

# **ДВУХСТУПЕНЧАТАЯ ЛЕГКОГАЗОВАЯ ПУШКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССАХ**

А.Ю. Гармашев, А.И. Клёнов, Е.Б. Смирнов, Д.Т. Юсупов

Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия, e-mail: [vniitf@vniitf.ru](mailto:vniitf@vniitf.ru)

Изучение динамических свойств конструкционных материалов является одним из основных направлений развития современной науки и техники. Начиная с середины прошлого века и по сегодняшний день главным инструментом для исследования динамических свойств конструкционных материалов, являются ударные волны. Применение ударной волны в качестве инструмента исследования позволяет изучать сжимаемость конструкционных материалов, обнаруживать фазовые превращения и исследовать ряд других явлений, происходящих в области высоких давлений и температур.

В качестве систем ударно-волнового нагружения, как правило, используются взрывные ударно-волновые генераторы и легкогазовые пушки. Бесспорным преимуществом легкогазовых пушек является возможность плавной регулировки скорости соударения, обеспечение минимального и контролируемого в каждом опыте перекоса ударника относительно плоскости образца, высокая однородность области одномерного течения за фронтом ударной волны в исследуемом образце. Для измерения ударной сжимаемости важно также, что ударник в процессе разгона в легкогазовых ускорителях практически не претерпевает разогрева.

В работе приводится описание конструкции двухступенчатой легкогазовой пушки, предназначенной для исследования свойств ударно-сжатых материалов. Технические решения, заложенные в конструкцию пушки, опробованы в ходе испытаний.

Приведены первые результаты нагружения образцов, полученные с использованием электроконтактных и пьезорезистивных датчиков.

Изучение динамических свойств конструкционных материалов является одним из основных направлений развития современной науки и техники. Начиная с середины прошлого века и по сегодняшний день, главным инструментом, для исследования динамических свойств конструкционных материалов, являются ударные волны.

Применение ударной волны в качестве инструмента исследования позволяет изучать сжимаемость, фазовые превращения и ряд других явлений, происходящих в области высоких давлений и температур. В качестве систем ударно-волнового нагружения используются, как правило, взрывные нагружающие устройства (ВНУ и легкогазовые пушки) [1, 2].

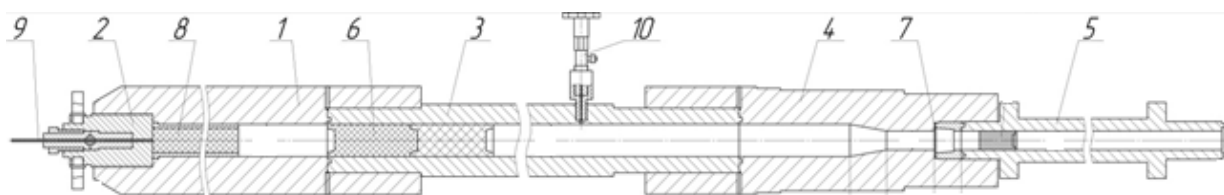
Преимуществом легкогазовых пушек по сравнению с ВНУ является возможность плавного разгона ударника, материал которого, вплоть до момента соударения не претерпевает структурных, прочностных и др. не одномерных изменений. Для определения свойств ударной сжимаемости материалов важно также, что ударник из исследуемого материала в процессе разгона в легкогазовых ускорителях практически не претерпевает разогрева, что также реализуется в ЛГП.

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИТФ выполнены работы по созданию двухступенчатой легкогазовой пушки.

Цель настоящей работы – внедрение двухступенчатой ЛГП в практику газодинамических исследований конструкционных материалов.

Задача – представить первые результаты исследований, полученные с помощью двухступенчатой ЛГП в РФЯЦ ВНИИТФ.

На рисунке 1 показана схема ЛГП, применяемой для исследования конструкционных материалов. Сжатие легкого газа выполнялось двухсекционным полиэтиленовым поршнем массой 2,2 кг. Масса метаемого объекта из полиэтилена  $\approx 0,2$  кг.



1 – камера зарядная; 2 – затвор; 3 – поршневой ствол; 4 – форкамора; 5 – баллистический ствол;  
6 – поршень; 7 – мембрана; 8 – пороховой заряд; 9 – ДШ; 10 – вентиль

Рисунок 1 – Конструктивная схема ЛГП.

Первые ударно-волновые эксперименты на ЛГП, проведенные в рамках данной работы с эталонными материалами, подтвердили преимущества пушек по сравнению с ВНУ. Были получены экспериментальные профили  $\sigma_{xx}(t)$  в образце из мрамора при ударе по нему ударника из стали 12X18H10T. Экспериментальный узел с мрамором представлен на рисунке 2. Схема метаемого объекта с ударником – на рисунке 3.

