

УДК 621.38

## СКОРОСТЬ ЗВУКА В ПРИРОДНОМ УДАРНО-СЖАТОМ УРАНЕ В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЯ 20 ÷ 260 ГПа

Д. Г. Панкратов, А. К. Якунин, А. Г. Попцов, Д. Т. Юсупов

РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, d.p.kuchko@vniitf.ru

Представлены результаты измерения скорости звука в природном уране при его высокоскоростной деформации в областях  $\alpha$ -,  $\gamma$ -фаз, а также в области плавления на фронте ударной волны. Регистрация процессов осуществлялась по методике манганинового датчика (диапазон 20 ÷ 110 ГПа) и индикаторной методике (диапазон 70 ÷ 260 ГПа). В области твердой фазы урана вдоль его ударной адиабаты определены изменения коэффициента Пуассона, модуля Юнга, модуля объемного сжатия и модуля сдвига.

Ключевые слова: природный уран, скорость звука, фазовый переход, ударно-волновое нагружение, методика манганинового датчика, индикаторная методика.

DOI 10.15372/FGV20210614

### ВВЕДЕНИЕ

Физико-механические свойства природного урана при статических и динамических воздействиях изучены достаточно подробно. Некоторые исследования динамических свойств урана, особенностей его ударной и изотермической сжимаемости, полиморфных и фазовых (плавление) переходов опубликованы в [1].

Для верификации современных упруговязкопластических моделей и многофазных уравнений состояния обедненного урана необходимы систематические экспериментальные данные по изменению продольной ( $c_l$ ) и объемной ( $c_b$ ) скоростей звука вдоль ударной адиабаты в широком диапазоне давления. Еще одна актуальная задача — уточнение условий плавления урана непосредственно во фронте ударной волны (УВ). Критерий оценки диапазона плавления — исчезновение отличий между  $c_l$  и  $c_b$  [2].

Фазовая диаграмма урана по данным [3] представлена на рис. 1. Из рисунка следует, что плавление урана во фронте УВ ожидается в диапазоне давления  $\approx 165 \div 190$  ГПа.

Цель работы — получение экспериментальных данных по продольной и объемной скоростям звука в диапазоне нагружения  $20 \leq \sigma_{xx} \leq 260$  ГПа, соответствующем высокоскоростному деформированию урана в твердом состоянии и его плавлению во фронте УВ.

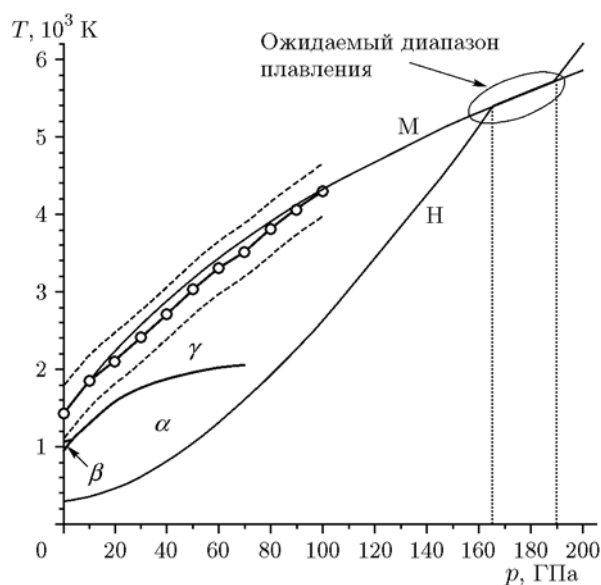


Рис. 1. Фазовая диаграмма урана:

M — кривая плавления (штриховые линии — границы погрешности), H — ударная адиабата,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — положение фазовых границ

