

НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО УДАРНО–ВОЛНОВЫМ
СВОЙСТВАМ КВАРЦИТА, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ НИЗКООМНЫХ
МАНГАНИНОВЫХ ДАТЧИКОВ В ДИАПАЗОНЕ 20 – 50 ГПА
А.Ю. Гармашев, Е.Б. Смирнов, Д.Т. Юсупов, К.С. Сидоров, М.А. Шестириков,
А.И. Клёнов, Е.А. Петухов

Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина
(ФГУП РФЯЦ–ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина)

Представлены постановка и результаты ударно-волновых экспериментов с регистрацией профилей волн продольных напряжений σ_{xx} в кварците при начальной плотности $\rho_0 = 2,63 \text{ г/см}^3$. Измерения профилей волн напряжений выполнены в диапазоне 20 – 50 ГПа с помощью симметричного удара методом догоняющей или встречной волны разгрузки в плоских образцах с использованием встроенных в кварцит манганиновых датчиков.

Работа выполнена с целью получения экспериментальных данных по ударно-волновым свойствам горных пород, в частности кварцита, необходимых для калибровки, развития и совершенствования расчётных моделей.

Задача: получение профилей продольных напряжений σ_{xx} в образцах кварцита первоуральского месторождения с использованием методики низкоомных манганиновых датчиков.

Эксперименты выполнены с использованием взрывных плоско-волновых генераторов и двухступенчатой легкогазовой пушки.

В результате серии экспериментов получены экспериментальные данные в диапазоне давлений 20 – 50 ГПа по зависимостям продольных напряжений от времени и по упругому предвестнику.

Введение

Работа посвящена экспериментальному исследованию ударно-волновых свойств горной породы – кварцита. Объектом исследований был выбран природный монолитный поликристаллический α -кварц (кварцит), являющийся метаморфическим образованием – определяющей составляющей кремниевых горных пород мантии Земли. Кварцит образовался путём метаморфизма песчаников [1]. Типичные кварциты состоят почти полностью из кварца, однако в них иногда присутствует примесь слюды, полевого шпата и железистых минералов. Структура кварцита равномерно зернистая. Зёрна плотно упакованы и прочно сцеплены между собой. Объёмный вес обычно составляет 2,50–2,70 г/см³, прочность на сжатие в среднем 2000-2500 кгс/см², водопоглощение 0,01-0,2% [2].

Кроме вопросов геофизики, большой интерес к кварцу обусловлен его необычным поведением при воздействии ударных волн [3, 4], также в значительной степени это связано с потребностью в информации, необходимой для расчёта действия мощных подземных взрывов, метеоритных ударов, взрывной стимуляции нефтеносных пластов, решения других прикладных задач.

К особенностям поведения кварцита в условиях ударного сжатия можно отнести, например такие, как высокий динамический предел упругости, релаксирующий упругий предвестник, катастрофическую потерю прочности за фронтом ударной волны, отсутствие раздвоения пластической волны, характерного для фазовых превращений ряда веществ в ударных волнах, аномальная протяженность (по давлению) области смеси фаз, близость точек ударной адиабаты α -кварца к критическому волновому лучу, проходящему через точку ее излома, неравновесность состояний в области смеси фаз, возможная незавершенность фазового превращения и на крутой ветви ударной адиабаты кварца, возможное продолжение фазового превращения α -кварца в стишовит в волне разгрузки, резкое отличие сжимаемости сплошного кварца от сжимаемости пористого кварца и кварца в смесевых образцах, возможность превращения кварца в фазы с координационными числами 8 и 12 [4]. И это ещё не полный перечень особенностей, не исключено также существование невыясненных вопросов в поведении кварца.

Поскольку за последние годы произошла смена поколений как измерительной техники, так и «человеческого фактора», была актуализирована задача по верификации прежних экспериментальных данных и новых, полученных на основе современных технологий регистрации и, отличных от прежних, подходов к технологии построения и изготовления экспериментальных узлов с элементами know how.

Таким образом, цель данной работы: получение экспериментальных данных по ударно-волновым свойствам горных пород, в частности кварцита.

Задача работы: получение профилей продольных напряжений σ_{xx} в образцах кварцита Первоуральского месторождения с использованием методики низкоомных манганиновых датчиков [5, 6].

