

## ПАМЯТИ ВЛАДИМИРА ЕВГЕНЬЕВИЧА ФОРТОВА

## ИЗ АРХИВА

## Использование мощных ударных и детонационных волн для изучения экстремальных состояний вещества\*

Л.В. Альтшулер, Р.И. Илькаев, В.Е. Фортон

*Настоящая статья написана на основе доклада, сделанного 10 января 2003 г. на Международной научной конференции "Ядерный век: наука и общество", посвящённой 100-летию со дня рождения Игоря Васильевича Курчатова. В статье представлены результаты работ по экспериментальному изучению свойств веществ при высоких давлениях ударных волн, кратко описано использование сверхсильных магнитных полей для исследования веществ при высоком давлении, приведены результаты расчётно-теоретических методов исследований, а также представлены некоторые результаты исследований свойств веществ с использованием лайнерных систем в мощных импульсных электрофизических установках (дисковые взрывомагнитные генераторы ВНИИЭФ и конденсаторные установки США Pegasus и ATLAS).*

**Ключевые слова:** экстремальные состояния вещества, ударные волны, детонация, лайнерные системы

PACS numbers: 07.35.+k, 47.40.Rs, 62.50.Ef

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2021.09.039092>

## Содержание

От редколлегии (1231).

1. Исследования свойств веществ при высоких давлениях ударных волн (1232).
2. Использование сверхсильных магнитных полей для исследования свойств веществ при высоком давлении (1240).
3. Расчётно-теоретические методы исследований (1241).
4. Исследование свойств веществ с использованием лайнерных систем в мощных импульсных электрофизических установках (дисковые ВМГ ВНИИЭФ и конденсаторные установки США Pegasus, ATLAS) (1241).

Список литературы (1242).

**От редколлегии.** Редакционная коллегия журнала *Успехи физических наук* благодарит Светлану Владимировну Фортон, обратившую внимание редколлегии *УФН* на эту интересную публикацию, которая ранее не переводилась на английский язык и, соответственно, скорее всего, была мало известна международному научному сообществу. Мы надеемся, что воспроизведение этой статьи в мемориальном номере *УФН*, посвящённом памяти Вла-

димира Евгеньевича Фортон, даст "вторую жизнь" этой насыщенной многочисленными результатами публикации. В силу жанра этой статьи (доклад на конференции) материал в ней был подан в предельно лаконичном виде (в основном в яркой иллюстративной форме, принятой для презентации докладов). Поэтому для удобства читателей журнала *УФН* настоящая публикация дополнена списком некоторых обзоров и статей, в которых заинтересованный читатель сможет найти более подробную информацию как о представленных в данной статье результатах исследований на момент публикации этого доклада в 2004 году [1–28], так и о дальнейшем развитии исследований в этом направлении во ВНИИЭФ и в других российских и зарубежных научных центрах [29–59].

Редакционная коллегия *УФН* выражает благодарность А.М. Буйко, С.Ф. Гаранину, М.В. Жерноклетову, Е.Л. Кобрянской, С.А. Монаховой, В.Д. Селемиру, Н.И. Соколовой и В.Г. Султанову за помощь в подготовке этой статьи к публикации в журнале *УФН*.

В.А. Рубаков

Л.В. Альтшулер<sup>(1)</sup>, Р.И. Илькаев<sup>(2)</sup>, В.Е. Фортон<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Институт теплофизики экстремальных состояний (ИТЭС) Объединённого института высоких температур (ОИВТ) РАН, ул. Ижорская 13/19, 127412 Москва, Российская Федерация

<sup>(2)</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ), просп. Мира 37, 607190 Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация  
E-mail: <sup>(2)</sup> [ilkaev@vniief.ru](mailto:ilkaev@vniief.ru)

Статья была написана в 2003–2004 гг.

\* Статья написана на основе доклада, представленного Р.И. Илькаевым 10 января 2003 г. на пленарном заседании Международной научной конференции "Ядерный век: наука и общество", посвящённой 100-летию юбилею Игоря Васильевича Курчатова. Конференция проходила 10–11 января 2003 г. в Российском научном центре "Курчатовский институт" в канун 100-летия Игоря Васильевича Курчатова (12 января 2003 г.). Вместе с другими докладами, представленными на конференции, эта статья впервые была опубликована в сборнике *Международная научная конференция "Ядерный век: наука и общество"* (М.: ИзДАТ, 2004) с. 64. В настоящее время сборник размещён на сайте электронной библиотеки "История Росатома" [http://elib.biblioatom.ru/text/yaderny-vek\\_2004/](http://elib.biblioatom.ru/text/yaderny-vek_2004/) (Примеч. ред.)

**1. Исследования свойств веществ при высоких давлениях ударных волн**

Необходимость исследований свойств веществ при высоких давлениях ударных волн — связанных уравнениями состояний — возникла одновременно с выполнением Атомной программы Советского Союза. У истоков нового, динамического направления в физике высоких давлений стояли выдающиеся советские учёные: Е.И. Забабахин, Я.Б. Зельдович, Ю.Б. Харитон, ныне здравствующий Л.В. Альтшулер и другие. Были предложены методы определения кинематических параметров ударных волн, которые законами сохранения свя-

с давлением ударного сжатия  $P = \rho_0 D U$ , плотностью  $\rho = \rho_0 D(D - U)^{-1}$  и энергией  $E = 0,5 P(\rho_0^{-1} - \rho^{-1})$ .

Здесь  $D$  и  $U$  — скорость ударной волны и скорость движения вещества за её фронтом, то есть в динамическом методе термодинамические величины определяются через кинематические параметры.

Естественно, что первыми веществами, сжатие которых исследовалось в ударных волнах, были те, что использовались в первых атомных зарядах, — алюминий, железо и уран. В 1947 году плотность их ударного сжатия была зафиксирована при давлениях в 500000 атмосфер.

В 1950–1960-е годы были созданы специальные измерительные устройства, обеспечивающие получение

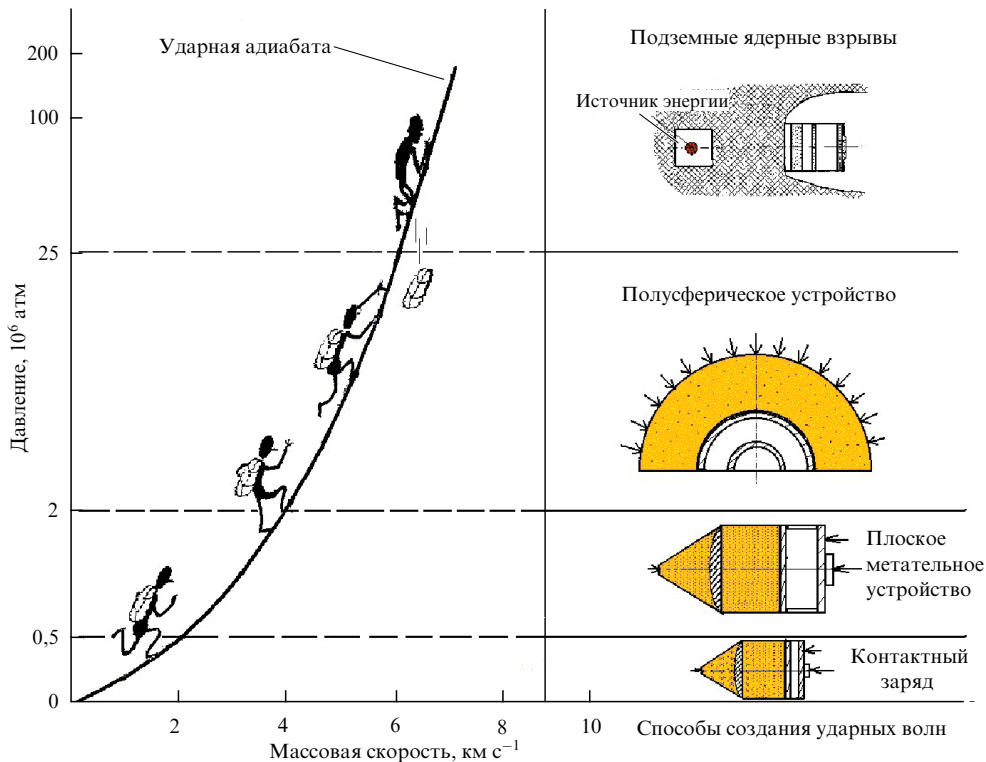


Рис. 1. Схема взрывных измерительных устройств и диапазоны регистрируемых давлений ударного сжатия (для тяжёлых металлов).

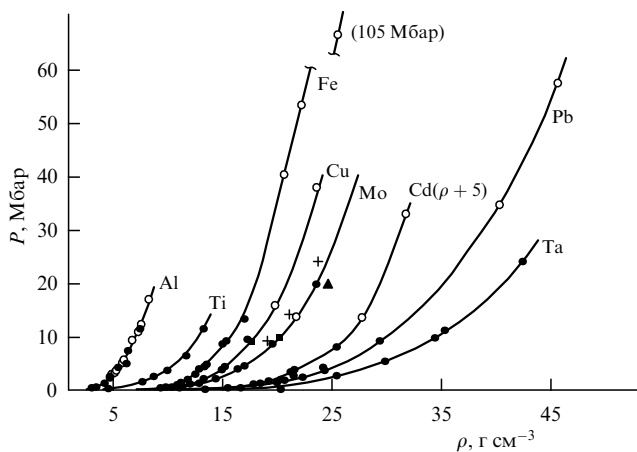


Рис. 2. Диаграмма давление–плотность. Область максимальных параметров. о, +, ▲ — точки, полученные при подземных взрывах (о — Россия); ● — лабораторные данные. Адиабата Cd смещена на +5 г/см<sup>3</sup>.

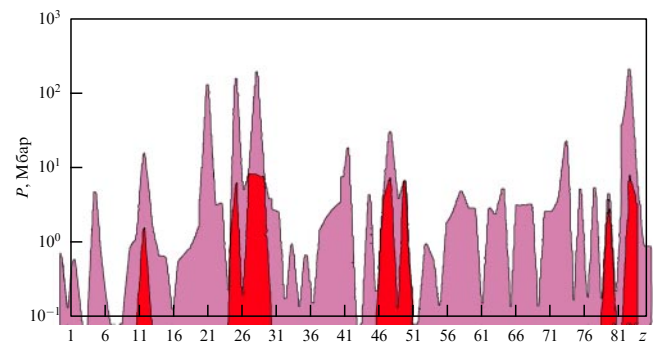


Рис. 3. Диаграмма давлений для элементов Периодической системы (в зависимости от давления). Красным цветом обозначены результаты, полученные во ВНИИЭФ при жизни Игоря Васильевича Курчатова. Сиреневым цветом показано положение на настоящее время. (Начало 2003 года. — Примеч. ред.)

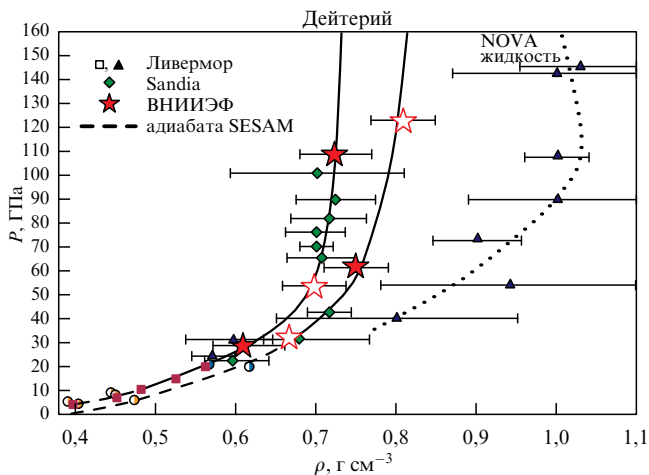


Рис. 4. (В цвете онлайн.) Сравнение ударных адиабат, полученных в США (Ливермор, Сандия) и во ВНИИЭФ.

