

для наихудшей реакции она не превышает 4.5%, а для остальных значительно меньше. При повышении температуры погрешность быстро убывает. Такой точности вполне достаточно для расчетов термоядерных мишеней.

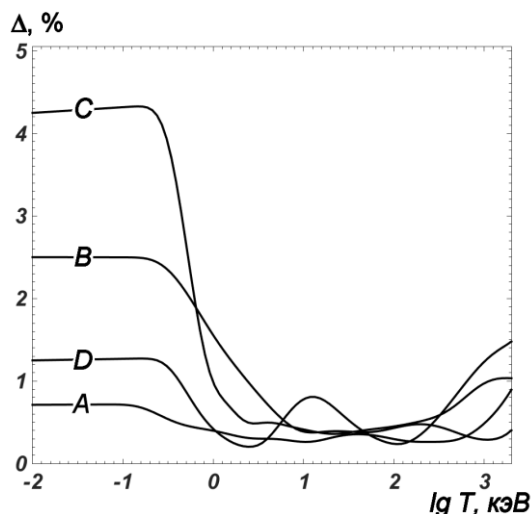


Рисунок 4. Доверительные коридоры кривых  $K(T)$  для реакций (A)...(D)

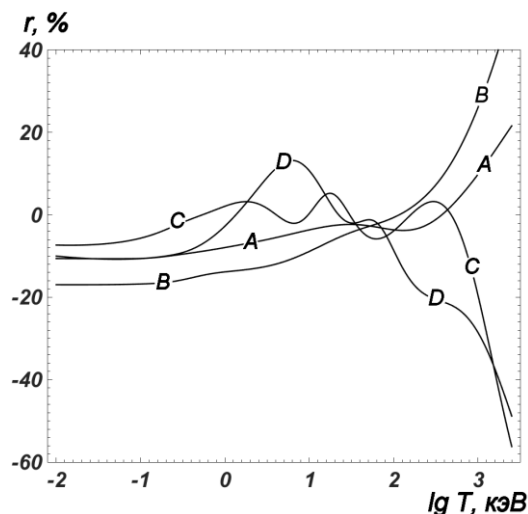


Рисунок 5. Отношение формул Козлова к скоростям реакций из (2)-

Наши результаты сравнивались с формулами Б.Н. Козлова [4], наиболее употребительными в отечественных расчетах. S-фактор Козлова для реакции (A) приведен на рис. 1 (1962 год). Результаты сравнения формул для  $K(T)$  показаны на рис. 5. Видно, что в области низких температур  $T < 100$  кэВ погрешность формул Козлова достигает 20%. Вблизи  $T = 100$  кэВ она существенно уменьшается, но при  $T > 100$  кэВ формулы Козлова быстро теряют свою применимость.

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-31-00068.

### Список литературы

1. NEA Data Bank – Nuclear Data Services. <http://www.oecd-nea.org/janisweb/search/exfor>
2. Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В. // ДАН. Информатика. 2000. Т. 374. № 4. С. 464.
3. Белов А.А., Калиткин Н.Н. // ДАН. Информатика. 2016. Т. 470. № 3. С. 266.
4. Козлов Б.Н. // Атомная энергия. 1962. Т. 12. № 3. С. 238.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ СЖИМАЕМОСТИ АБС 20/20 С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДИК МАНГАНИНОВОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ И МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ 8-40 ГПа

А.В. Цветков, Е.Н. Богданов, М.Е. Шаврин, В.И. Буренин, А.В. Родионов, Г.А. Козлов, Е.В. Рычагов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

### Введение

Распространение ударных волн в органических веществах сопровождается физико-химическими превращениями, связанными с преобразованием формы молекул и разрывом связей в них. Практический интерес представляет конструкционный материал АБС 20/20 (сополимера стирола ( $C_8H_8$ ) с бутадиеном ( $C_4H_6$ , 20%) и акрилонитрилом ( $C_3H_3N$ , 20%),  $\rho_0=1,05$ ), который