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения современных экспериментальных данных, с использованием которых будут совершенствоваться прежние и разрабатываться новые теоретические модели поведения горных пород в условиях ударного сжатия.

Для получения профилей σ_{xx} обычно используют метод удара пластины по исследуемому образцу [7]. В данной работе экспериментальные ударно-волновые исследования кварцита выполнены с помощью удара пластины заданной толщины и разогнанной до определённой скорости. Разгон пластин производился с помощью продуктов взрыва взрывных метательных устройств, а также – двухступенчатой легкогазовой пушки (ЛГП). Для регистрации процессов применена методика низкоомных манганиновых датчиков (МД), используемая чаще всего для определения продольной и объёмной скоростей звука, а также других параметров упругого поведения различных конструкционных материалов [8, 9].

1 Экспериментальная методика получения данных

С помощью манганинового датчика может быть непосредственно определена зависимость механического напряжения $\sigma_{xx}(t)$ (давления $P(t)$) от ударной волны в образце-мишени при воздействии на неё пластины – ударника. Начальное сопротивление датчика составило ≈ 20 мОм. Датчик «вморожен» в исследуемый образец. Сопротивление МД зависит от механического напряжения, приложенного к нему и соответственно к образцу. В экспериментах проводится регистрация аналогового сигнала с МД – профиля электрического напряжения $U(t)$, которое с использованием градуировочной зависимости манганина [6] пересчитывается в профиль $\sigma_{xx}(t)$. Этот профиль может использоваться для расчета не только параметров первого ударного скачка, но и состояния за фронтом, в том числе в волнах разгрузки и повторного нагружения.

Современные системы регистрации имеют разрешение, позволяющее исследовать тонкую структуру импульса нагружения-разгрузки, в том числе структуру фронта ударной волны. Верхний предел применения манганинового датчика по давлению обычно ограничивается потерей диэлектрических свойств его изоляции при значительных ударных давлениях и составляет 30-40 ГПа, хотя существуют особые случаи измерений ~ 90 ГПа [10].

2 Постановка и результаты экспериментов

Для создания импульса давления с помощью летящей пластины – ударника в образцах использовались типовые ударно-волновые нагружающие устройства взрывного типа (ВНУ), схема которых представлена на рисунке 1 и двухступенчатая легкогазовая пушка (ЛГП), разгоняющая метаемый объект с ударником. Схема метаемого объекта и мишени для ЛГП показана на рисунке 2.

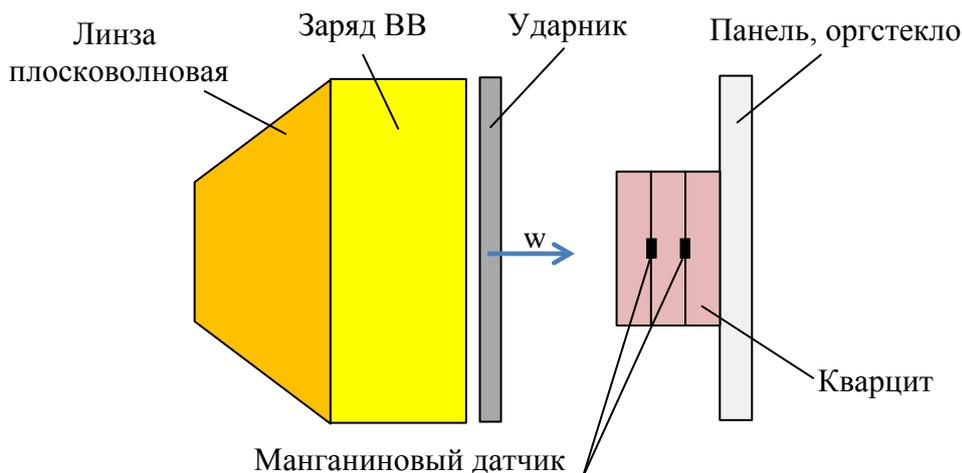


Рисунок 1 – Схема типового ударно-волнового нагружающего устройства взрывного типа.