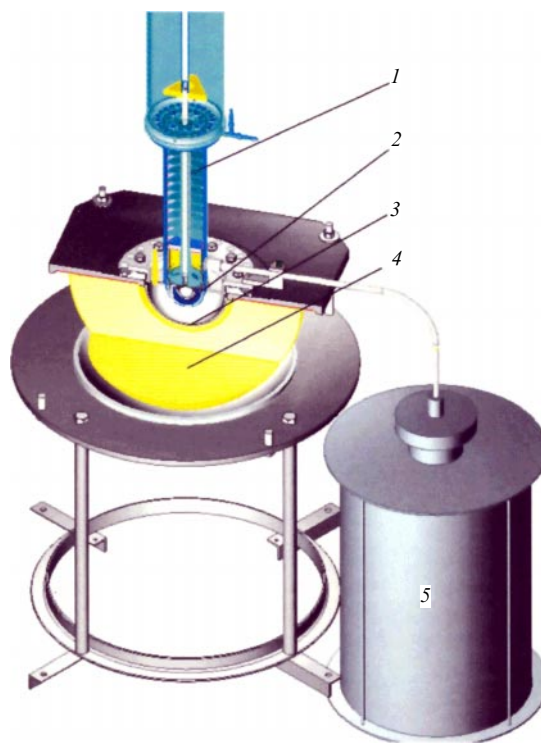


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Устройство для ударного исследования дейтерия. 1 — криостат, 2 — конденсированный дейтерий, 3 — лайнер-ударник, 4 — полусферический заряд ВВ, 5 — сосуд с жидким гелием.

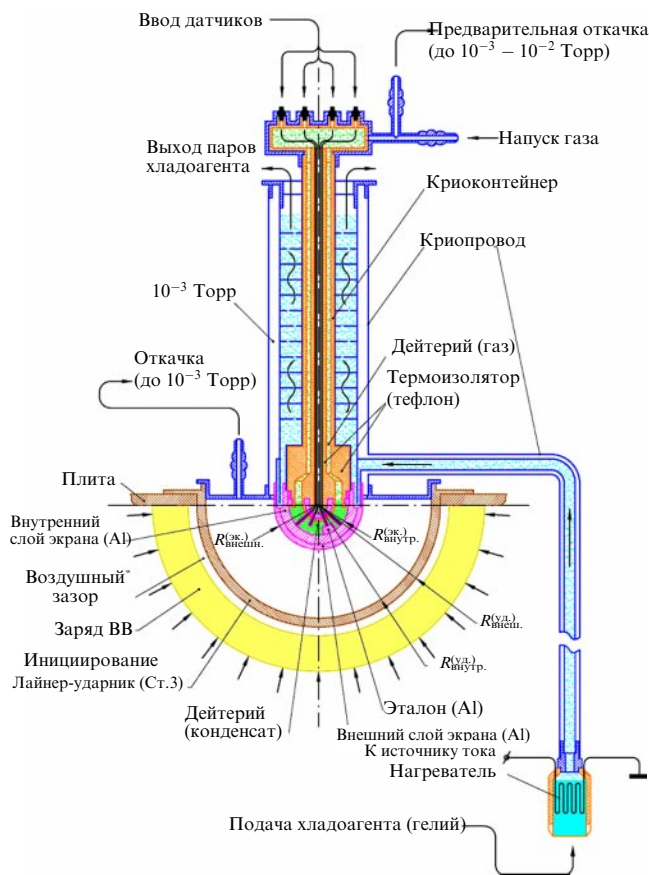


Рис. 5. (В цвете онлайн.) Эскиз экспериментального устройства.

давления в тяжёлых металлах до 30 млн атмосфер. Эти устройства, в порядке возрастания создаваемого ими давления, приведены на диаграмме (рис. 1). С левой стороны показана ударная адиабата железа, по которой вверх, к увеличивающемуся давлению, пробирается исследователь. Справа схематически показаны измерительные устройства для создания давления в исследуемых веществах. Венчают эту колонку подземные ядерные взрывы, которые позволили провести ряд уникальных измерений сжимаемости при сверхвысоком

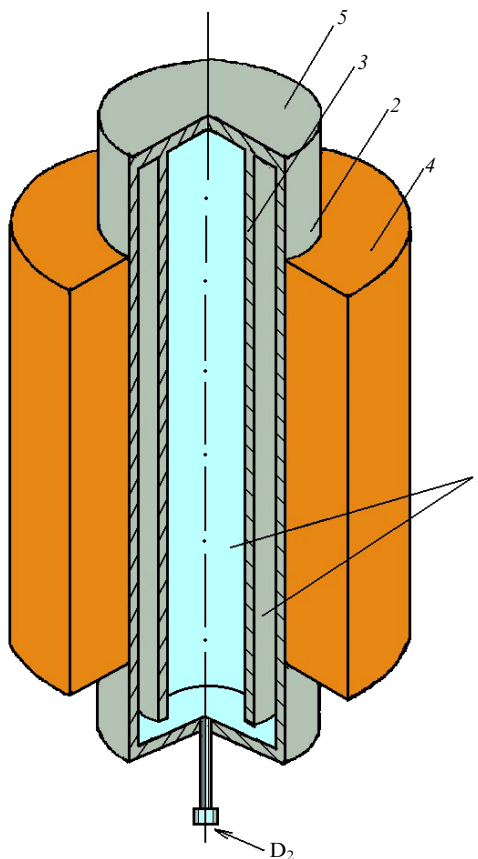


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Исследование квазиизэнтропической сжимаемости газов в области давлений мегабарного диапазона. 1 — газообразная среда, 2 — внешняя оболочка, 3 — внутренняя оболочка, 4 — ВВ, 5 — фланец.

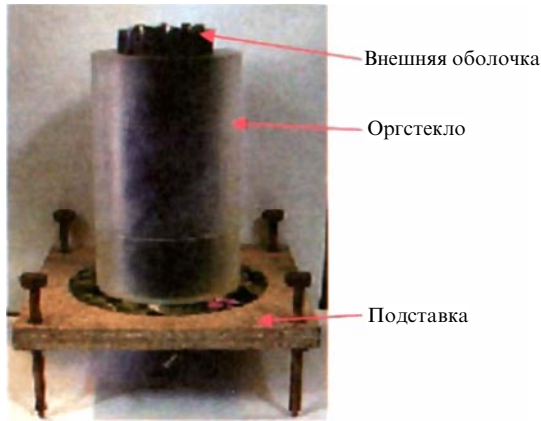
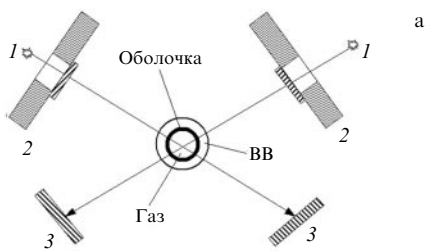


Рис. 8. Фотография экспериментального устройства без ВВ.



1 — источники  $\gamma$ -излучения, 2 — защита, 3 — регистраторы

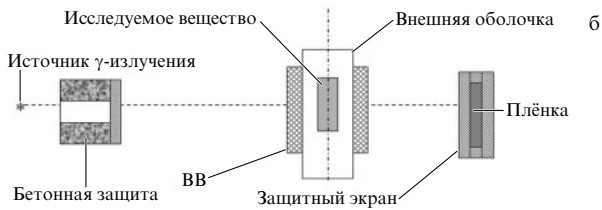


Рис. 9. Схема эксперимента по измерению квазиизэнтропической сжимаемости газообразного дейтерия.

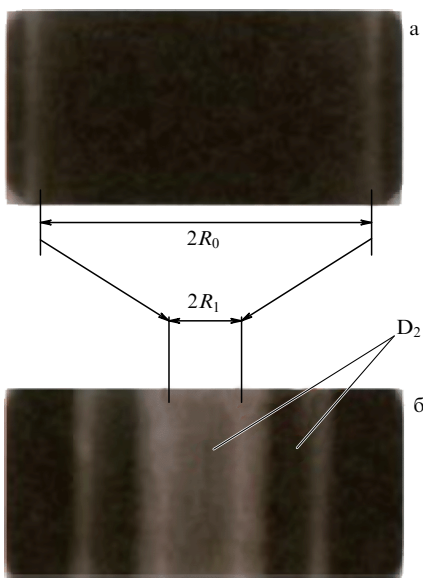


Рис. 10. Рентгеновские изображения цилиндрических оболочек при сжатии газообразного дейтерия давлением  $\sim 150$  ГПа. (а) Теневое изображение оболочки в исходном состоянии. (б) Теневое изображение оболочек в момент дифракции гамма-лучей.

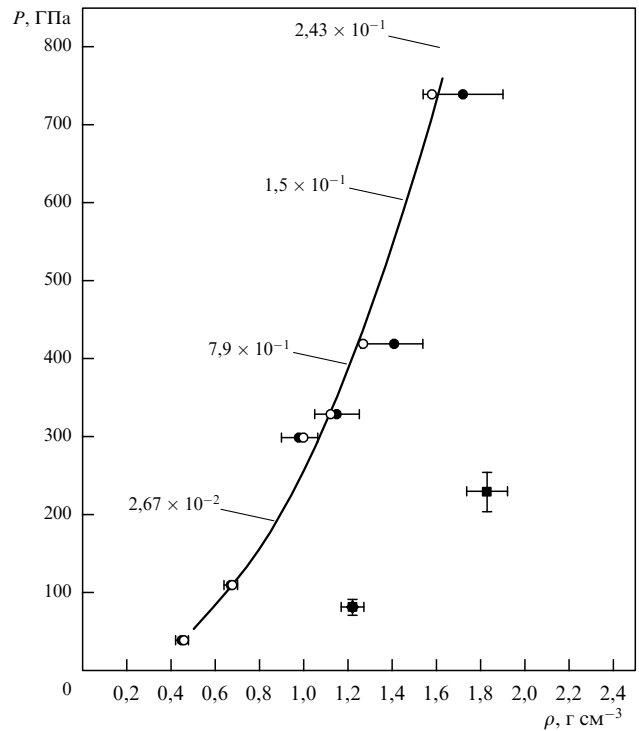


Рис. 11. Квазиизэнтропическая сжимаемость газообразных водорода и дейтерия. Дейтерий: квадраты — эксперимент. Водород: светлые и чёрные кружки — эксперимент и расчёт [Кормер]. Сплошная кривая — расчёт для водорода по УРС в модифицированной форме ван-дер-Ваальса. Стрелки указывают на степень диссоциации при данных давлениях.

