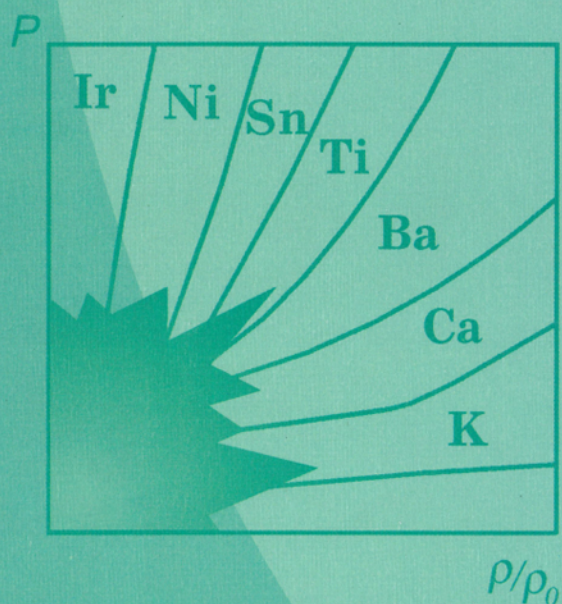


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО УДАРНО-ВОЛНОВОМУ СЖАТИЮ И АДИАБАТИЧЕСКОМУ РАСШИРЕНИЮ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
РФЯЦ-ВНИИЭФ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО УДАРНО-ВОЛНОВОМУ СЖАТИЮ И АДИАБАТИЧЕСКОМУ РАСШИРЕНИЮ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ

Научное издание

2-е, переработанное и дополненное

Под редакцией Р. Ф. Трунина

САРОВ
2006

УДК 534.222.2(03)
ББК 22.23
Э-41

Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ: Научное издание / Под ред. Р. Ф. Трунина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, 531 с.

ISBN 5-9515-0089-3

Авторы: Р. Ф. Трунин, Л. Ф. Гударенко, М. В. Жерноклетов,
Г. В. Симаков

В сборнике приведены результаты экспериментов по ударному сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ, а также данные по сжатию некоторых газов, полученные в России в период с 1949 г. по 2005 г.

Сборник включает данные по большинству элементов периодической системы (в том числе по сплошным, пористым и расплавленным металлам), окислам, сплавам, гидридам, карбидам и нитридам металлов, галогенидам, твердым и жидким органическим веществам, воде и ее твердым модификациям, водным растворам солей и другим соединениям.

По сравнению с первым изданием сборника второе издание существенно расширено благодаря включению в него результатов исследования динамической сжимаемости водорода, а также ряда керамических и смесевых составов. Исправлены замечания и другие погрешности первого издания.

Экспериментальные результаты по сжатию сплошных образцов аппроксимированы простыми и удобными для практического использования интерполяционными зависимостями и представлены в графической форме. Для каждого вещества приводится таблица кинематических и термодинамических параметров – ударно-волновая и массовая скорости, давление, сжатие, плотность и энергия ударного сжатия (внутренняя энергия).

Представленные данные могут быть использованы во многих отраслях физики высоких плотностей энергии – при рассмотрении высокоскоростных соударений, в вопросах планетной астрономии, в том числе внутреннего состава планет, различных аспектах техники и технологии взрыва (включая вопросы техники безопасности устройств, работающих в режиме высоких давлений), взрывной обработке веществ, синтезе новых материалов и т. п.