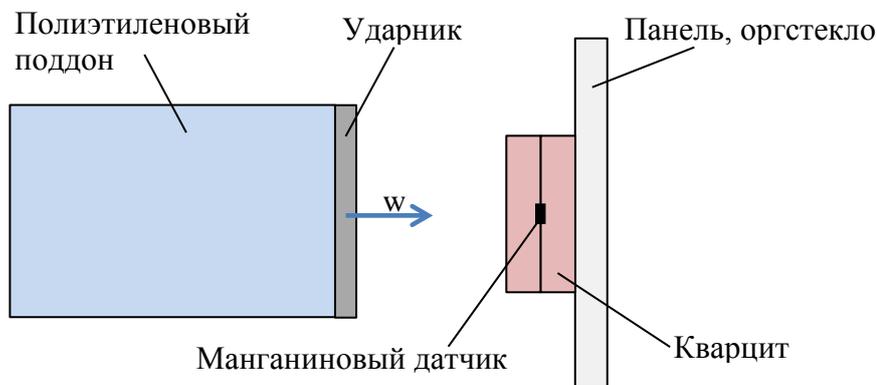


Рисунок 2 – Схема метаемого объекта с установленным в нём ударником и приёмного узла с образцом.

Данные по постановке ударно-волновых экспериментов приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Данные по постановке ударно-волновых экспериментов кварцитом.

№ опыта	Материал ударника	Толщина ударника [мм]	$\sigma_{расч.}$, [ГПа]	$v_{расч.}$, [км/с]	Толщина образца h1+h2+h3 [мм]	Примечание
974	АМц	8	29,74	3,56	4+20	ВНУ
981		8	34,10	3,95	4+4+8	
982		8	40,86	4,47	4+4+8	
979	12X18H10T	4	43,91	3,60	6+8	
980		4	48,58	3,90	6+8	
977		6	27,79	2,35	4+20	ЛПП

Для исследований применялись два вида материала ударников АМц и нержавеющая сталь 12X18H10T. Толщина ударников варьировалась от 4 до 8 мм. Образец состоял из двух или трёх частей – дисков, между которыми располагались манганиновые датчики – 1 или 2 шт. Применение двух МД позволяет определить скорость распространения ударной волны D в кварците. Результаты экспериментов в виде волновых профилей получены в полном объёме. На всех регистрограммах зависимости $\sigma_{xx}(t)$ хорошо видно влияние так называемой ударно-волновой поляризации кварцита, выражающейся в наличии «шума» на полезном сигнале. «Шум» начинается в момент удара пластины по образцу. На рисунке 3 показан типичный сигнал, зарегистрированный от низкоомного МД в кварците.

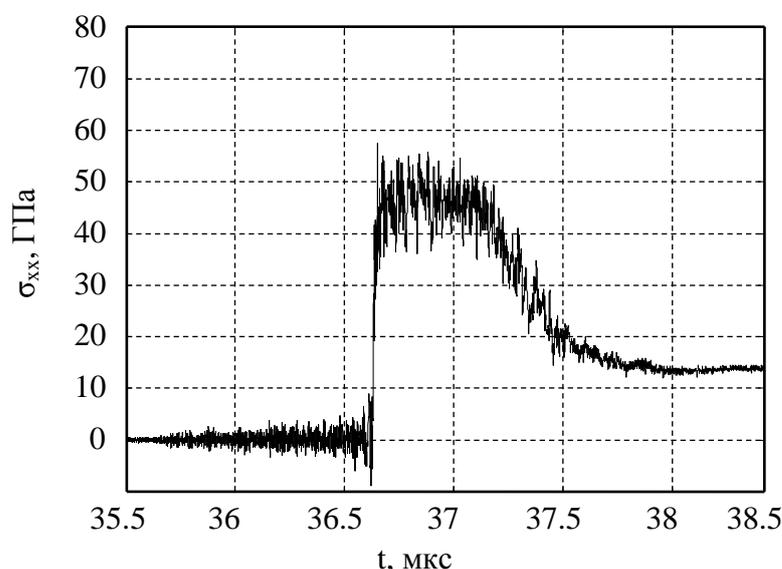


Рисунок 3 – Типовой сигнал, зарегистрированный с низкоомного МД в кварците.

При обработке сигналов частичное или полное устранение шума поляризации может быть достигнуто цифровой фильтрацией сигнала.

Простейшим математическим фильтром, использованным в данной работе, является «бегущее среднее»:

$$\bar{f}_i = \frac{1}{2N+1} \sum_{j=i-N}^{i+N} f_j.$$

К недостаткам фильтрации можно отнести растяжение фронтов на половину длины фильтра (на n - дискретов времени), что, в частности, может приводить к дополнительной погрешности в определении времени начала фронта.