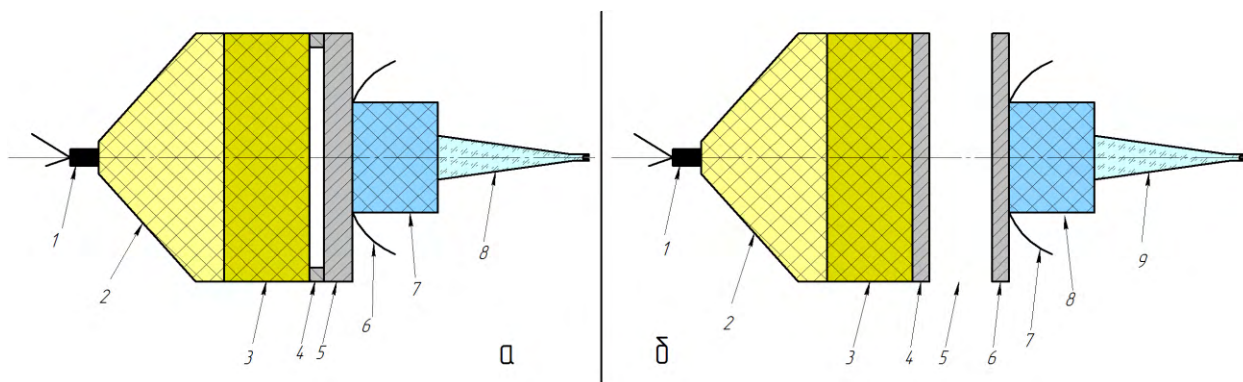
используется при изготовлении прецизионных устройств для генерации мощных ударных волн. В интервале амплитуд ударных волн 8-40 ГПа АБС 20/20, как и многие другие органические вещества, претерпевает физико-химические превращения, что проявляется в виде излома на его ударной адиабате. Уравнения состояния полимеров в широком диапазоне изменения давления, учитывающие данные превращения, являются необходимым элементом для численного решения задач физики высоких плотностей энергии.

Целью работы являлось экспериментальное исследование ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 с применением методик непрерывной регистрации для определения параметров ударного сжатия полимерных материалов. Исследования проведены с применением методик манганинового датчика и микроволновой диагностики с длинами волн зондирующего излучения 3,2 мм и 2,1 мм. Посредством последней в экспериментах регистрировались одновременно значения волновых  $D$  и массовых скоростей  $U$ , что вместе с регистрацией профилей давления  $P$  за фронтом ударной волны манганиновыми датчиками делает измерения полными:  $P = \rho_0 D U$ , где  $\rho_0$  – начальная плотность материала.

### Постановка экспериментов

Эксперименты проводились по двум основным схемам [1-4], представленным на рисунках 1а и 1б.

Ударная волна в образцах АБС 20/20 создавалась при распаде разрыва на границе с металлическим экраном. В варианте по рисунку 1а ударная волна в экране формируется при торможении продуктов взрыва активного заряда взрывчатого вещества, в варианте рисунка 1б продукты взрыва активного заряда разгоняют металлический ударник, который, в свою очередь, взаимодействует с экраном. Плоский детонационный фронт в активном заряде диаметром 120 мм создавался при помощи генераторов плоской ударной волны. В качестве активных зарядов использовались цилиндрические детали из прессованного ТНТ и состава на основе гексогена разной длины и диаметром 120 мм. Исследуемые образцы АБС 20/20 диаметром 50 мм и толщиной 14 мм размещались вплотную к экранам.



- 1 – электродетонатор;
- 2 – генератор плоской волны;
- 3 – активный заряд;
- 4 – воздушный зазор
- 5 – экран, алюминий
- 6 – манганиновые датчики
- 7 – образец АБС 20/20
- 8 – антенна радиоинтерферометра

- 1 – электродетонатор
- 2 – генератор плоской волны
- 3 – активный заряд
- 4 – ударник, алюминий
- 5 – воздушный зазор
- 6 – экран, алюминий
- 7 – манганиновые датчики
- 8 – образец АБС 20/20
- 9 - антенна радиоинтерферометра

Рисунок 1. Схемы проведения экспериментов

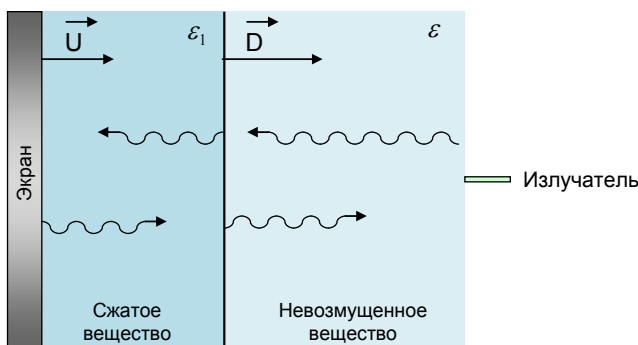
Параметры конструкций нагружающих устройств, используемых в экспериментах, представлены в таблице №1.