Сборник предназначен для ученых, инженеров, аспирантов и студентов, специализирующихся на использовании ударных волн в современной физике, астрофизике, химии, энергетике, технологии, космической и оборонной технике и других дисциплинах.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	6
Список веществ по алфавиту	7
ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ	10
Ударная адиабата	10
Адиабата двукратного (повторного) сжатия	12
Адиабаты расширения ударно сжатых веществ	14
Скорость звука в ударно сжатом веществе	14
Ударные адиабаты эталонов	16
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ	17
Представление данных по ударному сжатию сплошных конденсированных веществ и газов	17
Представление данных по ударному сжатию пористых веществ	18
Представление данных по двукратному (повторному) сжатию веществ	19
Представление данных по адиабатам расширения ударно сжатых сплошных и пористых веществ	19
Представление данных о скорости разлета ударно сжатых веществ в воздух	20
Представление данных о скорости звука в ударно сжатых веществах	20
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ	21
Элементы	23
Азот (жидкость), 23. Алюминий, 24. Аргон (газ), 32. Аргон (жидкость), 33. Барий, 34. Ванадий, 35. Висмут, 36. Водород (Протий твердый H_2), 44. Водород (Дейтерий жидкий D_2), 45. Водород (Дейтерий твердый D_2), 46. Вольфрам, 47. Гадолиний, 54. Галлий, 55. Гафний, 56. Германий, 57. Гольмий, 58. Диспрозий, 59. Европий, 60. Железо, 61. Золото, 69. Индий, 70. Иридий, 71. Иттербий, 72. Иттрий, 73. Йод, 74. Кадмий, 75. Калий, 78. Кальций, 79. Кобальт, 80. Кремний, 85. Кrypton (жидкость), 86. Ксенон (газ), 87. Ксенон (жидкость), 88. Лантан, 89. Литий, 90. Лютеций, 91. Магний, 92. Медь, 95. Молибден, 111. Натрий, 122. Неодим, 123. Никель, 124. Ниобий, 137. Олово, 138. Празеодим, 142. Рений, 143. Родий, 144. Самарий, 145. Свинец, 146. Селен, 156. Сера, 157. Серебро, 158. Скандий, 159. Стронций, 160. Таллий, 161. Тантал, 162. Титан, 168. Титан (холодный), 170. Углерод (алмаз), 178. Углерод (графит), 182. Фосфор (красный), 188. Хром, 189. Церий, 193. Цинк, 194. Цирконий, 203. Эрбий, 204	
Сплавы и смеси	205
Композит, 205. Метеорит (1), 206. Метеорит (2), 206. Пресс-материал АГ-4, 207. Пьезокерамика ПКР-1(ЦТС-36), 208. Пьезокерамика ПКР-7М, 210. Пьезокерамика ПКР-34, 211. Пьезокерамика ПКР-35, 212. Пьезокерамика ПКР-57, 213. Пьезокерамика ПКР-58, 214. Пьезокерамика ПКР-61, 215. Пьезокерамика ЦТС-19, 216. Смесь алмаза с фторлоном, 217. Смесь алмаза с ВК6, 218. Смесь алмаза с ВК20, 219. Смесь алюминия с карбидом кремния, 220. Смесь бора аморфного с полипропиленом, 221. Смесь имитатор И-1, 222. Смесь кварца с алюминием (1), 223. Смесь кварца с алюминием (2), 224. Смесь кварца с алюминием (3), 225. Смесь кварца с вольфрамом, 226. Смесь кварцевого песка с древесными опилками, 227. Смесь кварца (кварцита) с парафином, 228. Смесь кварцита с фторопластом, 229. Смесь корунда с фторопластом, 230. Смесь меди с алмазом, 231. Смесь меди с алмазом, 232. Смесь меди с графитом, 234. Смесь меди с графитом, 235. Смесь мрамора ($CaCO_3$) с парафином, 236. Смесь никеля с алюминием, 237. Смесь окиси европия с полипропиленом, 238. Смесь окиси самария с полипропиленом, 239. Смесь парафина с вольфрамом (1), 240. Смесь парафина с вольфрамом (2), 241. Смесь полевого шпата с парафином, 242. Смесь поликристаллического бора с дифлоном (с поликарбонатом), 243. Смесь СКН с Al_2O_3 , 244. Смесь $4TiN_{1,85}$ с $3KClO_4$ и 5 % фторопласта, 245. Смесь титана с алмазом, 246.	