### МАТЕРИАЛ, ОБРАЗЦЫ, УСЛОВИЯ ИХ НАГРУЖЕНИЯ, МЕТОДИКИ РЕГИСТРАЦИИ

Исследованы образцы нелегированного урана технической чистоты с содержанием основного вещества не менее 99.6 %. Плотность  $\rho_0 = 18.93$  г/см<sup>3</sup>, продольная и объемная скорости звука при нормальных условиях  $c_{l0} = 3.45$  км/с и  $c_{b0} = 2.43$  км/с [4]. Ударная

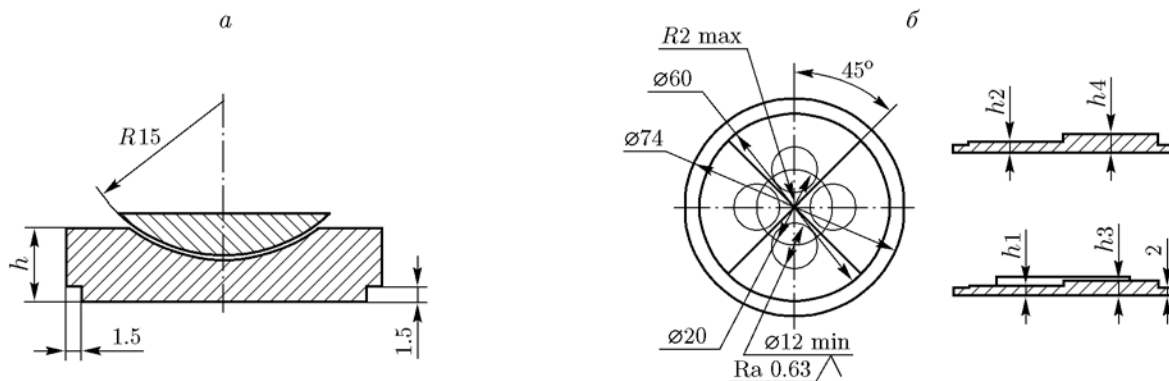


Рис. 2. Внешний вид образцов

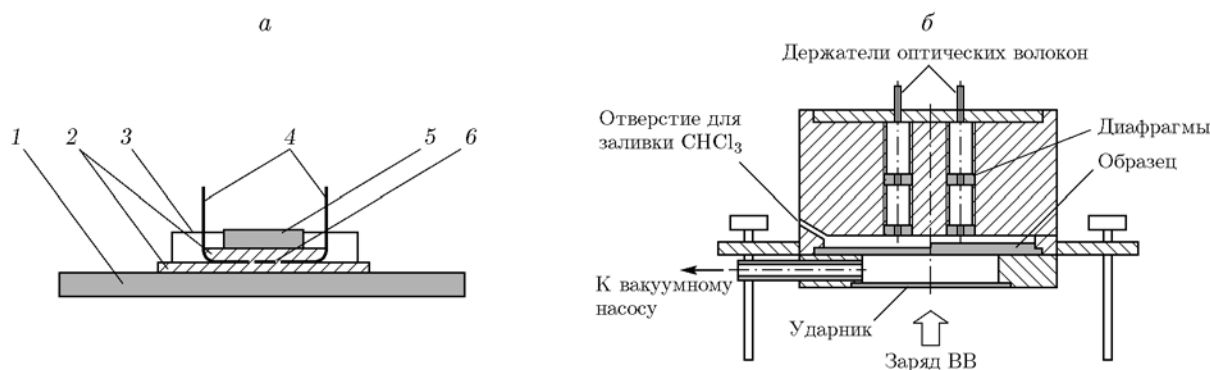


Рис. 3. Эскизы узлов (не в масштабе):

*a* — узел ММД: 1 — экран, 2 — уран, 3 — мрамор для защиты выводов датчика, 4 — выводы датчика, 5 — полиметилметакрилат, 6 — манганиновый датчик; *б* — узел ИМ

адиабата природного урана имеет вид  $D = 2.51 + 1.51u$  [4].