**Таблица 1.** Конструкции нагружающих устройств

№ опыта	Заряд ВВ, мм	Толщина ударника, мм	Толщина экрана, мм	Скорость свободной поверхности экрана $W$ , км/с
1	Ø 120x40	-	10	1,90±0,02
2	Ø120x40	-	10	2,27±0,02
3	Ø120x40	-	10	2,27±0,02
4	Ø 120x180	-	10	2,93±0,02
5	Ø 120x40	6	6	3,15±0,02
6	Ø 120x180	-	10	3,39±0,02
7	Ø 120x60	6	4	4,14±0,02
8	Ø 120x100	6	4	4,49±0,04
9	Ø 120x100	6	4	4,49±0,04

Движение ударной волны в исследуемых образцах регистрировалось при помощи радиоинтерферометров [1-4] с длинами волн зондирующего излучения 3,2 мм и 2,1 мм, которое вводилось в образец через диэлектрический волновод из фторопласта-4 и излучатель из полистирола.

В данной работе использование радиоволнового метода позволило в экспериментах непосредственно определить величины волновой  $D$  и массовой  $U$  скорости. На рисунке 2 представлена схема распространения радиоизлучения в исследуемой сборке.



**Рисунок 2.** Падение радиоизлучения на систему фронт ударной волны – экран

В представленной на рисунке 2 системе часть радиоизлучения будет отражаться от фронта ударной волны, другая же часть пройдет сквозь него, отразится от границы раздела сжатое вещество-экран и вновь пройдет сквозь ударный фронт.

Амплитуду принимаемого сигнала можно записать следующим образом [5]:

$$S(t) = \sum_m \sum_n A_{mn} \cos \left( \omega_0 t + 2\pi \left( \frac{2n(D-U)}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2} - \frac{2mD}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} \right) t + \Delta\varphi_{mn} \right) \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – круговая частота излучения,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – коэффициенты диэлектрической проницаемости невозмущенного и сжатого вещества соответственно,  $A_{mn}$  – коэффициенты мод излучения, а  $\Delta\varphi_{mn}$  – сдвиг фаз мод. Анализируя данное выражение, можно увидеть, что в самом простом случае с отсутствием переотражений излучения (моды с  $m=1$   $n=0$  и  $m=1$   $n=1$ ) интерферограмма имеет вид:

$$A(t) = A_{10} \cos \left( 2\pi \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} t + \Delta\varphi_1 \right) + A_{11} \cos \left( 2\pi \left( \frac{2(D-U)}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2} - \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} \right) t + \Delta\varphi_2 \right) \quad (2)$$

Следует заметить, что в реальном эксперименте в сигнале данные спектральные компоненты являются преобладающими вследствие малой мощности высших гармоник сигнала из-за потерь энергии при преотражениях на границах раздела.

Сигнал (2) является суммой двух компонент - высокочастотной с частотой:

$$F_1 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} \quad (3)$$

и низкочастотной с частотой:

$$F_2 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} - \frac{2(D-U)}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2} \quad (4)$$

Для определения скорости ударной волны  $D$  необходимо отфильтровать компоненту с частотой  $F_1 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1}$ . Для определения массовой скорости  $U$ , равной скорости границы раздела сжатое вещество-экран, необходимо знать коэффициент диэлектрической проницаемости сжатой среды  $\varepsilon_2$ , который можно определить по отношению интенсивности компоненты сигнала, отражённого от фронта ударной волны (гармоника  $I_{10}$  с частотой  $F_1 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1}$ ), к интенсивности сигнала, отражённого от экрана (гармоника  $I_{11}$  с частотой  $F_2 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} - \frac{2(D-U)}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2}$ ):

$$R = \frac{I_{10}}{I_{11}} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{4 \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (5)$$

Из соотношения (5) можно получить выражение для коэффициента диэлектрической проницаемости ударно-сжатого вещества  $\varepsilon_2$ :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 (1 + 8R^2 + 4R \sqrt{4R^2 + 1}) \quad (6)$$

а из (4) – выражение для массовой скорости:

$$U = \frac{F_2 \lambda_0}{2 \sqrt{\varepsilon_1}} + D \frac{(\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1})}{\sqrt{\varepsilon_2}} \quad (7)$$

Таким образом, для определения массовой скорости  $U$  (скорости контактной границы) необходимо определить волновую скорость  $D$  и провести амплитудно-частотный анализ экспериментальной интерферограммы с целью определения отношения  $R$  гармоник сигнала (5) и значения частоты  $F_2$ .