Полученные, по типовой методике [3, 4] профили продольных напряжений в материале мишени (мраморе)  $\sigma_{xx}(t)$  свидетельствуют о состоянии ударника при подлете к

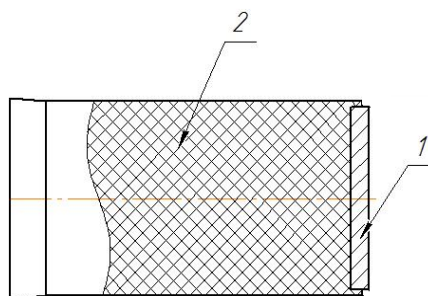
мишени и удару по ней. Перекос ударника на диаметре 40 мм по результатам регистрации манганиновыми датчиками (МД) составил не более  $0,38^\circ$ , при этом среднее значение продольного напряжения – 39,2 ГПа – рисунок 4.



Схема экспериментального узла

1 – образец (мрамор);  
2 – манганиновые датчики; 3 – ЭКД; 4 – кольцо (орг. стекло).

Рисунок 2 – Схема и виды экспериментального узла для МД-диагностики.



1 – ударник, 2 – поддон

Рисунок 3 – Схема метаемого объекта.

Одно из основных преимуществ ЛПП, заключается в том, что в отличие от ВНУ, волновые профили в эксперименте с МД не были отягощены электрическими помехами и наводками, характерными для взрывных нагружающих устройств, при подрыве которых имеет место распространяющийся в веществе и пространстве ионизированный фронт (рисунок 4).

На профиле  $\sigma_{xx}(t)$  отсутствовали и типичные наводки отрицательной полярности перед фронтом импульса, обычно сопровождающие профили при использовании взрывных нагружающих устройств, вызванные, как правило, фазовым переходом в материале ударника и изменением его магнитных свойств, влияющих на магнитное поле датчика.

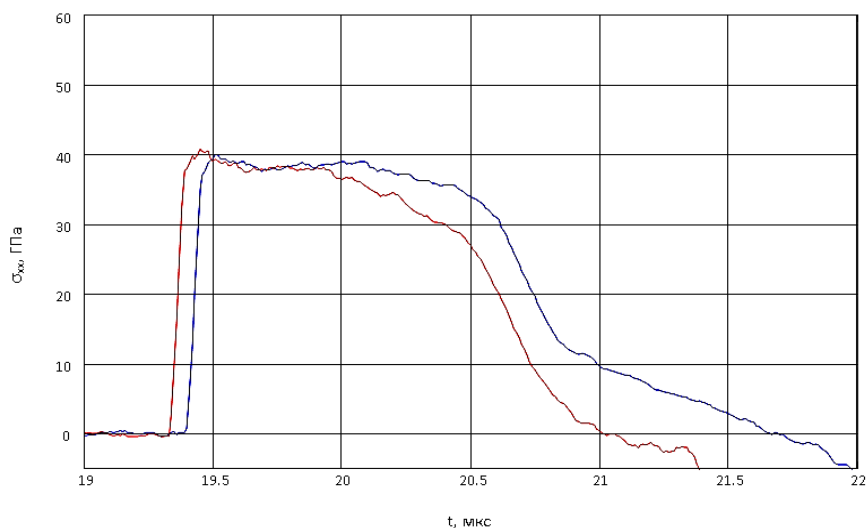


Рисунок 4 – Профиль УВ в образце из мрамора.

В другом эксперименте с помощью электроконтактных датчиков (ЭКД) была измерена подлётная скорость ударника и его перекус на момент соударения с мишенью. Перекус ударника на диаметре 30 мм по результатам ЭКД-регистрации составил не более  $0,13^\circ$ . Экспериментальный узел с ЭКД показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – ЛГП с экспериментальным ЭКД-узлом.

Используя известные D-u соотношения [4] для эталонных материалов по экспериментальным данным методом P-u-диаграмм [5] были получены характеристики ударной сжимаемости мрамора, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные по ударной сжимаемости мрамора.

№ опыта	$u$ , [км/с]	$D$ , [км/с]	$\rho/\rho_0$	$\sigma_{xx}$ , [ГПа]
1	$2,21 \pm 0,07$	$6,97 \pm 0,09$	1,462	$39,2 \pm 1,9$
2	$2,68 \pm 0,07$	$7,64 \pm 0,09$	1,537	$54 \pm 2,7$

где:  $u$  – скорость вещества (массовая скорость);

$D$  – скорость ударной волны в материале;

$\rho/\rho_0$  – ударное сжатие – отношение плотности вещества за фронтом ударной волны к начальной плотности;

$\sigma_{xx}$  – продольное напряжение.