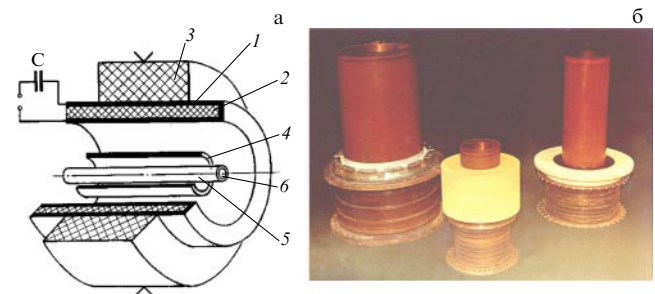
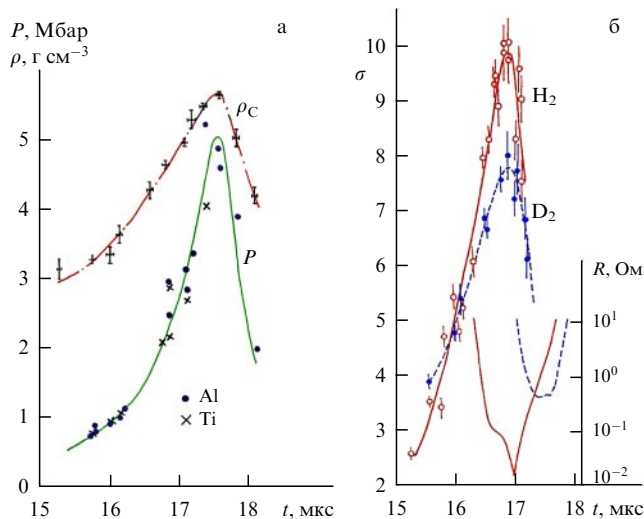


Рис. 12. (В цвете онлайн.) Изэнтропическое сжатие веществ давлением сверхсильного магнитного поля. Каскадный генератор МК-1 сверхсильных магнитных полей. (а) Схема каскадного генератора МК-1: 1 — соленоид-лайнер, 2 — изолятор, 3 — заряд ВВ, 4 — 2-й каскад, 5 — 3-й каскад, 6 — объём максимального поля. (б) Внешний вид соленоидов-оболочек трёх размеров — 150, 200, 360 мм.

давления. Наиболее простые системы, представленные в нижней правой колонке, позволяют получить давление в 2 млн атм. Это так называемые "метательные" системы. Исследователь, пробирающийся по адиабате (левая часть рисунка), позволяет себе спокойно преодолевать этот рубеж.

Следующий этап — полусферические системы. Такие системы существуют только в России, и они позволили обеспечить приоритет наших исследований в области миллионных давлений. В полусферических устройствах продукты взрыва сферически сходящейся детонационной волны плавно разгоняют железный ударник-лайнер, который "сходится" к центру системы. Вблизи неё давление достигает около 30 млн атм.



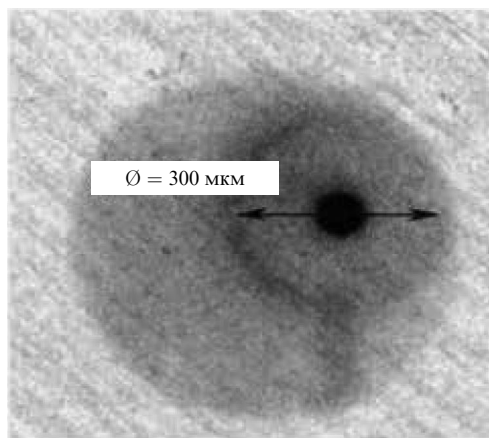
**Рис. 13.** (В цвете онлайн.) Изэнтропическое сжатие веществ давлением сверхсильного магнитного поля. Результаты исследований графита и конденсированных дейтерия и водорода. (а) Импульс давления  $P(t)$  с максимумом 5 Мбар и кривая сжимаемости графита  $\rho(t)$  в устройстве сжатия. (б) Кривые сжимаемости водорода и дейтерия  $\sigma(t) = \rho/\rho_0$  и изменения сопротивления образца  $R(t)$  после возникновения проводимости.

Наконец, максимальные давления достигнуты в непосредственной близости от места взрыва ядерного устройства при подземных испытаниях и в наших измерениях составляют 200 млн атм. В этой области диаграммы нашему исследователю уже не до бега: дай бог на четвереньках удержаться на адиабате! Для облегчения веса даже рюкзак пришлось сбросить!

Посмотрим теперь (рис. 2), какова сжимаемость некоторых металлов, полученная на рассмотренных измерительных устройствах.

Данные приведены в координатах давление – плотность. Максимальные давления получены на железе — 105 млн атм (это абсолютные измерения, т.е. такие, в которых одновременно измеряются  $D$  и  $U$ ). Лучше всего сжимается свинец. При давлении в 60 млн атм он сжимается в 4,2 раза.

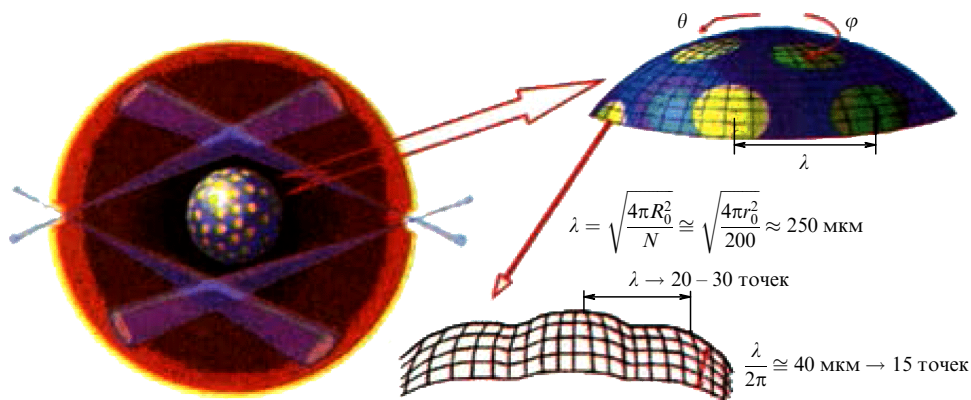
На диаграмме (рис. 3) приведена зависимость давления от порядкового номера элемента в периодической системе. Красным цветом показаны результаты, полу-



**Рис. 14.** В экспериментах на установке ИСКРА-5 реализована высокая степень симметрии сжатия облучаемых рентгеном стеклянных микросфер с DT-газом. Изображение стеклянной микросферы, полученное с помощью камеры-обскуры.

**Таблица.**

Минимальное число точек на поверхности мишени	$250 \times 250 - 6 \times 10^4$
Минимальное число точек по радиусу	200
Минимальное число групп по энергии фотонов и энергии альфа-частиц	20
Число направлений полёта частиц в фазовом пространстве	1000
Число арифметических операций, требуемых на расчёт одной точки фазового пространства на одном временном шаге	$2 \times 10^3$
Суммарное по всем точкам число арифметических операций, требуемых на расчёт одного временного шага	$4,4 \times 10^{14}$
Количество временных шагов	$10^4$
Требуемая производительность супер-ЭВМ для расчёта стадии сжатия термоядерной мишени	$\sim 10$ Tflops $\sim 100$ часов (затраты на один расчёт)
Требуемая производительность супер-ЭВМ для полномасштабных расчётов динамики работы лазерной термоядерной установки	$> 100$ Tflops



**Рис. 15.** (В цвете онлайн.) Моделирование динамики мишени, облучаемой многопучковым лазером.

- Трёхтемпературная гидродинамика

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}(P + Q); \quad \frac{dz}{dt} = u; \quad \frac{d\rho}{dt} = -\rho \text{div} u;$$

$$\frac{dE_\gamma}{dt} = -\rho_\gamma \frac{d(1/\rho)}{dt}; \quad \frac{dE_c}{dt} = -\rho_c \frac{d(1/\rho)}{dt};$$

$$\frac{dE_i}{dt} = -(p_i + Q) \frac{d(1/\rho)}{dt}.$$

- Многогрупповой спектральный перенос излучения

$$\frac{\partial U_v}{\partial t} + \text{div} \frac{c}{3\chi_v^{\text{abs}}} \text{grad} U_v = j_v - c\chi_v^{\text{abs}} U_v;$$

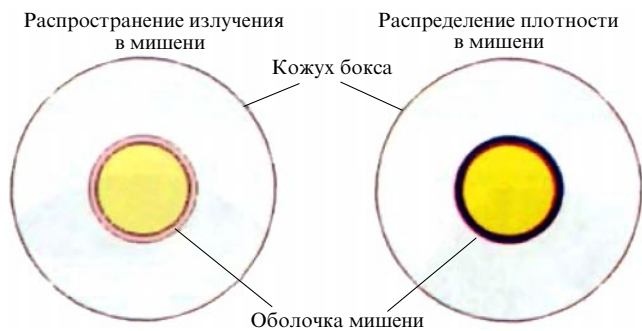
$$\rho \frac{dE_c}{dt} = c \sum_v \left( \chi_v^{\text{abs}} U_v - \frac{j_v}{c} \right).$$

- Перенос энергии электронами и ионами

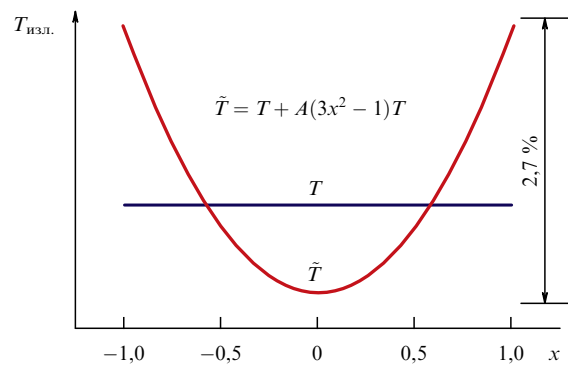
$$\frac{\partial E_e}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \text{div} (\chi_e \text{grad} T_e); \quad \frac{\partial E_i}{\partial t} = \text{div} (\chi_i \text{grad} T_i).$$

- Перенос по пространству энергии альфа-частиц в многогрупповом диффузионном приближении.
- Кинетика термоядерных реакций.
- Кинетика ионизации и рекомбинации.
- Импорт лазерной энергии в мишень.

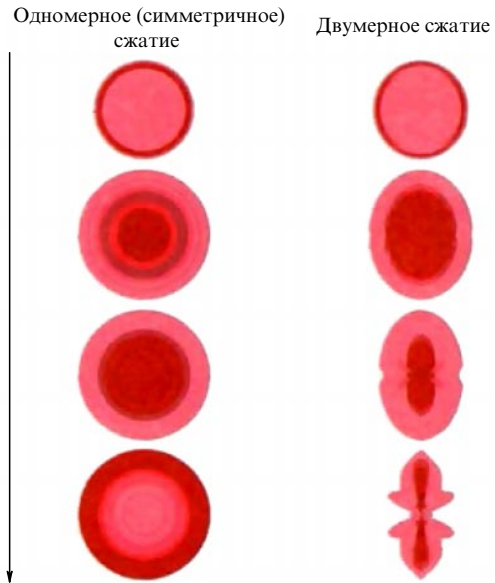
**Рис. 16.** Основные процессы, используемые в расчётной модели.