Для регистрации профилей давления на границе экран-образец и определения значений амплитуд  $P$  и скоростей  $D$  ударных волн в АБС 20/20 применялась методика манганинового датчика давления [6-8]. Манганиновые датчики изготовлены из манганиновой фольги толщиной 30 мкм, полная толщина датчика вместе с изоляцией составляла около 230 мкм. Сопротивление активного элемента датчика составляет около 0,3 Ом. Переход от регистрируемого в эксперименте напряжения  $U$  на датчике к давлению  $P$  производится с использованием калибровочной зависимости электрического сопротивления манганина от давления ударного сжатия:

$$P = a + b \cdot (U/U_0 - 1) + c \cdot (U/U_0 - 1)^2 + d \cdot (U/U_0 - 1)^3, \quad (8)$$

где  $U/U_0$  – отношение амплитуд напряжений на датчике после и до прихода волны сжатия, которое определялось по экспериментальным осциллограммам,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  – коэффициенты калибровочной зависимости манганинового датчика:  $a=0,2854$  ГПа,  $b=35,051$  ГПа,  $c=1,7776$  ГПа,  $d=2,0568$  ГПа. Погрешность определения давления манганиновыми датчиками составляет около 5%.

### Результаты экспериментов

На рисунке 3 приведены характерные профили давления в АБС 20/20, зарегистрированные манганиновыми датчиками. Как видно из рисунка, все профили имеют «столообразный» вид, спад давления на кривых 2 и 3 обусловлен приходом тыльной волны разрежения.

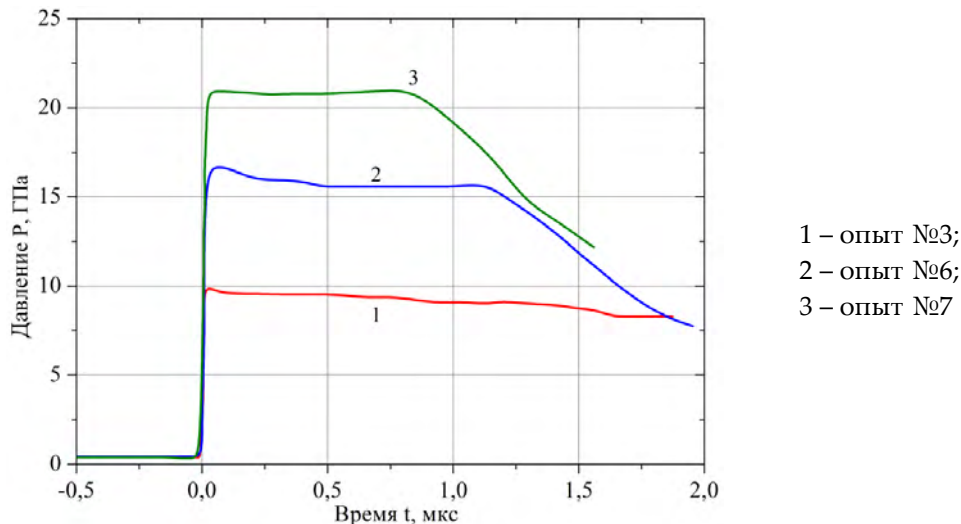


Рисунок 3. Профили давления в АБС 20/20

На рисунке 4 для иллюстрации представлена экспериментальная интерферограмма, зарегистрированная в одном из экспериментов радиоинтерферометром с длиной волны зондирующего излучения 3,2 мм. Из представленного графика можно видеть, что сигнал является результатом биений двух синусоидальных сигналов с различными частотами и может быть описан выражением (2).

Результаты всех опытов с использованием микроволновой диагностики представлены в таблице №2, с использованием методики манганинового датчика давления – в таблице №3. Экспериментальные точки на ударной адиабате для методики манганинового датчика давления определялись методом отражения ударных адиабат по измеренным значениям давления за фронтом ударной волны и изэнтропе расширения алюминия (материал экрана).

На рисунках 5 и 6 полученные результаты по ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 представлены в D-U-переменных. На графиках также приведены данные для полистирола – сополимера стирола – основного компонента АБС 20/20 [9, 10].