Смесь кальцита с водой (влажный мел), 247. Сплав кобальта с никелем, 248. Сплав железа с медью, 249. Сплав железа с никелем, 250. Сплав магния с литием, 251. Сплав рения с молибденом, 252. Сплав никеля с медью, 253. Сплав титана с молибденом, 254. Сплав титана с цирконием, 255. Сплав АМг6, 256. Сплав АМц, 257. Сплав ВНЖ-90, 258. Сплав ВНЖ-95, 259. Сплав ВНМ-3-2, 260. Сплав Вуда, 261. Сплав Д-16, 262. Сплав НТ30Э, 263. Сплав НТ5Э, 264. Сталь 12Х18Н10Т, 265. Сталь 25ХГСА, 266. Сталь 30Х13, 267. Сталь 35, 268. Сталь 40Х, 269. Сталь 45, 270. Сталь ЭП543У-ИД, 271

Минералы и горные породы 272

Алевролит, 272. Алюмоборосиликатное стекло, 273. Ангидрит, 275. Барит, 276. Барит влажный, 278. Берилл, 279. Брусит, 280. Волластонит, 281. Габбро, 282. Геденбергит, 283. Гетит, 284. Гипс, 285. Глина, 286. Гранит, 287. Долерит, 288. Доломит, 289. Дунит-1, 290. Дунит-2, 291. Ильменит, 292. Кальцит, 293. Кварцевый песок влажный, 295. Кремнезем (кварц и кварцит), 296. Кремнезем (коэсит), 313. Кремнезем (крystalлит), 316. Криолит, 317. Магнезит, 318. Магнетит, 319. Микроклин, 320. Мрамор, 321. Нефелин, 322. Оливинит (1), 323. Оливинит (2), 324. Оливиновый диабаз, 325. Оливиновый диаллагит, 326. Периклаз, 327. Перовскит, 328. Пирит, 329. Пирролюзит, 330. Полевой шпат, 332. Полевошпатовый перидотит, 333. Рудный оливинит, 334. Рутит, 335. Селлаит, 338. Сиенит, 341. Сланец, 342. Сподумен, 344. Стекло, 345. Сфалерит, 346. Топаз, 347. Тремолит-1, 348. Тремолит-2, 349. Фар-фор, 350. Флюорит, 351. Энстатитовая горная порода, 352. Энстатитовое габбро, 353

Вода и насыщенные водные растворы солей 354

Вода, 354. Морская вода (Баренцево море), 359. Раствор йодида калия, 360. Раствор бромида калия, 361. Раствор бромида цезия, 362. Раствор хлорида калия, 363. Раствор йодида натрия, 364. Раствор йодида цезия, 365. Раствор сульфата цинка, 366. Раствор тиосульфата натрия (1), 367. Раствор тиосульфата натрия (2), 368. Раствор тиосульфата натрия (3), 369. Раствор хлорида натрия, 370. Раствор хлорида цинка (1), 371. Раствор хлорида цинка (2), 372

Галогениды металлов 373

Фторид бария, 373. Бромид калия, 376. Хлорид калия, 377. Фторид лития, 379. Фторид марганца, 380. Хлорид меди, 381. Йодид меди, 382. Йодид натрия, 383. Хлорид натрия, 384. Йодид таллия, 389. Хлорид таллия, 390. Бромид цезия, 391. Йодид цезия, 392

Гидриды и нитриды металлов 394

Нитрид алюминия, 394. Нитрид бора (кубический), 396. Боронит, 397. Гидрид ванадия, 398. Гидрид кальция, 399. Нитрид кремния, 400. Гидрид магния, 401. Гидрид тантала, 402. Нитрид тантала, 403. Гидрид титана, 405. Нитрид титана, 407. Гидрид циркония, 408. Нитрид циркония, 409

Карбиды и окислы металлов 410

Окись бериллия, 410. Карбид бора, 411. Карбид вольфрама, 416. Касситерит, 419. КВПТ (керамика на основе Al_2O_3), 420. Корунд, 421. Карбид кремния, 422. Карбид ниобия, 423. Рубин, 425. Карбид тантала, 426. Карбид титана, 427. Углекислота, 428. Хилумин (керамика на основе Al_2O_3), 429. Карбид циркония, 430