Для измерения скорости звука использовался известный метод догоняющей разгрузки [5]. Регистрация процессов выполнялась по двум методикам, широко применяемым при измерении скорости звука:

– в диапазоне  $20 \div 110$  ГПа — методика манганинового датчика (ММД) [6], основанная на изменении сопротивления чувствительного элемента в зависимости от приложенного к нему давления;

– в диапазоне  $70 \div 260$  ГПа — индикаторная методика (ИМ) [7], основанная на регистрации изменения интенсивности свечения фронта УВ в индикаторе, расположенном после исследуемых образцов.

Образцы ММД представляли собой составные диски  $\varnothing 30$  мм (рис. 2, *a*), образцы ИМ — диски  $\varnothing 74$  мм с четырьмя ступенями в виде секторов различной толщины  $h$  (рис. 2, *б*).

Образцы нагружались ударниками, разогнанными до определенных скоростей  $W$  зарядами взрывчатого вещества различной мощности и толщины. В качестве индикаторной жидкости в ИМ использовался хлороформ ( $\text{CHCl}_3$ ,  $\rho_0 = 1.483$  г/см<sup>3</sup>). Эскизы экспериментальных узлов показаны на рис. 3, а условия опытов приведены в таблице.

Регистрация свечения фронта УВ в индикаторе осуществлялась при помощи фотоприемников видимого диапазона ( $\Delta f = 500$  МГц), излучение передавалось по кварцевому оптоволокну с диаметром жилы 0.35 или 0.65 мм. Электрические сигналы с манганинового датчика (ММД) или фотоприемников (ИМ) регистрировались цифровыми осциллографами с полосой пропускания  $\Delta f = 500$  МГц.

Погрешность измерения скорости звука по данным авторов не превышает для ММД  $\pm 5\%$  ( $P = 0.95$ ), для ИМ —  $\pm 6\%$  ( $P = 0.95$ ).

## Условия экспериментов

Методика манганинового датчика					Индикаторная методика			
Ударник			Образец		Ударник		Образец	
Материал	$h$ , мм	$W$ , км/с	$h$ , мм	$\sigma_{xx}$ , ГПа	Материал	$W$ , км/с	$h_1-h_4$ , мм	$\sigma_{xx}$ , ГПа
12X18H10T Ø42 $\rho_0 = 7.89$ г/см <sup>3</sup>	3.5	0.85	7.0	20.2	12X18H10T Ø50 × 1 $\rho_0 = 7.89$ г/см <sup>3</sup>	2.37	1.0, 1.5 2.0, 2.5 (см. рис. 4,б)	71
	3.5	1.04	6.0	25.7		2.67		84
	3.0	1.16	6.0	30.0		2.74		90
	2.5	1.29	7.0	33.9		3.12		108
	3.0	2.20	7.0	67.3		3.47		125
	2.5	1.29	4.0	33.6		3.71		138
	3.0	1.56		42.6		3.96		151
	3.0	1.90		55.3		4.17		163
	2.0	3.20		111.0		4.36		175
Сталь 10 Ø80 × 1 $\rho_0 = 7.83$ г/см <sup>3</sup>					4.54		185	
					4.85	4.0, 5.0 6.0, 7.0	199	
					5.25		224	
					5.77		260	