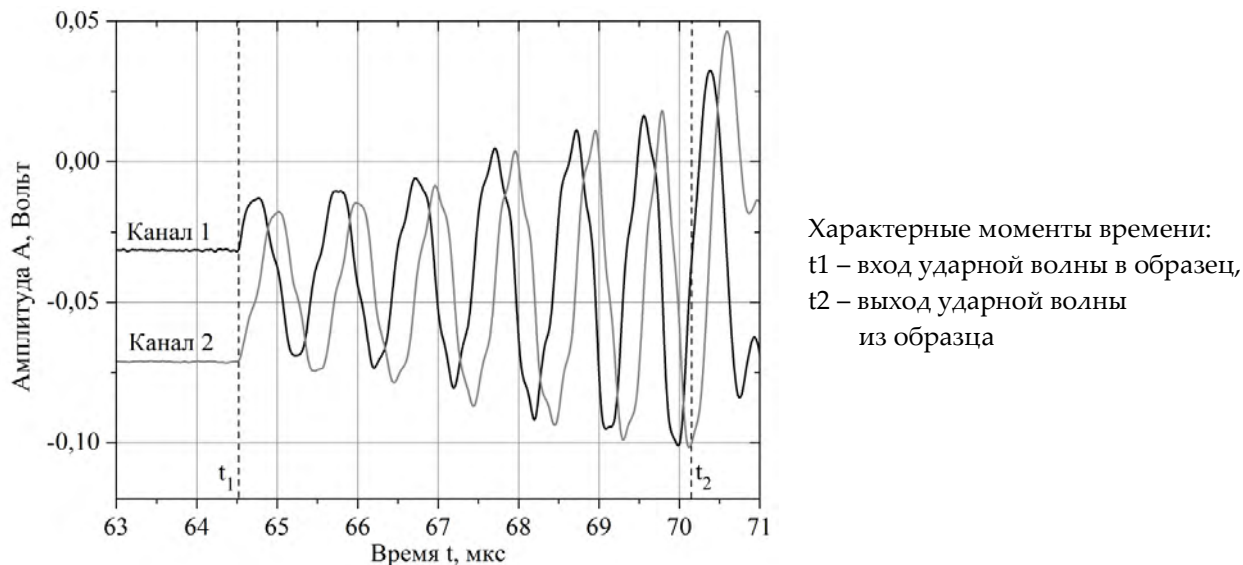


Рисунок 4. Экспериментальная интерферограмма

Таблица 3. Экспериментальные результаты с применением микроволновой диагностики

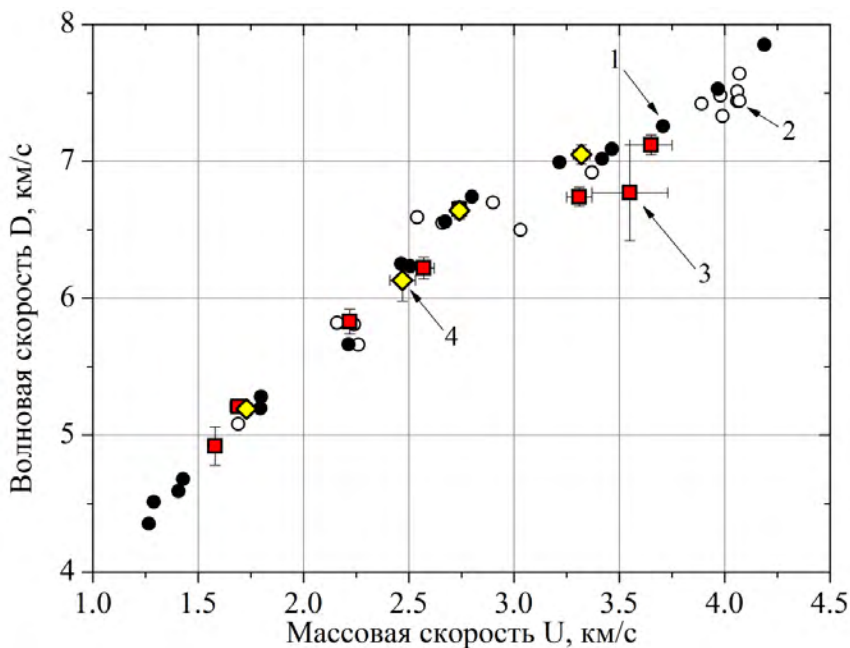
№ Опыта	D <sub>риф</sub> , км/с		U <sub>риф</sub> , км/с		P <sub>риф</sub> , ГПа	
	λ <sub>0</sub> =2,1 мм	λ <sub>0</sub> =3,2 мм	λ <sub>0</sub> =2,1 мм	λ <sub>0</sub> =3,2 мм	λ <sub>0</sub> =2,1 мм	λ <sub>0</sub> =3,2 мм
1	-	4,73±0,09	-	1,48±0,02	-	7,35±0,24
2	-	4,92±0,14	-	1,58±0,03	-	8,16±0,39
3	5,19±0,05	5,21±0,05	1,73±0,02	1,69±0,04	9,43±0,20	9,25±0,31
4	-	5,83±0,09	-	2,22±0,03	-	13,59±0,40
5	6,13±0,15	-	2,47±0,06	-	15,90±0,78	-
6	-	6,22±0,08	-	2,57±0,05	-	16,79±0,54
7	6,64±0,06	6,65±0,06	2,74±0,02	2,74±0,02	19,10±0,33	19,13±0,33
8	-	6,74±0,07	-	3,31±0,06	-	23,42±0,67
9	-	6,77±0,35	-	3,55±0,18	-	25,24±2,58
10	7,05±0,07	7,12±0,07	3,32±0,04	3,65±0,10	24,58±0,54	27,29±1,02