На рисунке 4 показаны зависимости $\sigma_{xx}(t)$ для всех шести ударно-волновых экспериментов. Отсчёт времени от момента подрыва заряда ВВ. для эксперимента с ЛГП – от срабатывания пусковых электроконтактных датчиков.

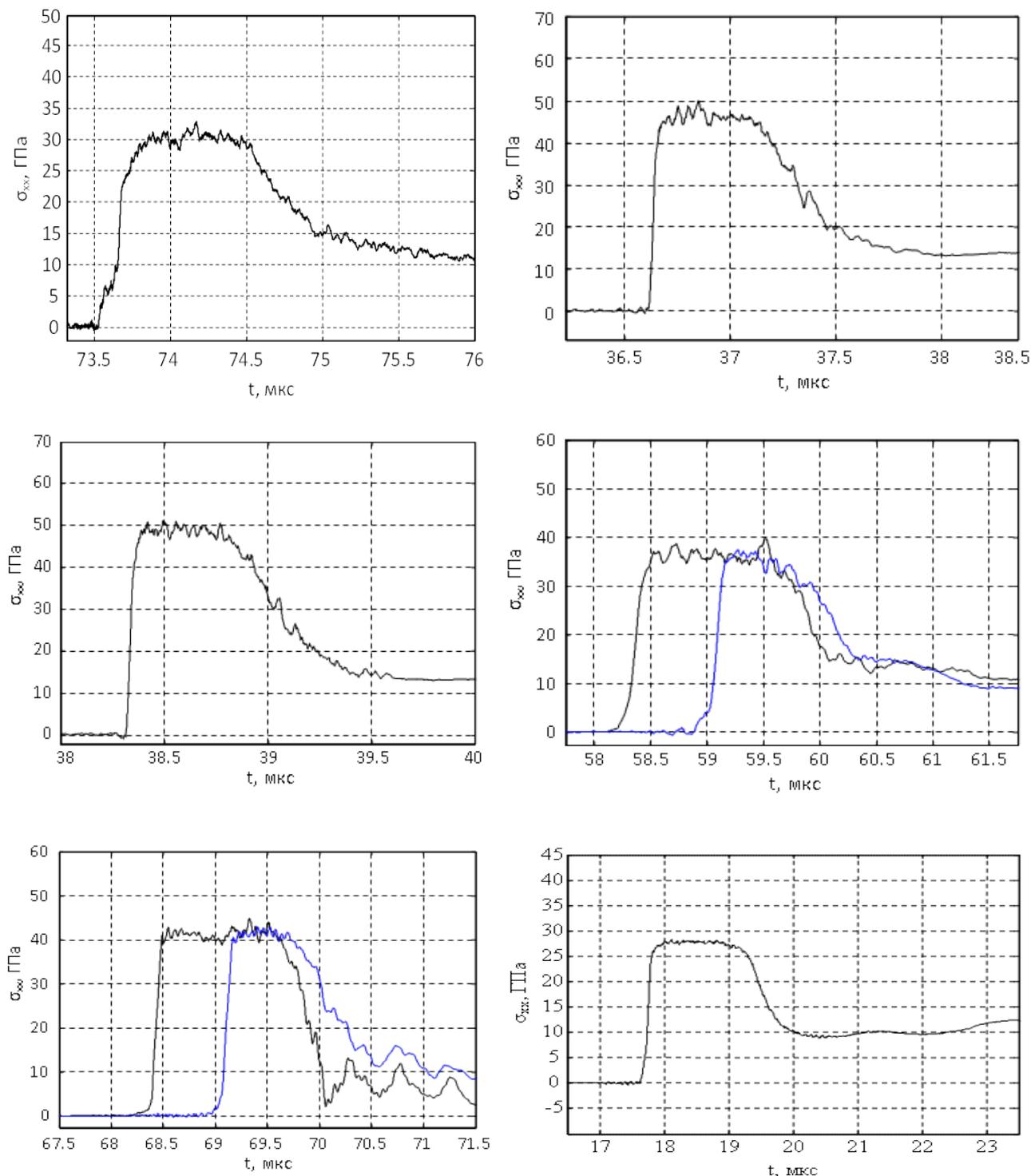


Рисунок 4 – Экспериментальные профили $\sigma_{xx}(t)$.