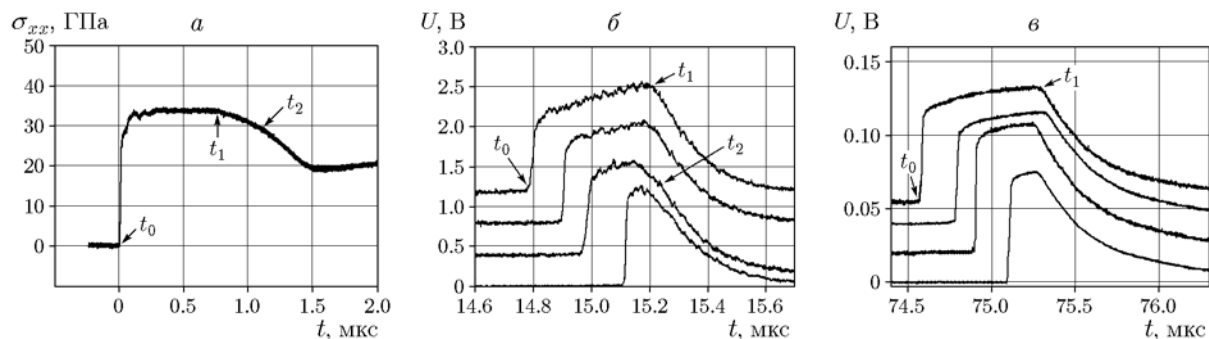


Рис. 4. Волновой профиль в уране, полученный из осциллограмм ММД (а) ( $\sigma_{xx} = 34$  ГПа) и осциллограммы ИМ (б — в твердой фазе,  $\sigma_{xx} = 125$  ГПа; в — в расплаве,  $p = 225$  ГПа)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Всего с образцами урана было проведено 22 взрывных эксперимента. В некоторых зарегистрирована только волна упругой разгрузки. Пластическая (объемная) разгрузка не идентифицируется в связи с тем, что, во-первых, происходит на фоне упругой разгрузки и, во-вторых, приводит к слабому изменению параметров течения. В качестве примера на рис. 4 представлен восстановленный из осциллограмм ММД волновой профиль в уране (рис. 4,а), а также осциллограммы, полученные ИМ и характеризующие свечение фронта

УВ в  $\text{CHCl}_3$ : на рис. 4,б — в области твердой фазы урана, на рис. 4,в — в расплаве. Видно, что в расплаве идентифицируется один излом, характеризующий объемную скорость звука.

Осциллограммы имеют классическую форму, характерную для метода догоняющей разгрузки: начало сигнала  $t_0$  соответствует приходу УВ на датчик (для ММД) либо выходу фронта УВ в индикатор (для ИМ). Спад сигнала соответствует догону фронта УВ волной разрежения, движущейся с продольной ( $t_1$ ) либо с объемной ( $t_2$ ) скоростью звука. Осциллограммы ИМ имеют одну особенность, а именно нарастание сигнала в процессе движе-

ния фронта УВ по индикатору. Это не связано с нестационарностью нагружения образцов, а является следствием того, что фронт УВ приближается к входному зрачку приемной оптической системы — торцу оптического волокна. В этом случае при неизменной площади излучателя, ограниченного апертурной диафрагмой, и неизменной площади входного зрачка происходит закономерное увеличение светового потока на чувствительной площадке фотоприемника и соответствующее ему нарастание уровня выходного электрического сигнала с него [8].

Графическое отображение полученных результатов показано на рис. 5. По этим результатам оценен диапазон плавления природного урана во фронте УВ: начало плавления — 160 ГПа, окончание — 190 ГПа. Вся совокупность экспериментальных точек для твердой и жидкой фаз урана описана зависимостями скорости звука от плотности (закон Берча) [9].

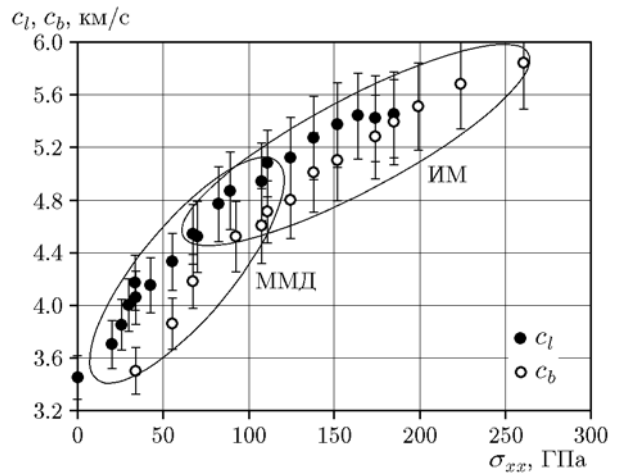


Рис. 5. Зависимости продольной и объемной скоростей звука в уране от напряжения ударного сжатия