Где λ<sub>0</sub> – длина волны излучения радиоинтерферометра,  
D<sub>риф</sub> – волновая скорость в образце, определенная радиоинтерферометром,  
U<sub>риф</sub> – массовая скорость в образце, определенная радиоинтерферометром,  
P<sub>риф</sub> – давление в образце, определенное по D<sub>риф</sub> и U<sub>риф</sub>: P<sub>риф</sub>=ρ<sub>0</sub>D<sub>риф</sub>U<sub>риф</sub>.

Таблица 2. Экспериментальные результаты с применением методики манганинового датчика давления

№ Опыта	3	5	7	8
P <sub>м</sub> , ГПа	9,26±0,46	15,5±0,78	21,61±1,08	23,43±1,17
D <sub>м</sub> , км/с	5,02±0,16	6,50±0,13	6,89±0,16	6,85±0,13
U <sub>м</sub> , км/с	1,76±0,05	2,27±0,07	2,98±0,08	3,26±0,10

Где P<sub>м</sub> – давление в образце, определенное манганиновым датчиком,  
D<sub>м</sub> – волновая скорость в образце, определённая манганиновым датчиком,  
U<sub>м</sub> – массовая скорость в образце, определенная по P<sub>м</sub> и D<sub>м</sub>: U<sub>м</sub>= P<sub>м</sub>/(ρ<sub>0</sub>D<sub>м</sub>).

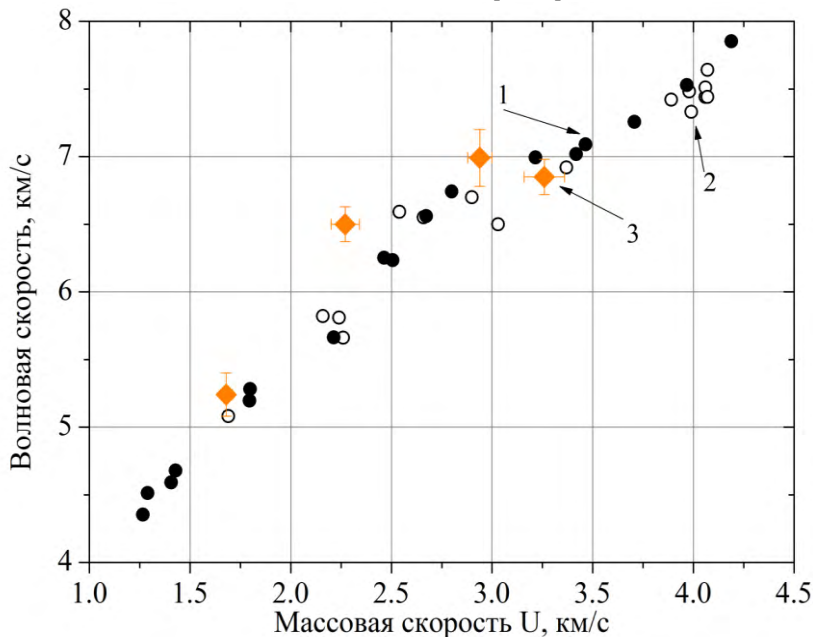


1 – полистирол [9]; 2 – полистирол [10]; 3 – радиоинтерферометр, настоящая работа, λ<sub>0</sub>=3,2мм;  
4 – радиоинтерферометр, настоящая работа, λ<sub>0</sub>=2,1мм

