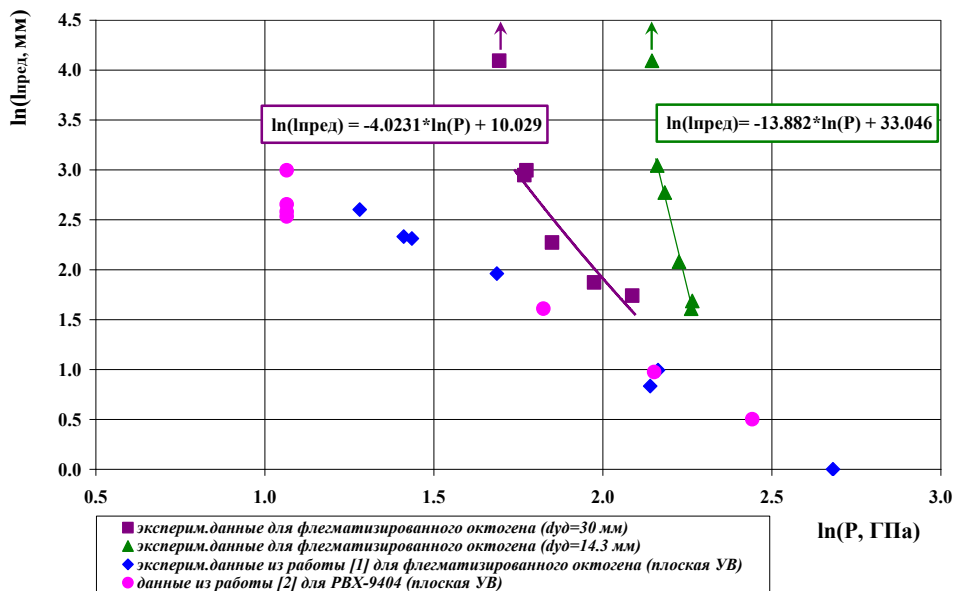


Рисунок 9. График зависимости логарифма длины преддетонационного участка от логарифма давления

На рисунке 9 представлены для сравнения экспериментальные данные для случаев инициирования аналогичного и близкого по составу ВВ плоскими УВ длительностью 0,4 – 5 мкс [1], [2]. В условиях данной работы длительность импульса под точкой удара ~ 1,6 – 2,3 мкс. Как видно из графика, длина преддетонационного участка при инициировании плоскими УВ существенно слабее зависит от амплитуды входящей в образец УВ, по сравнению со случаем расходящейся УВ от сферического ударника. Для одинакового диапазона изменения длины преддетонационных участков (от ~ 5 мм до ~ 20 мм) изменение амплитуды плоских УВ составляет более 2 раз, в то время как для сферических ударников ~ 10 – 20 %. При увеличении радиуса кривизны входящей в образец ВВ УВ с ~ 2 мм (d_{уд}=14,3 мм) до ~ 3 – 4 мм (d_{уд}=30 мм) происходит смещение экспериментальных точек в сторону результатов для случая инициирования плоской УВ, проявляющееся в уменьшении угла наклона аппроксимирующей прямой.

Отдельного внимания заслуживают результаты регистрации распространения взрывного процесса в опытах с отказом в инициировании детонации. Времена от момента удара до момента формирования волны взрывчатого превращения составило в этих опытах 5 - 11 мкс. Однако, несмотря на то, что полученные скорости распространения взрывного процесса по образцу (600 – 2200 м/с) не противоречат установленному диапазону скоростей распространения НСР ВП (по [6] от верхней границы скорости распространения конвективного горения до ~ скорости звука), пространственно-временной анализ записей не позволяет пока однозначно отнести полученные скорости к определенной части характерного для НСР ВП волнового комплекса (к фронту волны сжатия, зоне химической реакции или к положению максимального градиента давления на профиле волны).

В процессе распространения НСР ВП профиль волнового комплекса эволюционирует и место отражения радиоизлучения может меняться. С этим, возможно, связан скачок на записи скорости в опыте с диаметром ударника 30 мм (рисунок 7). Однако, несмотря на существующую пока неоднозначность в интерпретации интерферограмм в опытах с отсутствием детонации, использование данной методики при изучении НСР ВП позволяет рассчитывать на перспективы получения полезной информации для понимания процесса инициирования и распространения такого режима взрыва.

Заключение

Полученные результаты по параметрам взрыва и формированию детонационного процесса в образцах из флегматизированного октогена в зависимости от скорости и размера сферических ударников показали:

1 Величины пороговых скоростей, приводящих к иницированию детонации, составили:

- (1224 ± 16) м/с для ударника диаметром 14,3 мм;
- (909 ± 31) м/с для ударника диаметром 30 мм.

2 Изменение длины преддетонационного участка ($l_{\text{пред}}$) от 20 мм до ~5 мм может быть представлено зависимостями:

$\ln(l_{\text{пред}}) = -13,882 \cdot \ln(P) + 33,046$ для ударника диаметром 14,3 мм

и $\ln(l_{\text{пред}}) = -4,0231 \cdot \ln(P) + 10,029$ для ударника диаметром 30 мм,

($l_{\text{пред}}$ в мм, а P (давление УВ) в ГПа).

3 Длина преддетонационного участка при иницировании ВВ плоскими УВ существенно слабее зависит от амплитуды входящей в образец УВ, по сравнению со случаем расходящейся УВ от сферических ударников. При увеличении диаметра сферического ударника различие в зависимостях уменьшается.

4 При снижении скорости удара ниже пороговой, формирования детонационного процесса в образцах толщиной 60 мм не происходит.

5 Использование радиоинтерферометрической методики позволяет рассчитывать на перспективы получения полезной информации при исследовании процесса иницирования и распространения низкоскоростного режима взрывчатого превращения.

Список литературы

1. Е.Н. Богданов, В.М. Бельский, А.В. Родионов, М.Е. Шаврин, В.И. Буренин. Особенности ударно-волнового иницирования взрывчатых веществ на основе октогена и триаминотринитробензола (ТАТБ) // Сборник трудов международной конференции XIX Харитоновские научные чтения, Саров, 2017 г., том 1, с.31-38.
2. Дж. Уокерли, Р. Раби, М. Гинсберг, А. Андерсон. Сборник статей под редакцией А.А. Борисова. Исследование ударноволнового иницирования РВХ-9404. Детонация и взрывчатые вещества // М.: Мир, 1981 г., с.269 - 290.
3. П. Чен, Дж. Кеннеди. Сборник статей под редакцией А.А. Борисова. Влияние химической кинетики и кривизны фронта на динамику развития ударных волн во взрывчатых веществах. Детонация и взрывчатые вещества // М.: Мир, 1981 г., с.358 - 374.
4. Г.В. Белов, Ю.Б. Базаров, С.Н. Екимчев, А.К. Жиёмбетов, А.В. Кудашов, И.В. Олейников, А.В. Шишканов, Н.И. Шустова. Влияние скорости ударника на параметры взрыва образцов из двух типов бризантных ВВ // Сборник трудов международной конференции XV Харитоновские тематические научные чтения, Саров, 2013 г, с.111-118.
5. В.М. Бельский, А.Л. Михайлов, А.В. Родионов, А.А. Седов. Микроволновая диагностика ударноволновых и детонационных процессов // ФГВ, т.47, № 6, 2011 г.
6. А.Ф. Беляев, В.К. Боболев, А.И. Коротков, А.А. Сулимов, С.В. Чуйко. Переход горения конденсированных систем во взрыв // М.: Наука, 1973 г., 292 с.