**Рис. 17.** (В цвете онлайн.) Схема распространения излучения и распределение плотности в мишени.



**Рис. 18.** (В цвете онлайн.) Форма возмущения.



**Рис. 19.** (В цвете онлайн.) Динамика сжатия лазерных термоядерных мишеней.

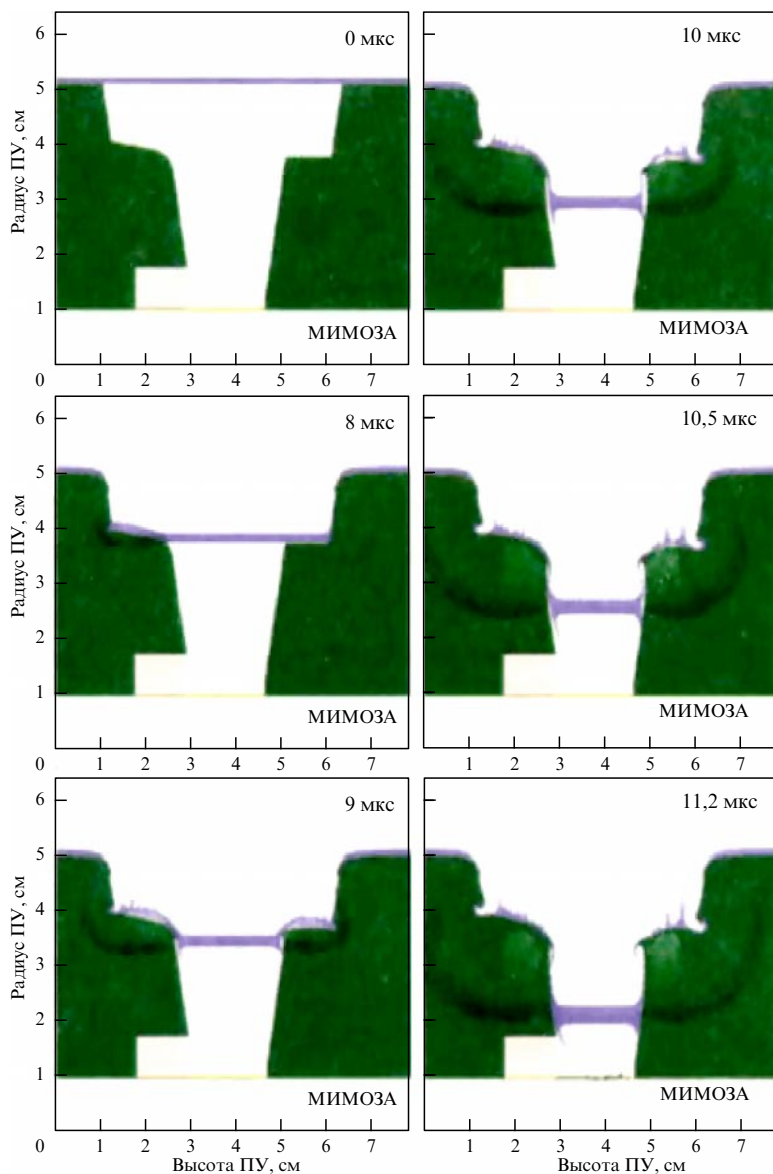
ченные у нас в институте при жизни Игоря Васильевича Курчатова, который, понимая их важность, всегда интересовался этими исследованиями. Сиреневым цветом показано положение на настоящее время. Видно, что исследовано подавляющее большинство элементов (включая, в частности, ряд трансурановых элементов, которые на диаграмме не показаны).

К настоящему времени мы исследовали ударное сжатие более 250 различных веществ. Помимо элементов в это число входят сплавы, гидриды, нитриды, окислы, минералы и другие вещества.

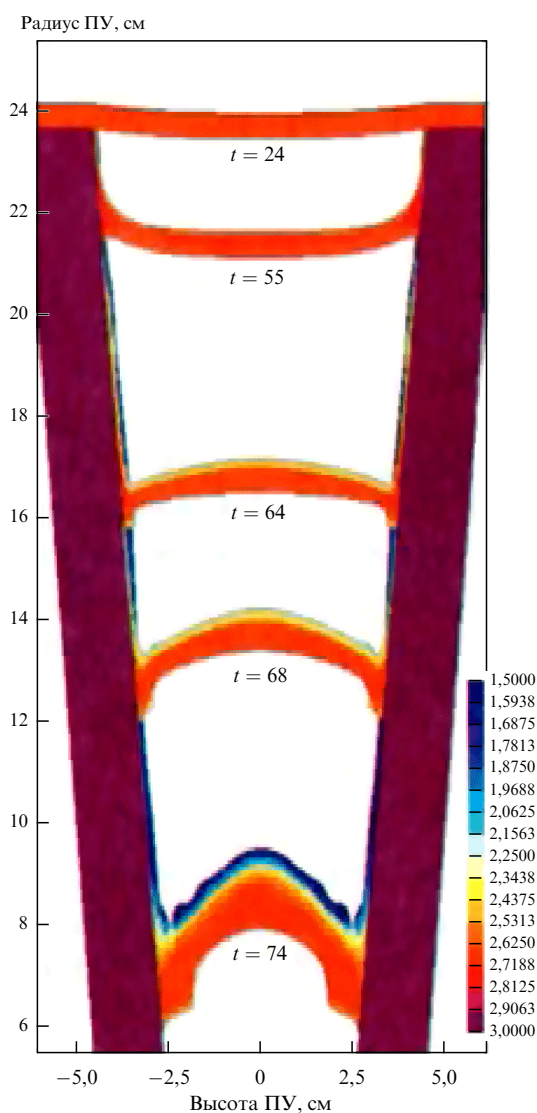
Остановимся несколько подробнее на исследовании ударного сжатия конденсированного дейтерия, в поведении которого исследователи Ливерморской лаборатории обнаружили аномалию, связанную с резким возрастанием плотности на его ударной адиабате. Исследовался жидкий дейтерий. Результаты представлены на рис. 4. Координаты: давление–плотность. Способ создания давления — облучение дейтериевой мишени мощным лазерным пучком установки NOVA. Плоский образец дейтерия со стороны потока излучения прикрывался алюминиевой фольгой, транслирующей в дейтерий ударную волну мегабарной амплитуды.

До давления 0,3 Мбар данные получены на двухкаскадной газовой пушке (Ливермор); при мегабарном давлении (эксперименты обозначены треугольниками) — там же, с использованием NOVA.

Возрастание плотности при давлении 500 кбар столь необычно, что многие учёные и у нас, и за рубежом выразили сомнения в правильности ливерморских результатов. Эти сомнения основаны как на недостаточно чёткой записи массовой скорости, так и на влиянии на регистрируемые параметры возможной неравновесности процессов на границе экран–дейтерий. Такие процессы при толщине исследуемых образцов в десятки доли миллиметров могут сказаться и на значениях сжатия дейтерия. И хотя прямых ошибок в измерениях как будто и нет, необычность положения кривой сжатия требовала независимой проверки с использованием других технических возможностей.



**Рис. 20.** (В цвете онлайн.) Двумерный МГД-расчёт сжатия цилиндрического Al-лайнера в пондеромоторном узле (ПУ) с различной формой торцевых электродов ПУ (Cu): возможно существенное взаимодействие лайнера с электродами, препятствующее эффективности использования лайнера. Изокарты плотности на последовательные моменты времени. Характеристики лайнера в расчёте: радиус  $R = 5$  см, толщина  $A = 2$  мм; ток  $I_{\max} = 22$  МА ( $\tau_{1/4} = 6$  мкс, установка ATLAS, США, планируемый эксперимент RUS-8); скорость  $\sim 7$  км/с на радиусе  $\sim 2$  см.



**Рис. 21.** (В цвете онлайн.) Результаты двумерного МГД-расчёта ускорения цилиндрического Al-лайнера, подтверждённые совместным ВНИИЭФ–ЛАНЛ экспериментом HEL-1. Изокарты плотности лайнера на различные времена [мкс]. Лайнер ускорялся током  $\sim 100$  МА непосредственно от 5-модульного ДВМГ  $\varnothing 1$  м и имел следующие основные характеристики:  $R = 24$  см,  $A = 4$  мм,  $H = 10$  см; скорость  $\sim 8$  км/с на радиусе  $\sim 6$  см.

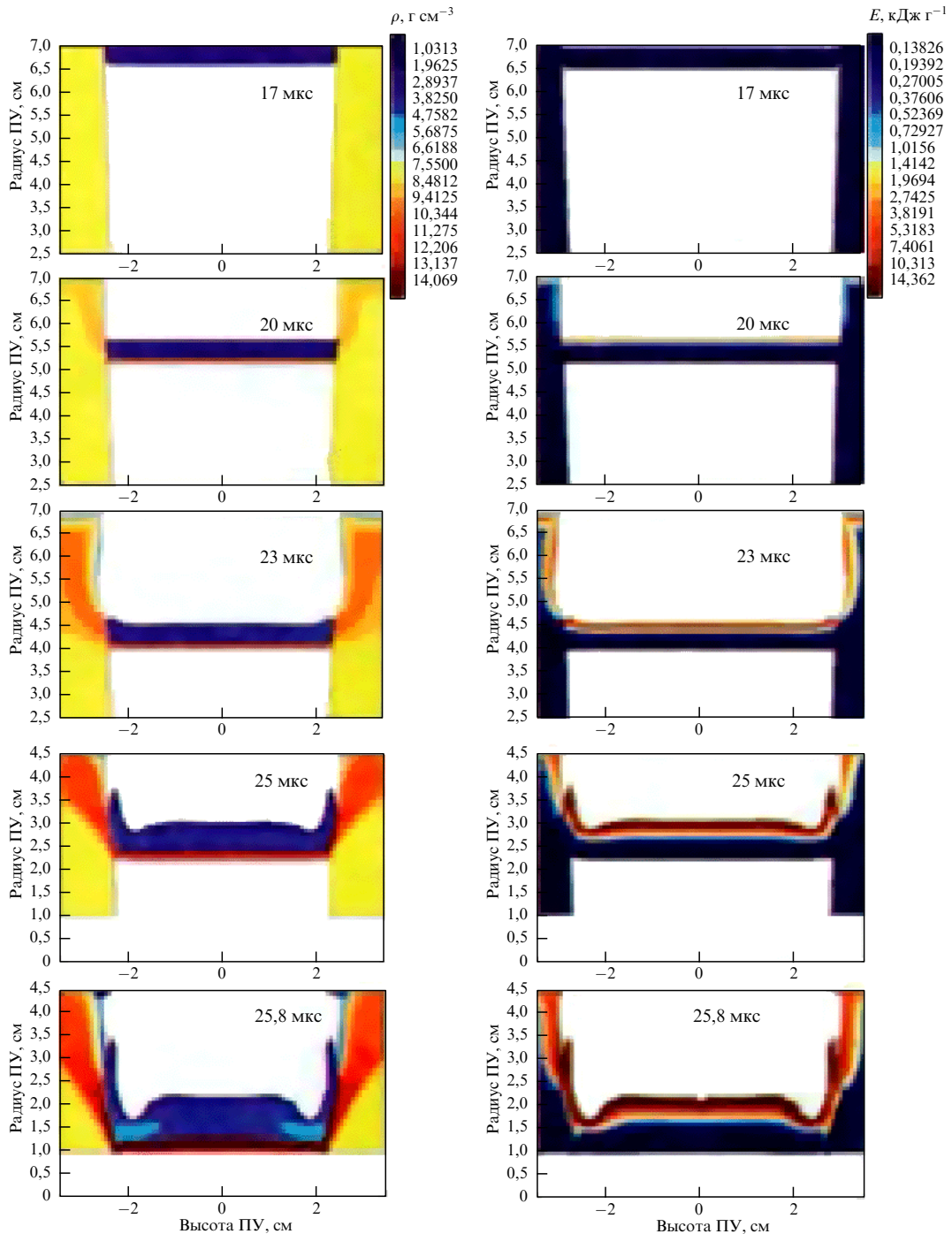
Такие возможности предоставляют нам, в частности, взрывные системы со сжатием полусферических оболочек к центру. В существующих устройствах скорость полёта оболочки вблизи центра системы достигает 24 км/с. При её ударе по ядру, содержащему дейтерий, в последнем возникают давления, примерно равные 1,1 Мбар. Преимущество сферических систем — существенно большие (в 10–20 раз) толщины образцов (дейтерия).