Рисунок 5. Ударная адиабата в D-U-переменных. Метод микроволновой диагностики

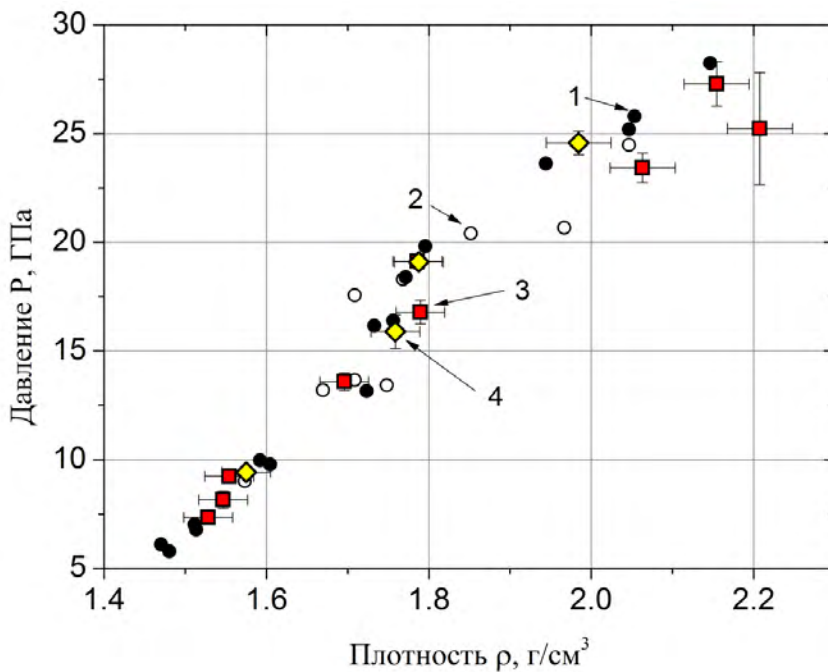
Представленные на рисунках 5 и 6 данные показывают удовлетворительное согласие полученных в настоящей работе данных для АБС 20/20 с применением методик микроволновой диагностики и манганинового датчика давления с данными для полистирола.

На рисунках 7 и 8 полученные результаты по ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 представлены в  $P$ - $\rho$  -переменных. На графиках также приведены данные для полистирола – сополимера стирола – основного компонента АБС 20/20 [9, 10].



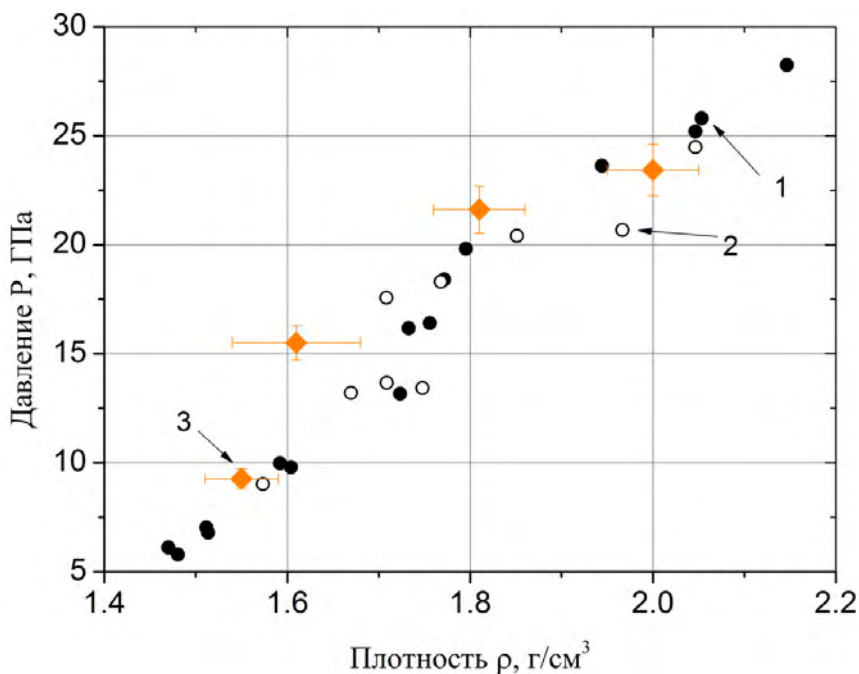
1 – полистирол [9]; 2 – полистирол [10]; 3 – манганин настоящая работа

**Рисунок 6.** Ударная адиабата в  $D$ - $U$ -переменных. Метод манганинового датчика давления



1 – полистирол [9]; 2 – полистирол [10]; 3 – радиоинтерферометр, настоящая работа,  $\lambda_0=3,2\text{мм}$ ;  
4 – радиоинтерферометр, настоящая работа,  $\lambda_0=2,1\text{мм}$

**Рисунок 7.** Ударная адиабата в  $P$ - $\rho$  -переменных. Метод микроволновой диагностики



1 – полистирол [9]; 2 – полистирол [10]; 3 – марганец настоящая работа

**Рисунок 8.** Ударная адиабата в  $P$ - $\rho$  -переменных. Метод марганцевого датчика давления

### Заключение

Проведены экспериментальные исследования ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 в диапазоне давлений 7-25 ГПа.