Результаты, представленные в таблице 3, показаны на графиках в координатах  $D(u)$  и  $\sigma_{xx}(\rho/\rho_0)$  на рисунке 6. Видно хорошее согласие ранее полученных экспериментальных и расчётных результатов с данными настоящей работы.

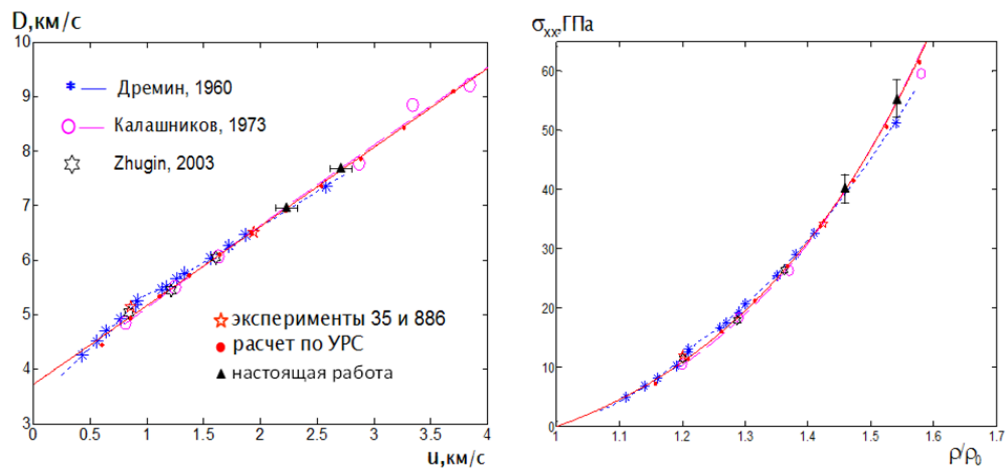


Рисунок 6 – Результаты по ударной сжимаемости в  $D(u)$  и  $\sigma_{xx}(\rho/\rho_0)$  координатах.

Следующий эксперимент на ЛГП выполнен также с разгоном ударника из 12X18H10T  $\varnothing 45 \times 6$  мм (в составе метаемого объекта) с ударом по мишенному блоку из кварцита. В качестве нагружаемого образца был использован кварцит Первоуральского месторождения. Эксперимент выполнен с регистрацией по совмещённой методике МЭК: манганиновый датчик (МД) и электроконтактные датчики (ЭКД). С помощью МД зарегистрирован профиль продольного напряжения  $\sigma_{xx}(t)$  на глубине 4 мм в образце при торможении на нём толстого ударника, поджимаемого снарядом из полиэтилена. Подлётная скорость метаемого объекта (МО) и ударника в его составе определена с помощью четырёх пар ЭКД.

Следует отметить, что разгон 6 мм ударника без нарушения его целостности с помощью взрывных нагружающих устройств, практически не возможен.

Использованная в экспериментах ЛГП, с установленным мишенным узлом показана на рисунке 7.



Рисунок 7 – ЛГП на рельсовых направляющих.

Сигнал МД зарегистрированный цифровым осциллографом в первичном виде представлен на рисунке 8.

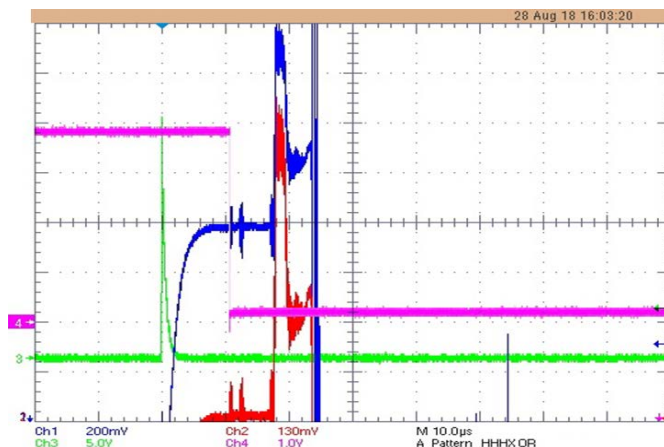


Рисунок 8 – Первичная регистраграмма сигнала с МД и импульсов синхронизации.