Эксперименты с дейтерием у нас были начаты в 2000 году. По техническим причинам мы начали измерения на твёрдом дейтерии, считая, что выводы, полученные на нём, в равной мере распространяются и на жидкий дейтерий.

В настоящее время у нас получены данные по сжатию твёрдого<sup>1</sup> дейтерия при давлении 0,6 и 1,1 Мбар. Точки — красные звёзды — являются усреднёнными результатами по нескольким опытам. Они приведены на рис. 4. В последнее время контрольные измерения проведены на жидком дейтерии при давлении 500 кбар. Предварительные данные соответствуют измерениям на твёрдом дейтерии.

Видно, что наши данные фиксируют плавные монотонные зависимости — без аномального возрастания плотности.

<sup>1</sup> Здесь и везде, где говорится о твёрдом и жидком дейтерии, имеется в виду их исходное состояние.



**Рис. 22.** (В цвете онлайн.) Результаты двумерного МГД-расчёта, показывающие эффективное ускорение цилиндрического двухслойного лайнера токком непосредственно от 25-модульного ДВМГ  $\varnothing 0,4$  м (для планировавшегося ударно-волнового эксперимента HEL-2). Параметры лайнера:  $R = 7$  см,  $L = 3,5$  мм Al + 0,7 мм Mo,  $H = 7$  см,  $I_{\max} = 80$  МА, скорость 14,5 км/с на радиусе 1 см.

На рисунке 4 представлена также расчётная адиабата дейтерия по известному уравнению состояния (УРС) SESAM, которое в США является производственным. Кроме того, зелёными ромбиками приведены данные Сандийской лаборатории, полученные (примерно в одно время с нашей экспериментальной точкой на твёрдом дейтерии при давлении 600 кбар) на системе с разгоном ударника сильным магнитным полем. Несмотря на значительный "разброс" экспериментальных точек, их данные также не подтверждают измерения на NOVA.

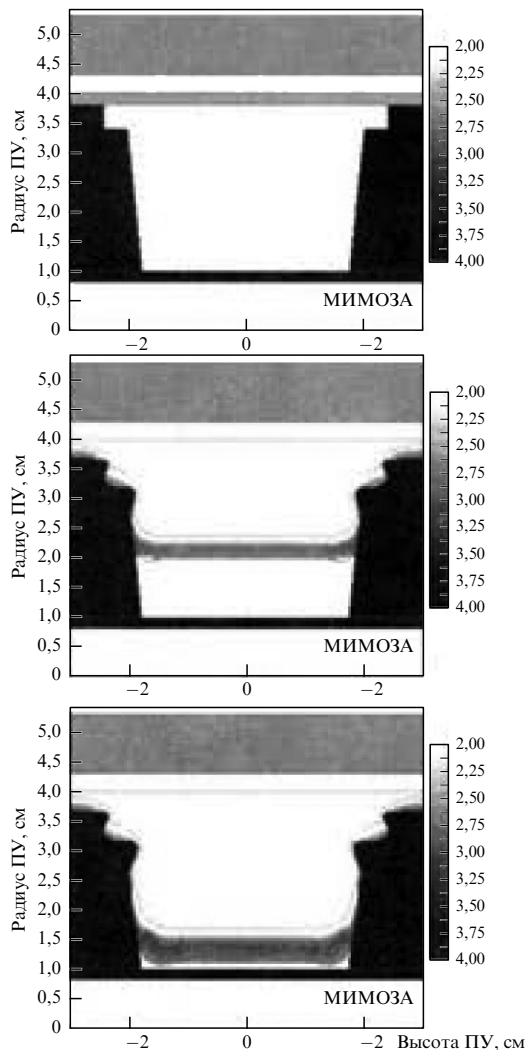
Можно, по-видимому, с большой долей уверенности утверждать, что эксперименты на NOVA ошибочны.

Тем не менее в наши планы входит завершение исследований конденсированного и жидкого дейтерия и начало исследования сжимаемости протия.

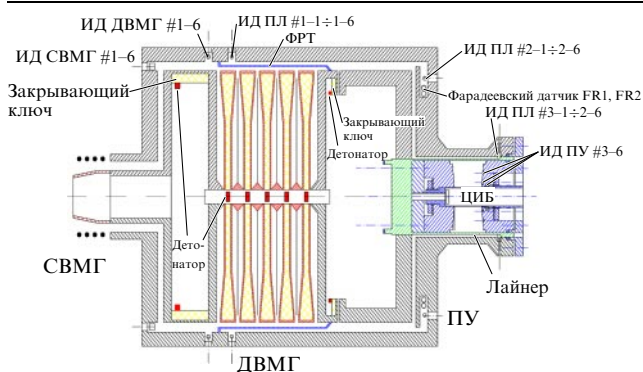
Устройство для экспериментального исследования свойств дейтерия приведено на рис. 5 и 6. В течение ряда лет ведутся работы по квазиизэнтропической сжимаемости газообразных водорода и дейтерия.

С этой целью используются цилиндрические взрывные устройства, в которых металлическая оболочка,

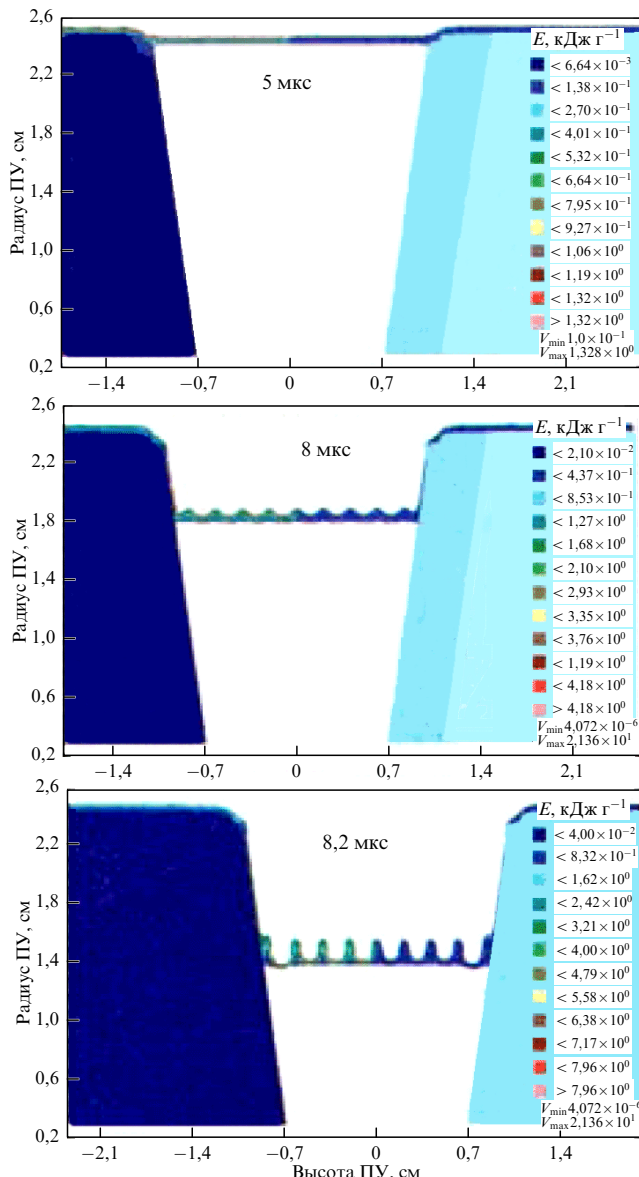




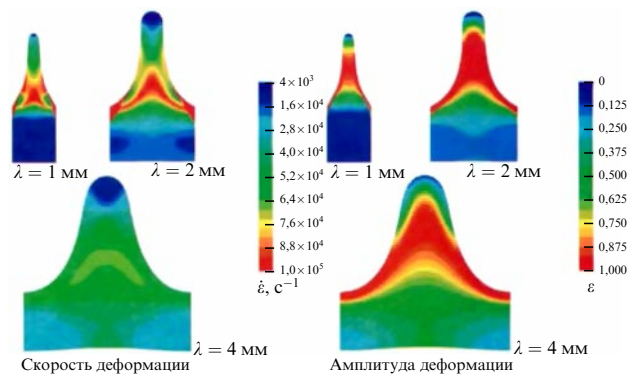
**Рис. 23.** Результаты двумерного МГД-расчёта ускорения цилиндрического Al-лайнера, подтверждённые совместными ВНИИЭФ-ЛАНЛ экспериментами ALT-1, 2. Лайнер имел практически синхронное соударение с цилиндрической мишенью  $\varnothing 2$  см. Лайнер ускорялся током от 10-модульного ДВМГ  $\varnothing 0,4$  метра с ФРТ,  $I_{\max} = 31-32$  МА, имел скорость  $v_{\max} = 11-12$  км/с при начальных параметрах:  $R = 4$  см,  $\Delta = 2$  мм,  $H = 4$  см.



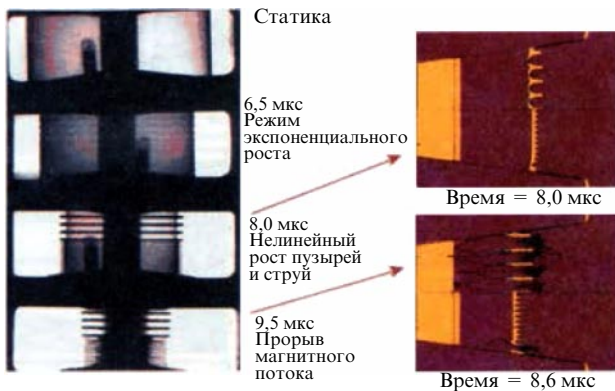
**Рис. 24.** (В цвете онлайн.) Схема взрывомагнитного лайнерного устройства в эксперименте ALT-1. Основные узлы: спиральный ВМГ (СВМГ, предусилитель тока), 10-модульный ВМГ  $\varnothing 0,4$  м (ДВМГ, основной усилитель тока), ФРТ (фольговый размыкатель тока), лайнерный ПУ  $\varnothing 8$  см с центральным измерительным блоком  $\varnothing 2$  см, взрывные замыкающие ключи в цепях СВМГ-ДВМГ и ФРТ-ПУ. ИД — индуктивный датчик; ПЛ — передающая линия; ПУ — пондеромоторный узел; ЦИБ — центральный измерительный блок.