В одномерном случае законы сохранения массы и импульса связывают между собой четыре параметра (ρ , P , U , D) фронта ударной волны следующими соотношениями:

$$\rho / \rho_0 = D / (D - U);$$

$$P = \rho_0 U D,$$

где ρ , P - плотность и давление за фронтом ударной волны;

D – скорость распространения ударной волны;

U – скачок массовой скорости, равный скорости движения сжатого вещества относительно невозмущенного;

ρ_0 – плотность перед фронтом ударной волны.

В таблице 2 представлены основные экспериментальные результаты – параметры точек ударной адиабаты кварцита.

Таблица 2 – Параметры точек ударной адиабаты кварцита

№ опыта	$P_{\text{экс.}}$, ГПа	$W_{\text{экс.}}$, [кМ/с]	U , км/с	D , км/с	ρ_0 , г/см ³	ρ , г/см ³	$k\sigma$
974	30,0	3,35	1,85	6,16	2,65	3,79	1,430
981	36,7	4,01	2,25	5,56*/6,17	2,63	4,14	1,574
982	41,5	4,39	2,46	5,92*/6,38	2,64	4,30	1,627
979	47,0	3,65	2,65	6,70	2,62	4,33	1,653
980	49,0	3,73	2,42	6,82	2,63	4,37	1,663
977	27,8	2,41	1,71	6,15	2,65	3,67	1,385

* – экспериментальные значения скорости ударной волны D , определённые по разновременности фронтов профилей $\sigma_{xx}(t)$.

При обработке использованы следующие D - U соотношения:

– кварцит [11] $D=6,098+0,032 \times u$; $0 < u < 2,4$ и $D=2,220+1,692 \times u$; $2,4 < u < 4,5$;

– алюминий [12] $D=5,333+1,356 \times u$; $0 < u < 6,1$;

– сталь 12X18H10T [12] $D=4,599+1,388 \times u+0,032 \times u^2$; $0 < u < 2,75$.

Для того чтобы получить истинную экспериментальную D , полученную по профилям в экспериментах № 981 и № 982, необходимо провести более подробную обработку профилей $\sigma_{xx}(t)$ с учётом влияния упругого предвестника, амплитуда которого составила в данных экспериментах 6-7 ГПа.

3 Об эффекте ударно-волновой поляризации

Некоторые исследователи интерпретируют ударно-волновую поляризацию как движущуюся границу разведённых зарядов [13], приводящую, в конечном счете, к возникновению электрических сигналов, регистрируемых в частности манганиновыми датчиками, при этом авторы не анализируют природу данного явления.

На наш взгляд необходимо уточнить механизм возникновения поляризационного сигнала на МД применительно к кварциту. Следует отметить, что кварцит относится к материалам, обладающим эффектом пьезополяризации. Появление поляризации в диэлектрике под действием механических напряжений называется пьезоэффектом. В состоянии покоя в пьезополяризация в таких диэлектриках отсутствует.

При прохождении ударной волны через материал мишени в результате деформации кристаллов образуется поляризационная волна. Механические напряжения в кристаллах кварцита в нашем случае возникают не только от воздействия ударной волны, но и от воздействия сильного магнитного поля, вызванного протеканием электрического тока через МД (≈ 40 А), взаимодействующего со связанными заряженными частицами кварцита, в результате чего возникает начальный дипольный момент. Проходящая сквозь поликристаллический образец ударная волна приводит расположенные в нём элементарные ячейки к деформациям сжатия-расширения, что в свою очередь вызывает суперпозицию составляющих дипольного момента, вызванного магнитным полем и деформацией. В результате возникают электромагнитные волны высокой частоты. Манганиновый датчик выступает в качестве приёмной антенны с предельной частотой

порядка 30 ГГц. Результат изменения дипольного момента в ударной волне отражается на зарегистрированных осциллограммах в виде модуляции полезного сигнала. Такой механизм возникновения сигнала поляризации на МД косвенно подтверждается в работе [14]. При измерениях проводимости гранита в ударной волне, обладающего мощным пьезоэлектрическим эффектом, при отсутствии внешнего магнитного поля и соответственно начальной деформации ячеек, несмотря на наличие сильного электрического поля, ударно-волновая поляризация не проявлялась, что говорит не в пользу результатов, полученных в работе [13], либо авторы не имели возможности использовать в экспериментах регистраторы с достаточным временным разрешением.