На основании полученных результатов показано, что данные по ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 хорошо согласуются с аналогичными данными для полистирола – сополимера стирола – основного компонента АБС 20/20. Зарегистрировано физико-химическое превращение, проявляющееся в виде излома на ударной адиабате, в диапазоне давлений 20,8-23,4 ГПа.

Отработана методика измерения полного набора параметров ударного сжатия: давления, массовой и волновой скоростей. Полученные данные могут быть использованы для верификации уравнений состояния полимеров.

### Список литературы

1. Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А. // ФГВ, 2011 г., т. 47, № 6, с. 29-41
2. Rae P.J., Glover B.B., Gunderson J.A., Perry W. Lee // Shock Compression of Condensed Matter, 2011
3. Невозмущающие методы диагностики быстротекущих процессов \ Под. ред. Доктора техн. наук. А.Л. Михайлова. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – 322 с.
4. Михайлов А.Л., Костюков В.Е., Орехов Ю.И. и др. Некоторые результаты применения в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ радиоинтерферометров миллиметрового диапазона длин волн для изучения газодинамических процессов. Труды международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». 14-18 марта 2005. Саров – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005, с. 649-654
5. Родионов А.В., Бельский В.М., Богданов Е.Н. и др. Труды международной конференции «XI Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009, с. 69-73
6. Павловский М.Н., Комиссаров В.В. Особенности фазового превращения висмута в волне разрежения. ЖЭТФ, 1982, т.83, №6(12), с. 2146-2151



7. Павловский М.Н., Комиссаров В.В. Полиморфные превращения олова в ударных волнах сжатия и разгрузки. ЖЭТФ, 1990, т. 98, №5(11), с. 1748-1751
8. Бельский В.М., Комиссаров В.В. Инициирование пластифицированного октогена тремя ударными волнами. Труды международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005 г., с. 148-151
9. LASL Shock Hugoniot Data. Marsh S.P. U. California Press: Berkeley 1980, 658 с.
10. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Под ред. Р.Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, 531 с.

## ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ТИТАНА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

*М.В. Жерноклетов, О.Н. Апрельков, А.Е. Ковалев, М.Г. Новиков, Л.И. Канунова,  
Д.Н. Замотаев, А.Н. Малышев, Е.В. Кошатов, Д.В. Крючков, А.М. Ивин, В.И. Скоков,  
А.М. Подурец, М.И. Ткаченко, С.Н. Уланов, С.И. Кирианов, А.Б. Межевов*

Титан – один из важнейших конструкционных металлических материалов, который относится к переходным металлам с недостроенной d-оболочкой. Титан существует в двух полиморфных модификациях:  $\alpha$ -Ti при температурах  $<882^{\circ}\text{C}$ ,  $\beta$ -Ti при температуре  $>882^{\circ}\text{C}$ . На рисунке 1 представлена фазовая диаграмма титана [1].

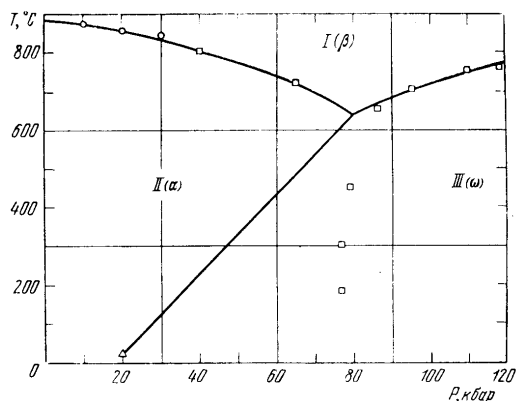


Рисунок 1. Фазовая диаграмма титана

Исследования фазового ( $\alpha$ - $\omega$ ) перехода показали, что существует значительное расхождение в измеренных значениях величины давления начала перехода: от 2 до 9 ГПа (для статики) и от 6 до 12 ГПа (в ударных волнах) [2],[3],[4],[5],[6],[7]. Давления завершения фазового перехода при динамическом сжатии варьируются от  $\approx 17,5$  до 22 ГПа. Необычным является большое расхождение в значениях давления фазовых переходов в статике и динамике, полученных разными методами. Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических данных, природа фазовых ударноволновых переходов в титане полностью не изучена [8]. Такой разброс объясняется разной постановкой экспериментов, технологией изготовления титана, сильным влиянием на параметры перехода исходной микроструктуры образцов. О.Н. Бреусов [9] связывал эти различия с зависимостью гистерезиса фазовых превращений от времени приложения нагрузки.

В 2008 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ ИФВ выполнена серия экспериментов по измерению профилей давления в технически чистом титане марки ВТ1-0 ( $\rho=4,500 \text{ г/см}^3$ , содержание титана 99,3 вес.%)