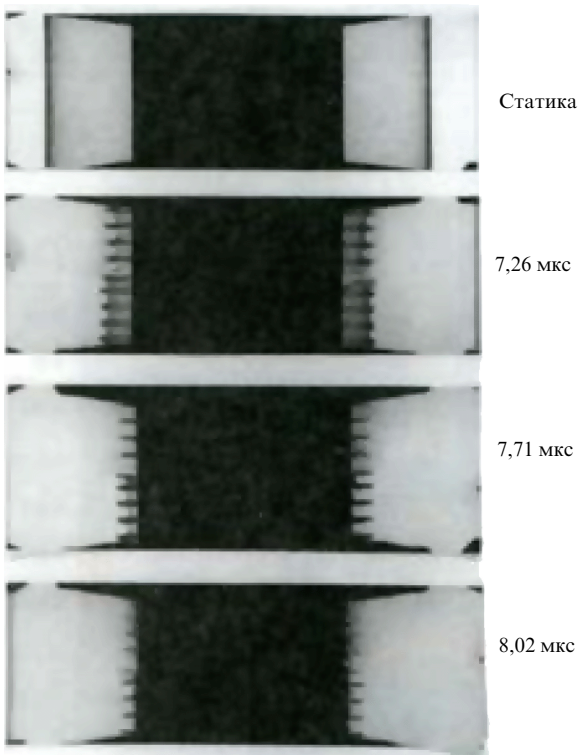
**Рис. 25.** (В цвете онлайн.) Двумерный МГД-расчёт роста возмущений токонесящего лайнера в ПУ для эксперимента RUS-1 на конденсаторной установке Pegasus-2 (ЛАНЛ), ток 6,5 МА. Лайнер изготовлен из химически чистого алюминия (А995). Радиус лайнера  $R = 24$  мм и средняя толщина  $\Delta = 0,5$  мм;  $\lambda = 2$  мм и  $A_0 = 25$  мкм — длина волны и начальная амплитуда (от "впадины" до "горба") аксиально-симметричных возмущений наружной поверхности лайнера.



**Рис. 26.** (В цвете онлайн.) Типичные расчётные условия деформирования исследуемых материалов: деформация  $\epsilon \sim 100\%$ , скорость деформации  $\dot{\epsilon} \cong 10^5-10^6$  с<sup>-1</sup>.



**Рис. 27.** (В цвете онлайн.) Результаты исследований в Лос-Аламосской национальной лаборатории (ЛАНЛ) технического чистого алюминия (Al-1100). Рентгеновские снимки получены на стадиях экспоненциального роста одномодовых начальных возмущений ( $\lambda = 2$  мм,  $\lambda = 0,75$  мм,  $A_{pp} = 50$  мкм), их нелинейного роста и после прорыва магнитного потока при токе 6,2 МА.



**Рис. 28.** Копии рентгенограмм лайнера в эксперименте RUS-1 при токе 6,5 МА. Лайнер изготовлен из химически чистого алюминия (A995, нижняя половина лайнера) и из сплава АМг-6 (верхняя половина лайнера). Радиус лайнера  $R = 24$  мм и средняя толщина  $\Delta = 0,5$  мм;  $\lambda = 2$  мм и  $A_0 = 25$  мкм — длина волны и начальная амплитуда (от "впадины" до "горба") аксиально-симметричных возмущений наружной поверхности лайнера. Измеренные амплитуды этих возмущений:  $A_1 = 0,9$  мм ( $t_1 = 7,26$  мкс),  $A_2 = 1,7$  мм ( $t_2 = 7,71$  мкс) — для А995;  $A_1 = 1,7$  мм ( $t = 7,26$  мкс) — для АМг-6.

разогнанная взорванным ВВ, квазиизэнтропически сжимает полость с газообразным водородом или дейтерием. Геометрия сжатого газа определяется рентгенографическим методом.



**Рис. 29.** (В цвете онлайн.) Цилиндрический лайнерный ПУ для экспериментов RUS-6, 7 на установке ATLAS по исследованию динамической прочности меди. (а) Наружный (токонесущий) Al-лайнер радиусом  $R = 31$  мм, толщиной  $\Delta = 2$  мм. Слева — промежуточный полиэтиленовый слой трёхслойной лайнерной системы. (б) Процесс сборки ПУ. Слева (на руке) — фрагмент ПУ с Cu-лайнером, на котором нанесены осесимметричные начальные возмущения. (в) ПУ в сборе с обратным токопроводом.

Эскиз устройства, его фотография, схема эксперимента, экспериментальные рентгенограммы и график приведены на рис. 7–11.

## 2. Использование сверхсильных магнитных полей для исследования свойств веществ при высоком давлении

Генератор сверхсильных магнитных полей МК-1, предложенный А.Д. Сахаровым, широко используется в исследованиях по физике высоких давлений и темпера-

тур. В результате многолетней работы группы сотрудников ВНИИЭФ удалось создать каскадный генератор воспроизводимых магнитных полей 10-мегагауссного (10 МГс) диапазона.

На основе этого генератора разработано устройство изэнтропического сжатия веществ, в том числе замороженных газов, мегабарным давлением сверхсильного магнитного поля.

Схема каскадного генератора МК-1 и некоторые результаты исследований представлены на рис. 12 и 13.

### 3. Расчётно-теоретические методы исследований

Расчёты на мощных вычислительных комплексах стали, особенно в последние годы, обязательным инструментом исследователя для получения новых знаний о работе сложных гидродинамических устройств. Рассмотрим, как используются расчётные методы в задаче по сжатию сферической мишени под действием лазерного излучения.

Во ВНИИЭФ проводятся эксперименты, в которых исследуется сжатие сферических мишеней различных конструкций. На рисунке 14 приведены некоторые экспе-

риментальные данные, полученные на установке ИСКРА-5: 12 каналов, энергия — 10 кДж, длительность импульса — 0,3 нс.

В экспериментах было получено: скорость оболочки  $3 \times 10^7$  см/с; температура DT-газа — 1,5–4 кэВ; плотность — 1–2 г/см<sup>3</sup>; нейтронный выход  $2 \times 10^{10}$  н/с.

Чтобы корректно рассчитать сжатие мишени на современной лазерной установке с большим числом лучей (типа NIF или ИСКРА-6), необходимо использовать супер-ЭВМ с производительностью  $> 100$  Tflops (см. рис. 15 и таблицу).

Поэтому ограничимся самыми простыми одномерными и двумерными расчётами с начальными данными, приведёнными на рис. 16–18. Приводятся результаты двух расчётов.

В обоих расчётах использовалась сферическая геометрия, а температура излучения в одном из них задавалась сферически симметричной, в другом — зависимость от угла в виде второй гармоники с изменением температуры от угла  $\Delta T/T = 2,7\%$  (рис. 18).

Из результатов расчётов следует, что мишень со сферически симметричным значением температуры загорается, а мишень с асимметричной температурой обеспечивает малые сжатия топлива, имеет в процессе сжатия сильные искажения формы и не обеспечивает термоядерную вспышку. Это означает, что уровень симметрии по температуре  $\sim 2,7\%$  является неудовлетворительным.

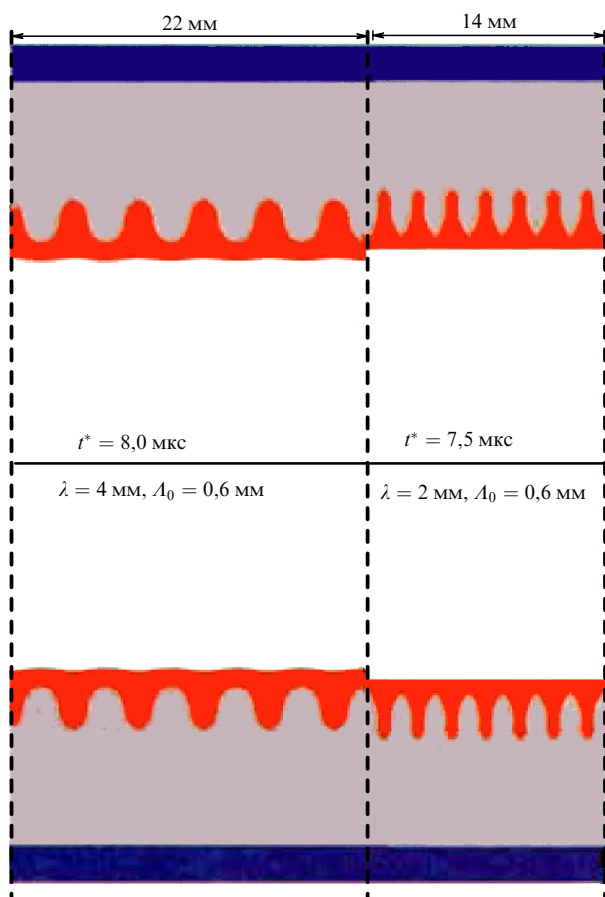
Динамика сжатия лазерных термоядерных мишеней изображена на рис. 19.

### 4. Исследование свойств веществ с использованием лайнерных систем в мощных импульсных электрофизических установках (дисковые ВМГ ВНИИЭФ и конденсаторные установки США Pegasus, ATLAS)

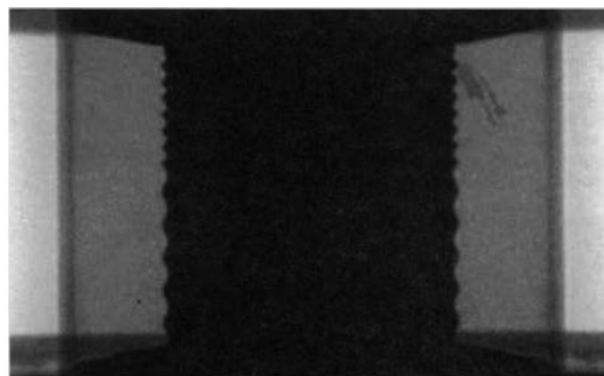
Расчёты взаимодействия лайнера с торцевыми стенками разной формы (рис. 20–23).

Создание взрывомагнитных установок для изучения уравнения состояния веществ в больших объёмах при давлениях до 30 Мбар (рис. 22–24).

Исследования динамической прочности материалов по росту начальных возмущений лайнеров (рис. 25–31).



**Рис. 30.** (В цвете онлайн.) Картина максимально выросших возмущений внутреннего медного слоя в трёхслойной лайнерной системе — по расчётам для экспериментов RUS-6, 7 на конденсаторной установке ATLAS ( $I_{\max} = 19\text{--}22$  МА, промежуточный слой — из полиэтилена, радиусы трёх слоёв 16–18–29–31 мм). Характерное расчётное давление на слой исследуемого материала ( $P_{\text{хар}} \approx 100\text{--}150$  кбар) нарастает за  $\sim 1$  мкс и поддерживается в течение 2–3 мкс.



**Рис. 31.** Статическая рентгенограмма трёхслойной лайнерной системы с начальными возмущениями внутреннего Cu-слоя лайнера:  $\lambda = 2$  и 4 мм,  $A_0 = 0,6$  мм (для эксперимента RUS-6).

В экспериментах RUS-2 и RUS-5 исследовалась динамическая прочность алюминиевого сплава В95 и технически чистого алюминия АДО. Начальные и измененные амплитуды возмущений в этих экспериментах таковы:

$$A_0 = 9 \text{ мкм}, \quad A_1 \approx 0,3 \text{ мм} (t_1 = 7,24 \text{ мкс}), \\ A_2 \approx 0,7 \text{ мм} (t_2 = 7,63 \text{ мкс}) \text{ для В95}, \\ A_0 = 40 \text{ мкм}, \quad A_1 \approx 0,3 \text{ мм} (t_1 = 6,0 \text{ мкс}), \\ A_2 \approx 0,7 \text{ мм} (t_2 = 6,7 \text{ мкс}) \text{ для АДО}.$$

Некоторые из экспериментальных данных были предсказаны предэкспериментальными расчётами (для сплава АМг-6, АДО), другие результаты используются для усовершенствования моделей сдвиговой прочности материалов.