На самом деле характер протекания поляризационных процессов в кварците имеет более сложную природу и определяется как суперпозиция различных видов поляризаций [15] таких, например как, спонтанной, вызванной фазовыми переходами, электронно-релаксационной (дефекты), ионно-релаксационной, упруго-дипольной и других.

Изучение ударно-волновой поляризации горных пород требует отдельного изучения и с большой вероятностью будет продолжено в дальнейшей работе.

Заключение

В результате проделанной работы получены результаты ударно-волновых экспериментов с регистрацией профилей волн продольных напряжений σ_{xx} в кварците диапазоне 20 – 50 ГПа с помощью симметричного удара методом догоняющей или встречной волны разгрузки в плоских образцах с использованием встроенных в кварцит манганиновых датчиков. Эксперименты выполнены с использованием взрывных плоско-волновых генераторов и двухступенчатой легкогазовой пушки. В работе представлен краткий анализ эффекта ударно-волновой поляризации кварцита.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Справочник физических констант горных пород. Ред. Г.Д. Афанасьев, Б.П. Беликов, М.П. Воларович. Науки о Земле т. 21, М., «Мир», 1969, – 544 с.
- 2 М.П. Лысенко Состав и физико-механические свойства грунтов, М., «Недра», 1972, – 320 с.
- 3 Е.Н. Аврорин, Б.К. Водолага, Л.П. Волков Ударная сжимаемость свинца, кварцита, алюминия, воды при давлении ~100 Мбар, Письма в ЖЭТФ, 1980, Т.3, № 12, – с. 727-729.
- 4 Ю.Н. Жугин, К.К. Крупников и др. О некоторых особенностях динамической сжимаемости кварца. Физика Земли. № 10, 1994, – с. 16-22.
- 5 Г.И. Каннель, Г.Г. Вахитова, А.Н. Дрёмин. Метрологические характеристики манганиновых датчиков при ударном сжатии и разгрузке. ФГВ, 1978, № 2, с.130-135.
- 6 В.В. Шапошников. Электрические методы и средства регистрации процессов при исследовании характеристик взрывчатых веществ. Снежинск: ВГУП РФЯЦ ВНИИТФ, 2011, – 198 с.
- 7 Е.И. Забабахин. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск, 1997, 203 л.
- 8 V.T. Zaikin, A.O. Borshchevsky, O.V. Tkachev. SHOCK-WAVE PROPERTIES OF THE "Виксинт К-18" COMPOUND", International conference "New models and hydro codes for shock wave processes in condensed matter- SWCM-2008", Portugal, Lisbon, 18-23 May 2008.
- 9 V.G. Vildanov, V.M. Slobodenyukov, A.O. Borshchevsky, S.V. Zverev, O.V. Tkachev., Sound Velocity in Shock-Compressed Steel 12Cr18Ni10Ti, in Proceedings of China-Russia Workshop on Shock Wave and Detonation Physics 2005, Mianyang, China, July 9-15, 2005.
- 10 Д.Т. Юсупов, К.С. Сидоров, В.Г. Вильданов, В.М. Слободенюков, А.О. Борщевский, О.В. Ткачёв. Экспериментальное определение скорости звука в волне разгрузки в нержавеющей стали 12X18H10T в диапазоне продольных напряжений 10-88 ГПа. Доклад на международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН, 21-25 мая 2018 г.

- 11 Stanley P. Marsh, LASL shock Hugoniot data. Vol. 1, University of California press, p. 364.
- 12 Р.Ф. Трунин, Л.Ф. Гударенко, М.В. Жерноклетов, Г.В. Симаков, Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, 531 с.
- 13 А.И. Гончаров, С.П. Соловьёв. Ударная электрическая поляризация материалов. Физика горения и взрыва. 2004, т. 40, № 2.
- 14 М.М. Горшков, В.Т. Заикин, С.В. Лобачев. Об электропроводности горных пород при ударном сжатии. Прикладная механика и техническая физика. 2001, т. 42, № 2.
- 15 Ю.М. Поплавко, Л.П. Переверзева, И.П. Раевский. Физика активных диэлектриков. Ред. В.П. Сахненко, Ростов н/Д, изд-во ЮФУ, 2009, – 480 с.