Органические жидкости 431

Акрилонитрил, 431. Амиловый спирт, 432. Ангидрид капроновой кислоты, 433. Ангидрид масляной кислоты, 434. Анилин, 435. Ацетон, 436. Ацетон с тритилом, 437. Ацетонитрил, 438. Бензол, 439. Бромформ, 440. Бутиловый спирт, 441. Гексадекан, 442. Гексан, 443. Н-Гексан, 444. Гексен-1, 445. Гексен-2, 446. Гексиловый спирт, 447. Гексин, 448. Гептан, 449. Гептен, 450. Гептиловый спирт, 451. Декан, 452. Капроновая кислота, 453. Карбогал, 454. Масляная кислота, 455. Муравьиная кислота, 456. Нитробензол, 457. Нолиловый спирт, 458. Октен, 459. Октиловый спирт, 460. Октин, 461. Стирол, 462. Тетрадекан, 463. Толуол, 464. Трибутилфосфат, 465. Тригидродекафторгептанол, 466. Тригидрооктафторпентанол, 467. Тригидротетрафторпропанол, 468. Тридекан, 469. Уксусная кислота, 470. Хлорекс, 471. Циклогексан, 472. Циклогексанон, 473. Циклогексен, 474. Четыреххлористый углерод, 475. Этиловый спирт, 476

Твердые органические вещества	477
Акриламид, 477. Ангидрид миристиновой кислоты, 478. Винная кислота, 479. Глутаровая кислота, 480. Капролон, 481. Малеиновая кислота, 483. Пальмитиновая кислота, 484. Парафин, 485. Полиакриламид, 487. Полиимидный пенопласт, 488. Поликарбонат, 491. Полиметилметакрилат, 492. Полипропилен, 497. Полистирол, 498. Политетрафторэтилен, 503. Полиэтилен, 506. Сосна (волокна вдоль распространения ударной волны), 508. Стильбен, 509. Тетракозан, 512. Фенилон, 513. Фталевая кислота, 515. Фталевый ангидрид, 516. Циатим 221 (смазка), 517. Эпоксидный компаунд ЭК-10, 518. Эпоксидный компаунд ЭК-34, 519. Янтарная кислота, 520. Янтарный ангидрид, 521	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	522

112. Воскобойников И. М., Долгобородов А. Ю. Скорости звука и температуры на изэнтропах ударно-сжатых CCl_4 и CHBr_3 // Детонация. Материалы 9-го Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. Черногловка. 1989. С. 91–94.
113. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф. Температура ударного сжатия некоторых углеводородов // Химическая физика. 1982. N 3. С. 423–427.
114. Якушев В. В., Дрёмин А. Н., Набатов С. С., Шунин В. М. Физические свойства и превращение нитробензола при динамических давлениях // Физика горения и взрыва. 1979. N 2. С. 132–136.
115. Якушева О. Б., Якушев В. В., Дремин А. Н. Связь потери прозрачности углеродсодержащих соединений при высоких динамических давлениях с аномалиями на кривых ударной сжимаемости // Журнал физической химии. 1977. Т. 51. Вып. 7. С. 1657–1661.
116. Трунин Р. Ф., Жерноклетов М. В., Дорохин В. В., Сычевская Н. В. Сжатие твердых органических кислот и ангидридов в ударных волнах // Химическая физика. 1992. Т. 11, N 4. С. 557–562.
117. Кулешова Л. В., Павловский М. Н. Динамическая сжимаемость, электропроводность и скорость звука за фронтом ударной волны в капролоне // ПМТФ. 1977. N 5. С. 122–126.
118. Альтшулер Л. В., Шарипджанов И. И. Аддитивные уравнения состояния силикатов при высоких давлениях // Физика Земли. 1971. N 3. С. 11–28.
119. Бушман А. В., Жерноклетов М. В., Ломоносов И. В., Сутулов Ю. Н., Фортов В. Е., Хищенко К. В. Ударная сжимаемость и уравнение состояния полиимида // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 58. Вып. 8. С. 640–644.
120. Бушман А. В., Жерноклетов М. В., Ломоносов И. В., Сутулов Ю. Н., Фортов В. Е., Хищенко К. В. Исследование плексигласа и тефлона в волнах повторного ударного сжатия и изэнтропической разгрузки. Уравнение состояния полимеров при высоких плотностях энергии // Докл. АН. 1993. Т. 329, N 5. С. 581–584.
121. Зельдович Я. Б., Кормер С. Б., Синицын М. В., Куряпин А. И. Температура и теплоемкость плексигласа, сжатого ударной волной // Докл. АН СССР. 1958. Т. 122. Вып. 1. С. 48–50.
122. Дудолодов И. П., Ракитин В. И., Сутулов Ю. Н., Телегин Г. С. Ударная сжимаемость полистирола с различной начальной плотностью // ПМТФ. 1969. N 4. С. 148–151.
123. Бушман А. В., Жерноклетов М. В., Ломоносов И. В., Сутулов Ю. Н., Фортов В. Е., Хищенко К. В. Экспериментальное исследование фенилона и полистирола в условиях ударного нагружения и изэнтропического расширения. Уравнение состояния пластиков при высоких плотностях энергии // ЖЭТФ. 1996. Т. 109. Вып. 5. С. 1662–1670.
124. Калашников Н. Г., Кулешова Л. В., Павловский М. Н. Ударное сжатие политетрафторэтилена до давлений 1,7 Мбар // ПМТФ. 1972. N 4. С. 187–191.
125. Зубарев В. Н., Панов Н. В., Телегин Г. С. О ширине стационарной зоны в детонационных волнах // Физика горения и взрыва. 1970. N 1. С. 107–112.