Оказалось, в частности, что четыре исследовавшихся материала имели в экспериментах близкую динамическую прочность, хотя их квазистатические пределы текучести отличаются между собой до 40 раз.

## Список литературы

- Альтшулер Л В "Применение ударных волн в физике высоких давлений" *УФН* **85** 199 (1965); Al'tshuler L V "Use of shock waves in high-pressure physics" *Sov. Phys. Usp.* **8** 52 (1965)
- Сахаров А Д, Людаев Р З, Смирнов Е Н, Плюшев Ю И, Павловский А И, Чернышев В К, Феоктистова Е А, Жаринов Е И, Зысин Ю А "Магнитная кумуляция" *ДАН СССР* **165** (1) 65 (1965); Sakharov A D, Lyudaev R Z, Smirnov E N, Plyushchev Yu I, Pavlovskii A I, Chernyshev V K, Feoktistova E A, Zharinov E A, Zysin Yu A "Magnetic cumulation" *Sov. Phys. Dokl.* **10** 1045 (1966); Сахаров А Д, Людаев Р З, Смирнов Е Н, Плюшев Ю И, Павловский А И, Чернышев В К, Феоктистова Е А, Жаринов Е И, Зысин Ю А "Магнитная кумуляция" *УФН* **161** (5) 47 (1991); Sakharov A D, Lyudaev R Z, Smirnov E N, Plyushchev Yu I, Pavlovskii A I, Chernyshev V K, Feoktistova E A, Zharinov E A, Zysin Yu A *Sov. Phys. Usp.* **34** 385 (1991)
- Сахаров А Д "Взрывомагнитные генераторы" *УФН* **88** 725 (1966); Sakharov A D "Magnetoimplosive generators" *Sov. Phys. Usp.* **9** 294 (1966)
- Кормер С Б "Оптические исследования свойств ударно сжатых конденсированных диэлектриков" *УФН* **94** 641 (1968); Kormer S B "Optical study of the characteristics of shock-compressed condensed dielectrics" *Sov. Phys. Usp.* **11** 229 (1968)
- Альтшулер Л В, Баканова А А "Электронная структура и сжимаемость металлов при высоких давлениях" *УФН* **96** 193 (1968); Al'tshuler L V, Bakanova A A "Electronic structure and compressibility of metals at high pressures" *Sov. Phys. Usp.* **11** 678 (1969)
- Фортвов В Е "Динамические методы в физике плазмы" *УФН* **138** 361 (1982); Fortov V E "Dynamic methods in plasma physics" *Sov. Phys. Usp.* **25** 781 (1982)
- Анисимов С И, Прохоров А М, Фортвов В Е "Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях" *УФН* **142** 395 (1984); Anisimov S I, Prokhorov A M, Fortov V E "Application of high-power lasers to study matter at ultrahigh pressures" *Sov. Phys. Usp.* **27** 181 (1984)
- Аврорин Е Н, Водолага Б К, Симоненко В А, Фортвов В Е "Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества" *УФН* **163** (5) 1 (1993); Avrorin E N, Vodolaga B K, Simonenko V A, Fortov V E "Intense shock waves and extreme states of matter" *Phys. Usp.* **36** 337 (1993)
- Трунин Р Ф "Ударная сжимаемость конденсированных веществ в мощных ударных волнах подземных ядерных взрывов" *УФН* **164** 1215 (1994); Trunin R F "Shock compressibility of condensed materials in strong shock waves generated by underground nuclear explosions" *Phys. Usp.* **37** 1123 (1994)
- Альтшулер Л В, Трунин Р Ф, Крупников К К, Панов Н В "Взрывные лабораторные устройства для исследования сжатия веществ в ударных волнах" *УФН* **166** 575 (1996); Al'tshuler L V, Trunin R F, Krupnikov K K, Panov N V "Explosive laboratory devices for shock wave compression studies" *Phys. Usp.* **39** 539 (1996)
- Альтшулер Л В, Зельдович Я Б, Стяжкин Ю М "Исследование изэнтропической сжимаемости и уравнений состояния делящихся материалов" *УФН* **167** 107 (1997); Al'tshuler L V, Zel'dovich Ya B, Styazhkin Yu M "Investigation of isentropic compression and equations of state of fissionable materials" *Phys. Usp.* **40** 101 (1997)
- Da Silva L B, Celliers P, Collins G W, Budil K S, Holmes N C, Barbee T W (Jr.), Hammel B A, Kilkenny J D, Wallace R J, Ross M, Cauble R, Ng A, Chiu G "Absolute equation of state measurements on shocked liquid deuterium up to 200 GPa (2 Mbar)" *Phys. Rev. Lett.* **78** 483 (1997)
- Фунтиков А И "Взрывные лабораторные устройства для определения динамической сжимаемости пористых веществ в области давлений от 0,1 до 1 ТПа" *УФН* **167** 1119 (1997); Funtikov A I "Explosive laboratory devices for the measurement of the dynamic compressibility of porous substances in the pressure range from 0.1 to 1 TPa" *Phys. Usp.* **40** 1067 (1997)
- Atchison W L, Faehl R J, Reinovsky R E "Evaluation of magneto Rayleigh-Taylor mode growth using comparisons of 2D calculations with radiographic data", in *Digest of Technical Papers. 11th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., 1997* Vol. 1 (Cat. No. 97CH36127) (Piscataway, NJ: IEEE, 1997) p. 372, <https://doi.org/10.1109/ppc.1997.679359>
- Collins G W, Celliers P, Da Silva L B, Cauble R, Gold D, Foord M, Budil K S, Stewart R, Holmes N C, Ross M, Hammel B A, Kilkenny J D, Wallace R J, Ng A "Equation of state measurements of hydrogen isotopes on Nova" *Phys. Plasmas* **5** 1864 (1998)
- Collins G W, Da Silva L B, Celliers P, Gold D M, Foord M E, Wallace R J, Ng A, Weber S V, Budil K S, Cauble R "Measurements of the equation of state of deuterium at the fluid insulator-metal transition" *Science* **281** 1178 (1998)
- Альтшулер Л В, Трунин Р Ф, Урлин В Д, Фортвов В Е, Фунтиков А И "Развитие в России динамических методов исследований высоких давлений" *УФН* **169** 323 (1999); Al'tshuler L V, Trunin R F, Urlin V D, Fortov V E, Funtikov A I "Development of dynamic high-pressure techniques in Russia" *Phys. Usp.* **42** 261 (1999)
- Reinovsky R E "Pulsed power experiments in hydrodynamics and material properties", in *Digest of Technical Papers. 12th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., 1999* Vol. 1 (Cat. No.99CH36358) (Piscataway, NJ: IEEE, 1999) p. 38, <https://doi.org/10.1109/PPC.1999.825420>
- Wood B P, Trainor R J, Keinigs R K "Shock compression experimental capabilities of the Atlas facility" *AIP Conf. Proc.* **505** 1163 (2000)
- Reinovsky R E, Trainor R J "Hydrodynamic and material properties experiments using pulsed power techniques" *AIP Conf. Proc.* **505** 1159 (2000)
- Hall C A, Asay J R, Trott W M, Knudson M, Fleming K J, Bernard M A, Clark B F, Hauer A, Kyrala G "Aluminum Hugoniot measurements on the Sandia Z accelerator" *AIP Conf. Proc.* **505** 1171 (2000)
- Трунин Р Ф "Сжатие конденсированных веществ высокими давлениями ударных волн (лабораторные исследования)" *УФН* **171** 387 (2001); Trunin R F "Shock compression of condensed materials (laboratory studies)" *Phys. Usp.* **44** 371 (2001)
- Knudson M D, Hanson D L, Bailey J E, Hall C A, Asay J R, Anderson W W "Equation of state measurements in liquid deuterium to 70 GPa" *Phys. Rev. Lett.* **87** 225501 (2001)
- Nellis W J "Shock compression of deuterium near 100 GPa pressures" *Phys. Rev. Lett.* **89** 165502 (2002)
- Kerley G I "Equations of state for hydrogen and deuterium", Sandia Report SAND2003-3613, Unlimited Release (Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2003)
- Илькаев Р И, Фортвов В Е, Буланников А С, Буртсев В В, Голубев В А, Голубков А Н, Давыдов Н В, Зhernokletov M В, Kirshanov S I, Manachkin S F, Medvedev A B, Mikhaylov A L, Mochalov M A, Orlov V D, Khrustalev V V, Yaroshenko V V "Quasi-isentropic