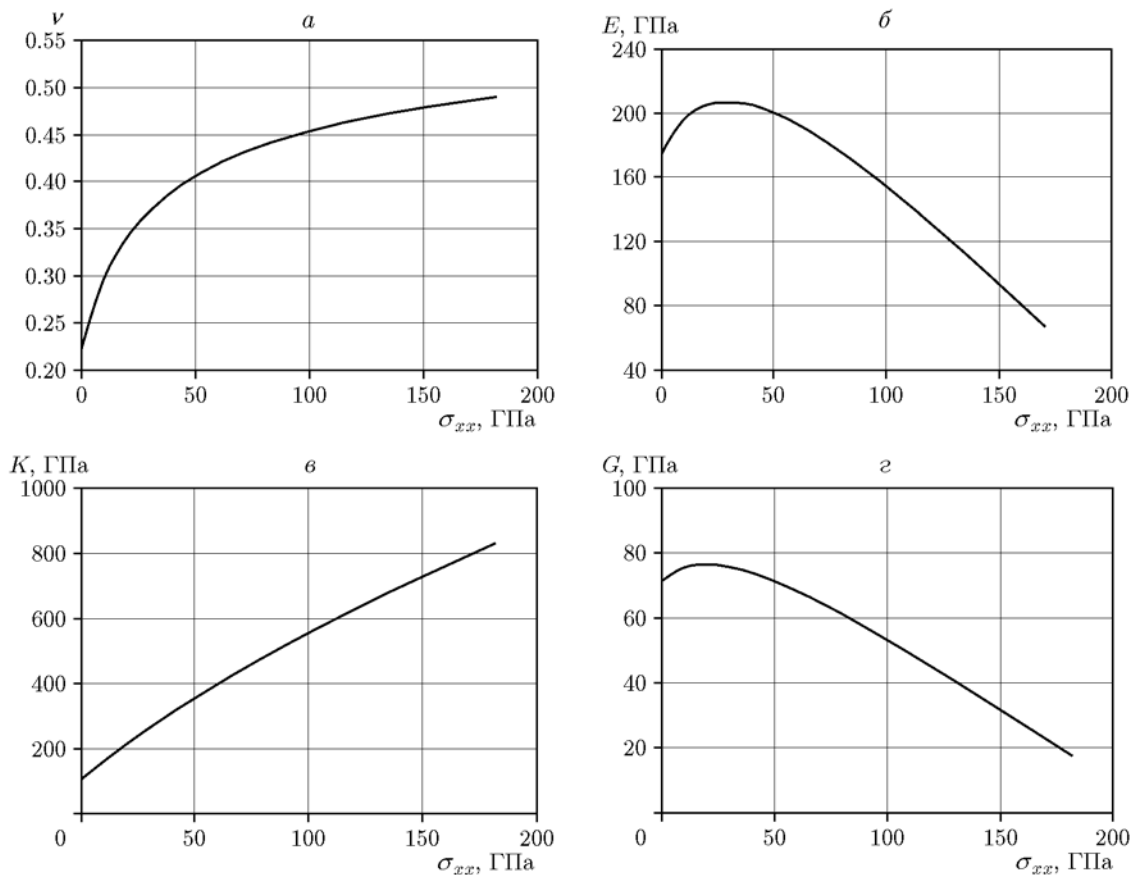


Рис. 6. Изменения коэффициента Пуассона (а), модуля Юнга (б), модуля объемного сжатия (в) и модуля сдвига (г) от напряжения ударного сжатия в уране

В области твердой  $\alpha$ -фазы ( $\sigma_{xx} = 0 \div 160$  ГПа):

$$c_l \text{ [км/с]} = \\ = 0.232 \text{ [км/с} \cdot \text{см}^3/\text{Г]} \cdot \rho \text{ [Г/см}^3\text{]} - 1.141,$$

$$c_b \text{ [км/с]} = \\ = 0.318 \text{ [км/с} \cdot \text{см}^3/\text{Г]} \cdot \rho \text{ [Г/см}^3\text{]} - 3.666;$$