На рисунке 9 показан сигнал с МД после начальной обработки в виде  $U(t)$ . Рабочий импульс пересчитан в профиль  $\sigma_{xx}(t)$  – рисунок 10. В сигнале (профиле) присутствует высокочастотная составляющая – шум. Шум вызван ударно-волновой поляризацией материала мишени и характерен для пьезоматериалов, к которым относится кварцит.

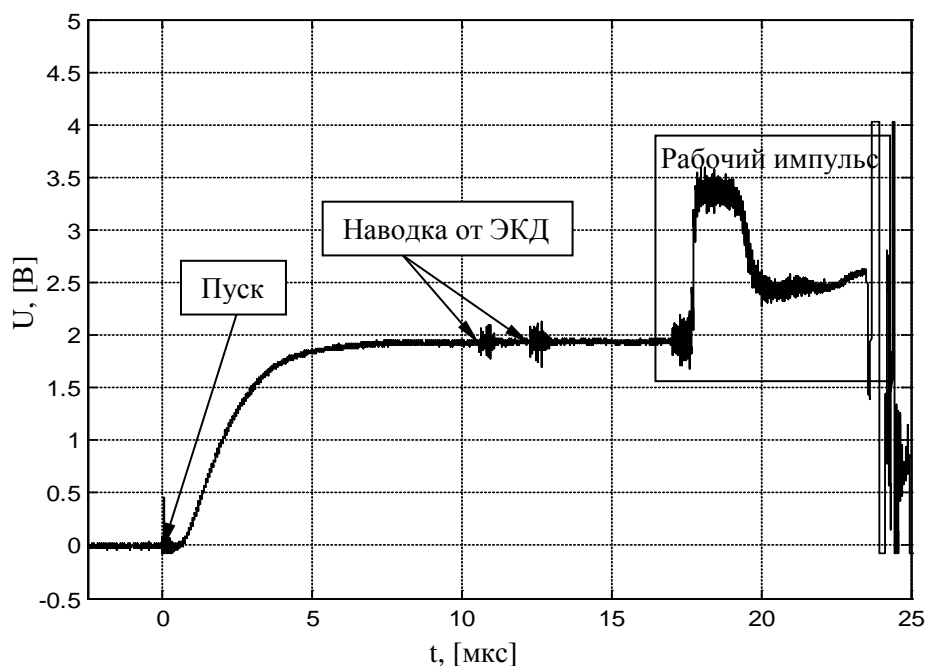


Рисунок 9 – общий вид импульса МД

Время жизни МД составило не менее 6 мкс, что соответствует предварительным расчетным оценкам, вымолненным с учётом прихода волны разгрузки к выводам манганинового датчика, находящимся в воздухе. Амплитуда волны сжатия – 27,9 ГПа, амплитуда упругого предвестника – 7,5 ГПа.

Также выполнены измерения скорости МО с помощью электроконтактных датчиков рисунок 11. Значения  $U$  показаны с коэффициентом деления 3,16 (10 дБ). Моменты времени замыкания ЭКД  $t_1$ ,  $t_2$  первого и второго уровней определялись в одинаковой манере по уровню 2 В, соответствующему  $\sim 0,1$  амплитуды импульса.

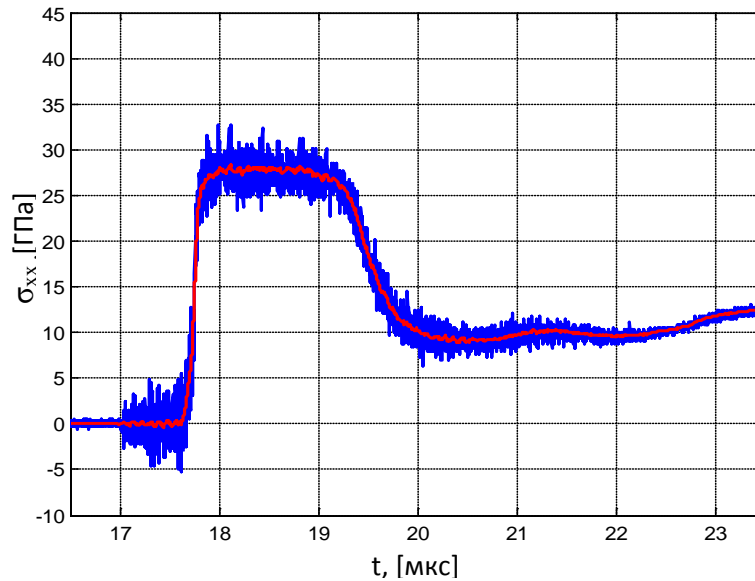


Рисунок 10 – Рабочий импульс МД

База измерений двух уровней датчиков была одинаковой и составила 4,00 мм. По отношению значения базы измерений к интервалу времени между датчиками определялось значение скорости метаемого объекта.