- compressibility of gaseous deuterium in pressure range up to 300 GPa" *AIP Conf. Proc.* **706** 73 (2004)
27. Faehl R J, Anderson B G, Clark D A, Ekdahl C A, Goforth J H, Lindemuth I R, Reinovsky R E, Sheehy P T, Peterson T, Tabaka L J, Chernyshev V K, Mokhov V N, Buzin V N, Burenkov O M, Buyko A M, Vakhrushev V V, Garanin S F, Grinevich B E, Ivanova G G, Demidov V A, Dudoladov V I, Zmushko V V, Kuzyaev A I, Kucherov A I, Lovyagin B M, Nizovtsev P N, Petrukhin A A, Pishurov A I, Sofronov V N, Sokolov S S, Solovyeu V P, Startsev A I, Yakubov V B, Gubkov E V "Results of a 100-megaampere liner implosion experiment" *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 1972 (2004)
  28. Reinovsky R, Anderson W, Atchison W, Bartsch R, Clark D, Ekdahl C, Faehl R, Goforth J, Keinigs R, Lindemuth I, Morgan D, Rodriguez G, Shlachter J, Tasker D "Stability of magnetically imploded liners for high energy density experiments", in *Proc. of the VIIIth Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Tallahassee, Florida, USA, 18–23 October 1998* (Ed. H J Schneider-Muntau) (Singapore: World Scientific, 2004) p. 473
  29. Boriskov G V, Bykov A I, Il'kaev 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" *Phys. Rev. B* **71** 092104 (2005)
  30. Аврорин Е Н, Симоненко В А, Шибаршов Л И "Физические исследования при ядерных взрывах" *УФН* **176** 449 (2006); Avrorin E N, Simonenko V A, Shibarshov L I "Physics research during nuclear explosions" *Phys. Usp.* **49** 432 (2006)
  31. Симоненко В А "Исследования высокоинтенсивных процессов и экстремальных состояний веществ с помощью ядерных взрывов; некоторые применения результатов" *УФН* **176** 889 (2006); Simonenko V A "Nuclear explosions as a probing tool for high-intensity processes and extreme states of matter: some applications of results" *Phys. Usp.* **49** 861 (2006)
  32. Фортов В Е "Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества" *УФН* **177** 347 (2007); Fortov V E "Intense shock waves and extreme states of matter" *Phys. Usp.* **50** 333 (2007)
  33. Fortov V E, Il'kaev R I, Arinin V A, Burtzev V V, Golubev V A, Iosilevskiy I L, Khrustalev V V, Mikhailov A L, Mochalov M A, Ternovoi V Ya, Zhernokletov M V "Phase transition in a strongly nonideal deuterium plasma generated by quasi-isentropic compression at megabar pressures" *Phys. Rev. Lett.* **99** 185001 (2007)
  34. Канель Г И, Фортов В Е, Разоренов С В "Ударные волны в физике конденсированного состояния" *УФН* **177** 809 (2007); Kanel G I, Fortov V E, Razorenov S V "Shock waves in condensed-state physics" *Phys. Usp.* **50** 771 (2007)
  35. Buyko A M, Garanin S F, Karmishin D V, Mokhov V N, Sokolova N V, Yakubov V B, Zmushko V V "Analysis of the liner stability in various experiments" *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** (1) 4 (2008)
  36. Попов Н А, Щербakov В А, Минеев В Н, Зайдель Р М, Фунтиков А И "О термоядерном синтезе при взрыве сферического заряда (проблема газодинамического термоядерного синтеза)" *УФН* **178** 1087 (2008); Popov N A, Shcherbakov V A, Mineev V N, Zaydel' P M, Funtikov A I "Thermonuclear fusion in the explosion of a spherical charge (the problem of a gas-dynamic thermonuclear fusion)" *Phys. Usp.* **51** 1047 (2008)
  37. Buyko A M, Zmushko V V, Atchison W L, Reinovsky R E "Results and prospects of material strength studies on electrophysical facilities based on perturbation growth in liner systems" *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** (1) 104 (2008)
  38. Фортов В Е, Хоффманн Д, Шарков Б Ю "Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества" *УФН* **178** 113 (2008); Fortov V E, Hoffmann D H H, Sharkov B Yu "Intense ion beams for generating extreme states of matter" *Phys. Usp.* **51** 109 (2008)
  39. Фортов В Е "Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе" *УФН* **179** 653 (2009); Fortov V E "Extreme states of matter on Earth and in space" *Phys. Usp.* **52** 615 (2009)
  40. Буйко А М, Гаранин С Ф, Змушко В В, Калашников В М, Мохов В Н, Соколова Н В, Якубов В Б "Анализ возможностей стабилизации импльзии конденсированных лайнеров" *Прикладная механика и техническая физика* **50** (3) 3 (2009);
  41. Буико А М, Гаранин С Ф, Змушко В В, Калашников В М, Мохов В Н, Соколова Н В, Якубов В В "On stabilization of implosion of condensed liners" *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **50** 361 (2009)
  42. Трунин Р Ф, Урлин В Д, Медведев А Б "Динамическое сжатие изотопов водорода при мегабарных давлениях" *УФН* **180** 605 (2010); Trunin R F, Urlin V D, Medvedev A B "Dynamic compression of hydrogen isotopes at megabar pressures" *Phys. Usp.* **53** 577 (2010)
  43. Ильяев Р И "О фундаментальных физических исследованиях во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики" *УФН* **181** 405 (2011); Il'kaev R I "Fundamental physics research at the All-Russian Research Institute of Experimental Physics" *Phys. Usp.* **54** 387 (2011)
  44. Михайлов А Л, Невмержицкий Н В, Раевский В А "Гидродинамические неустойчивости" *УФН* **181** 410 (2011); Mikhailov A L, Nevmerzhtskii N V, Raevskii V A "Hydrodynamic instabilities" *Phys. Usp.* **54** 392 (2011)
  45. Трунин Р Ф "Исследования экстремальных состояний металлов с использованием ударных волн" *УФН* **181** 416 (2011); Trunin R F "Extreme states of metals: investigation using shock wave techniques" *Phys. Usp.* **54** 397 (2011)
  46. Гриневич Б Е, Демидов В А, Ивановский А В, Селемир В Д "Взрывомагнитные генераторы энергии и их применение в научных экспериментах" *УФН* **181** 422 (2011); Grinevich B E, Demidov V A, Ivanovsky A V, Selemir V D "Explosive magnetic generators and their application in scientific experiments" *Phys. Usp.* **54** 403 (2011)
  47. Подурец А М "Импульсные рентгенографические исследования структуры веществ в ударных волнах" *УФН* **181** 427 (2011); Podurets A M "Pulsed X-ray diffraction structure study of shocked materials" *Phys. Usp.* **54** 408 (2011)
  48. Гаранин С Г "Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии" *УФН* **181** 434 (2011); Garanin S G "High-power lasers and their applications in high-energy-density physics studies" *Phys. Usp.* **54** 415 (2011)
  49. Борисков Г В, Быков А И, Долотенко М И, Егоров Н И, Кудасов Ю Б, Платонов В В, Селемир В Д, Таценко О М "Физические исследования в сверхсильных магнитных полях" *УФН* **181** 441 (2011); Boriskov G V, Bykov A I, Dolotenko M I, Egorov N I, Kudasov Yu B, Platonov V V, Selemir V D, Tatsenko O M "Research in ultrahigh magnetic field physics" *Phys. Usp.* **54** 421 (2011)
  50. Мочалов М А, Ильяев Р И, Фортов В Е, Михайлов А Л, Макаров Ю М, Аринин В А, Бликов А О, Баурин А Ю, Комраков В А, Огородников В А, Рыжков А В, Пронин Е А, Юхимчук А А "Измерение квазиизэнтропической сжимаемости гелия и дейтерия при давлениях 1500–2000 ГПа" *ЖЭТФ* **142** 696 (2012); Mochalov M A, Il'kaev R I, Fortov V E, Mikhailov A L, Makarov Yu M, Arinin V A, Blikov A O, Baurin A Yu, Komrakov V A, Ogorodnikov V A, Ryzhkov A V, Pronin E A, Yukhimchuk A A "Measurement of quasi-isentropic compressibility of helium and deuterium at pressures of 1500–2000 GPa" *J. Exp. Theor. Phys.* **115** 614 (2012)
  51. Фортов В Е, Ломоносов И В "Я.Б. Зельдович и проблемы уравнений состояния вещества в экстремальных условиях" *УФН* **184** 231 (2014); Fortov V E, Lomonosov I V "Ya.B. Zeldovich and equation of state problems for matter under extreme conditions" *Phys. Usp.* **57** 219 (2014)
  52. Буйко А М, Гаранин С Ф, Глыбин А М, Гриневич Б Е, Дудай П В, Зименков А А, Змушко В В, Иванова Г Г, Ивановский А В, Краев А И, Мамышев В И, Морозова И В, Скобелев А Н, Якубов В Б "Уточнение параметров устройства для разгона лайнера до 20 км/с" *Прикладная механика и техническая физика* **56** (1) 116 (2015); Buyko A M, Garanin S F, Glynin A M, Grinevich B E, Dudai P V, Zimenkov A A, Zmushko V V, Ivanova G G, Ivanovsky A V, Kraev A I, Mamyshv V I, Morozova I V, Skobelev A N, Yakubov V B "Testing and revision of the parameters of a system for liner driving to 20 km/s" *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **56** 96 (2015)
  53. Буйко А М, Гаранин С Ф "Simulations of the interaction of high-velocity condensed matter liners with walls" *IEEE Trans. Plasma Sci.* **45** 2701 (2017)

53. Мочалов М А, Илькаев Р И, Фортвов В Е, Михайлов А Л, Бликлов А О, Огородников В А, Грязнов В К, Иосилевский И Л "Квазиизэнтропическая сжимаемость сильнонеидеальной плазмы дейтерия при давлениях до 5500 ГПа: эффекты неидеальности и вырождения" *ЖЭТФ* **151** 592 (2017); Mochalov M A, Il'kaev R I, Fortov V E, Mikhailov A L, Blikov A O, Ogorodnikov V A, Gryaznov V K, Iosilevskii I L "Quasi-isentropic compressibility of a strongly nonideal deuterium plasma at pressures of up to 5500 GPa: Nonideality and degeneracy effects" *J. Exp. Theor. Phys.* **124** 505 (2017)
54. Гаранин С Ф, Буйко А М, Якубов В Б "Неустойчивость Рэля–Тейлора высокоскоростных конденсированных лайнеров" *Прикладная механика и техническая физика* **58** (5) 26 (2017); Garanin S F, Buyko A M, Yakubov V B "Rayleigh–Taylor instability of high-velocity condensed-matter liners" *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **58** 779 (2017)
55. Buyko A M "Some promises of magnetic implosion of high-velocity liners in the ALT-3 driver" *IEEE Trans. Plasma Sci.* **46** 3512 (2018)
56. Buyko A M, Ivanova G G, Morozova I V "Simulations of ALT-like explosive magnetic devices for ramp compression of materials by magnetically imploded liners" *Matter Radiat. Extremes* **5** 047402 (2020)
57. Фортвов В Е, Илькаев Р И, Рыкованов Г Н, Селемир В Д, Шарков Б Ю "Взрывы, мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества" *Вестн. РАН* **91** 422 (2021); Fortov V E, Il'kaev R I, Rykovanov G N, Selemir V D, Sharkov B Yu "Explosions, powerful shock waves, and extreme states of matter" *Her. Russ. Acad. Sci.* **91** 239 (2021)
58. Nikolaev D N, Kulish M I, Dudin S V, Mintsev V B, Lomonosov I V, Fortov V E "Measurement of dense plasma temperature of the shock-compressed silicon" *Contrib. Plasma Phys.* e202100113 (2021)
59. Мочалов М А, Илькаев Р И, Фортвов В Е, Ерунов С В, Аринин В А, Бликлов А О, Комраков В А, Максимкин И П, Огородников В А, Рыжков А В, Грязнов В К, Иосилевский И Л, Левашов П Р, Лавриненко Я С, Морозов И В, Минаков Д Г, Парамонов М А, Шутов А В "Сжимаемость неидеальной плазмы дейтерия и гелия до 20 ТПа" *ЖЭТФ* **160** 735 (2021); Mochalov M A, Il'kaev R I, Fortov V E, Erunov S V, Arinin V A, Blikov A O, Komrakov V A, Maksimkin I P, Ogorodnikov V A, Ryzhkov A V, Gryaznov V K, Iosilevskii I L, Levashov P R, Lavrinenko Ya S, Morozov I V, Minakov D G, Paramonov M A, Shutov A V *J. Exp. Theor. Phys.* **133** (5) (2021), <https://doi.org/10.31857/S0044451021110122> in press

### Use of powerful shock and detonation waves to study extreme states of matter

L.V. Al'tshuler<sup>(1)</sup>, R.I. Il'kaev<sup>(2)</sup>, V.E. Fortov<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Institute of Thermophysics of Extreme States (ITES) of the Joint Institute for High Temperatures (JIHT) Russian Academy of Sciences, ul. Izhorskaya 13/19, 127412 Moscow, Russian Federation

<sup>(2)</sup> FSUE "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics" (RFNC – VNIIEF), prosp. Mira 37, 607190 Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation

E-mail: <sup>(2)</sup> [ilkaev@vniief.ru](mailto:ilkaev@vniief.ru)

This article is written on the basis of a report given 10 January 2003 at the International Scientific Conference, The Nuclear Age: Science and Society, dedicated to the 100th anniversary of the birth of Igor' Vasil'evich Kurchatov. It presents the results of work on the experimental study of substance properties under high pressure shock waves, briefly describes the use of super-strong magnetic fields for the study of substances at high pressure, presents the results of computational and theoretical research methods, and presents some results of studies of substance properties using liner systems in high-power pulsed electrophysical facilities (VNIIEF disk explosion-magnetic generators and USA Pegasus and ATLAS capacitor banks).

**Keywords:** extreme states of matter, shock waves, detonation, liner systems

PACS numbers: **07.35. + k**, 47.40.Rs, 62.50.Ef

Bibliography — 59 references

First published in 2004

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **191** (11) 1231–1244 (2021)

*Physics – Uspekhi* **64** (11) (2021)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.09.039092>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.09.039092>