в расплаве ( $p = 160 \div 260$  ГПа):

$$c_b \text{ [км/с]} = \\ = 0.269 \text{ [км/с} \cdot \text{см}^3/\text{Г]} \cdot \rho \text{ [Г/см}^3\text{]} - 2.316,$$

где  $\rho$  — плотность вещества за фронтом УВ.

Полученные зависимости позволяют оценить изменение коэффициента Пуассона  $\nu = [3 - (c_l/c_b)^2]/[3 + (c_l/c_b)^2]$ , модуля Юнга  $E = \rho c_l^2(1 - 2\nu)(1 + \nu)/(1 - \nu)$ , модуля объемного сжатия  $K = \rho c_b^2$  и модуля сдвига  $G = \rho c_l^2(1 - 2\nu)/2(1 - \nu)$  вдоль ударной адиабаты урана. Эти результаты представлены на рис. 6. Из них следует, в частности, что увеличение сдвиговой прочности при сжатии урана реализуется лишь в относительно низком диапазоне продольных напряжений при  $\sigma_{xx} \leq 20$  ГПа. При больших амплитудах ударной нагрузки над упрочнением, вызванным сжатием, начинает преобладать разупрочнение за счет ударно-волнового разогрева.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые данные по изменению продольной и объемной скоростей звука в природном уране в диапазоне напряжений ударного сжатия  $20 \div 260$  ГПа, на основании которых оценен диапазон плавления урана на фронте

УВ: начало плавления — 160 ГПа, окончание — 190 ГПа. Установлены общие закономерности, описывающие изменение продольной и объемной скоростей звука от плотности урана в диапазоне  $0 \leq \sigma_{xx} \leq 160$  ГПа (твердая фаза) и  $190 \leq \sigma_{xx} \leq 260$  ГПа (расплав).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Поведение** веществ под воздействием сильных ударных волн: сб. науч. ст. / под ред. Р. Ф. Трунина. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
2. **Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортгов В. Е.** Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996.
3. **Yoo C.-S., Cynn H., Söderlind P.** Phase diagram of uranium at high pressures and temperatures // Phys. Rev. Ser. B. — 1998. — V. 57, N 17. — P. 10359–10362. — DOI: 10.1103/PhysRevB.57.10359.
4. **LASL Shock Hugoniot Data** / S. P. Marsh (Ed.). — Berkeley: Univ. of California Press, 1980.
5. **Альтшулер Л. В., Кормер С. Б., Бражник М. И. и др.** Изэнтропическая сжимаемость алюминия, меди, свинца и железа при высоких давлениях // ЖЭТФ. — 1960. — Т. 38, вып. 4. — С. 1061–1073.
6. **Павловский М. Н.** Измерения скорости звука в ударно-сжатых кварците, доломите, ангидрите, хлористом натрии // ПМТФ. — 1976. — № 5. — С. 136–139.
7. **McQueen R. G., Hopson J. W., Fritz L. N.** Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures // Rev. Sci. Instrum. — 1982. — V. 53, N 2. — P. 245–250. — DOI: 10.1063/1.1136937.
8. **Парвулюсов Ю. Б., Солдатов В. П.** Проектирование оптико-электронных приборов. — М.: Машиностроение, 1990.
9. **Shaner J. W., Hixson R. S., Winkler M. A., Boness D. A., Brown J. M.** Birch's law for fluid metals // Shock Waves in Condensed Matter / N. C. Holmes, S. C. Schmidt (Eds). — Amsterdam: Elsevier Sci. Publ., 1987. — P. 135–138.

*Поступила в редакцию 16.11.2020.*

*После доработки 23.12.2020.*

*Принята к публикации 19.02.2021.*