126. Хищенко К. В., Жерноклетов М. В., Ломоносов И. В., Сутулов Ю. Н. Ударная сжимаемость и уравнение состояния стилибена // Химическая физика. 1998. Т. 17, N 2. С. 29–32.
127. Boriskov G. V., Bykov A. I., Ilkaev R. I., Selemir V. D., Simakov G. V., Trunin R. F., Urlin V. D., Shuikin A. N., Nellis W. J. Shock compression of liquid deuterium up to 109 GPa // *Physical Review B* 71, 092104 (2005).
128. Дулин И. Н., Зубарев В. Н., Шуйкин А. Н., Ямпольский П. А. О динамических адиабатах органических веществ // Журнал физической химии. 1973. Т. XLVII, N 4. С. 838–841.
129. Герман В. Н., Подурец А. М. Ударная сжимаемость фтористого марганца // Физика Земли. 1982. N 8. С. 51–54.
130. Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Киршанов С. И., Ковалёв А. Е., Куделькин В. Г., Лебедева Т. С., Ломайкин А. И., Мочалов М. А., Симаков Г. В., Шуйкин А. Н., Воскобойников И. М. Экспериментальные исследования свойств ударно-сжатого карбогала. Уравнение состояния карбогала и оргстекла // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, N 3. С. 104–116.
131. Трунин Р. Ф., Борисков Г. В., Белов С. И., Быков А. И., Ильяев Р. И., Симаков Г. В., Урлин В. Д., Шуйкин А. Н. Ударно-волновое сжатие водорода до давлений 65 ГПа // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82, N 5. С. 317–319.
132. Трунин Р. Ф., Симаков Г. В., Панов Н. В. Ударное сжатие пористого алюминия и никеля при мегабарных давлениях // ТВТ. 2001. Т. 39, N 3. С. 430–436.
133. Воропинов А. И., Ильяева Л. А., Подурец М. А., Симаков Г. В., Трунин Р. Ф. Ударные адиабаты пористых алюминия, титана, меди и вольфрама и адиабаты Пуассона пористых меди и вольфрама в области неполного закрытия пор. Термодинамическая модель и эксперимент // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2005. Вып. 1–2. С. 45–50.
134. Хищенко К. В., Жерноклетов М. В., Ломоносов И. В., Сутулов Ю. Н. Динамическая сжимаемость, адиабаты разгрузки и уравнение состояния стилибена при высоких плотностях энергии // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 2. С. 57–61.
135. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф. Описание состояния вещества за фронтом ударной волны // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, N 3. С. 105–110.
136. Алексеев Ю. Л., Ратников В. П., Рыбаков А. П. Ударные адиабаты пористых металлов // ПМТФ. 1971. N 2. С. 101–105.

Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ

Трунин Рюрик Федорович
Гударенко Леонид Феодосиевич
Жерноклетов Михаил Васильевич
Симаков Геннадий Владимирович

Научное издание

2-е, переработанное и дополненное

Редактор *Тагирова В. М.*
Компьютерная подготовка оригинала-макета *Лештаева Н. А.*

Подписано в печать 31.10.2006 Формат 70×108/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. ~ 44. Уч.-изд. л. ~ 35.
Тираж 300 экз. Зак. тип. 443-2006.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе
ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ"
607188, г. Саров Нижегородской обл.