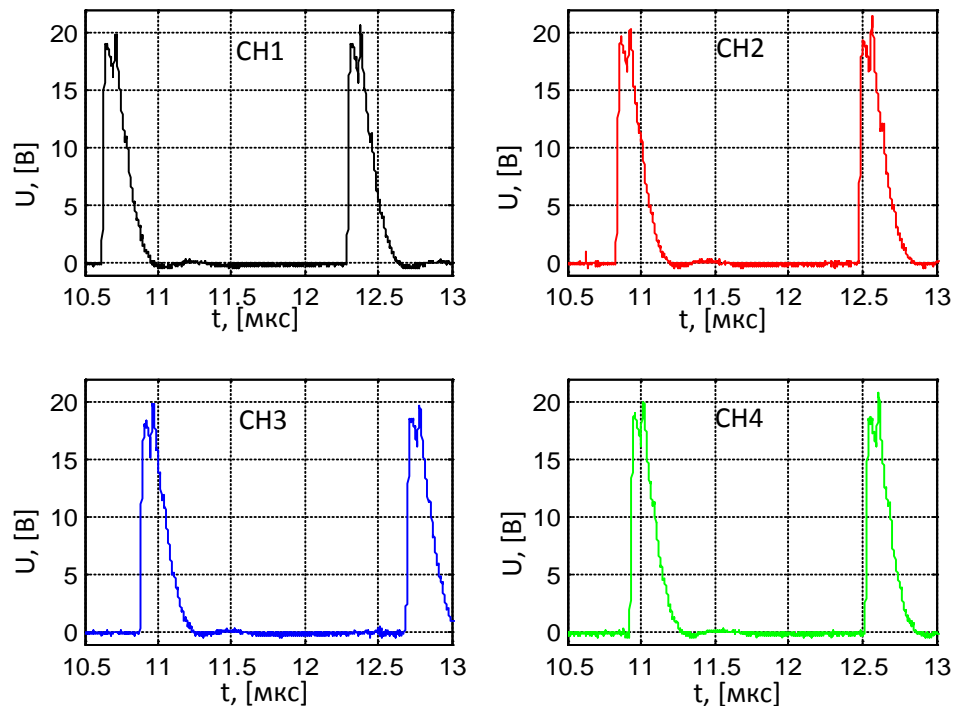


Рисунок 11 – Осциллограммы сигналов датчиков ЭКД.

Подлётная скорость метаемого объекта, полученная в данном эксперименте, составила  $2,408 \pm 0,146$  [км/с] при доверительной вероятности  $P=0,95$ .

Результаты эксперимента с кварцитом более подробно представлены в работе [5].

Таким образом, в настоящей работе приводится краткое описание конструкции ЛГП, предназначенной для исследования свойств ударно-сжатых конструкционных материалов, показаны некоторые особенности подготовки и проведения испытаний на данной установке.

В результате проделанной работы выполнены поставленные задачи и получены основные экспериментальные результаты:

– получены профили продольных напряжений  $\sigma_{xx}(t)$  в образцах из мрамора и кварцита при торможении на нём ударников из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

– проведена экспериментальная проверка технических решений по конструкции ЛГП.

Работа демонстрирует перспективные возможности применения ЛГП для изучения ударно-волновых свойств материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук М.В. Жерноклетова. – Саров: ВГУП ВНИИЭФ, 2003, – 403 с.
- 2 Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. ред. Н. А. Златин – М., Наука. 1974. – 344 с.
- 3 Г.И. Каннель, Г.Г. Вахитова, А.Н. Дрёмин. Метрологические характеристики манганиновых датчиков при ударном сжатии и разгрузке. ФГВ, 1978, № 2, – 130-135 с.
- 4 В.В. Шапошников. Электрические методы и средства регистрации процессов при исследовании характеристик взрывчатых веществ. Снежинск: РФЯЦ ВНИИТФ, 2011, – 198 с.
- 5 Е.И. Забабахин. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск, 1997, – 203 л.
- 6 А.Ю. Гармашев, Е.Б. Смирнов, Д.Т. Юсупов, К.С. Сидоров, М.А. Шистириков, А.И. Клёнов, Е.А. Петухов. Новые экспериментальные данные по ударно-волновым свойствам кварцита, полученные с помощью манганиновых датчиков в диапазоне 20–50 ГПа. Доклад на XIV международную конференцию «Забабахинские научные чтения», г. Снежинск 18-22 марта 2019 г.