

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

**ВЗРЫВЫ, МОЩНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ
И ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА**

© 2021 г. **В. Е. Фортгов^a**, **Р. И. Ильяев^{b,*}**, **Г. Н. Рыкованов^{c,**}**,
В. Д. Селемир^{b,*}**, **Б. Ю. Шарков^{d,****}**

^a Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^b Российский федеральный ядерный центр

“Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики”, Саров, Россия

^c Российский федеральный ядерный центр “Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина”, Снежинск, Россия

^d Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: ilkaev@vniief.ru

** E-mail: g.n.rykovanov@vniitf.ru

*** E-mail: VDSelemir@vniief.ru

**** E-mail: sharkov@jinr.ru

Поступила в редакцию 13.01.2021 г.

После доработки 22.01.2021 г.

Принята к публикации 30.01.2021 г.

Экстремальные состояния возникают при воздействии на вещество мощных ударных, детонационных и электровзрывных волн, концентрированного лазерного излучения, электронных и ионных пучков, при мощных химических и ядерных взрывах, гиперзвуковом движении тел в плотных атмосферах планет, высокоскоростном ударе и во многих иных ситуациях, характеризующихся предельно высокими давлениями и температурами. Изучение вещества в экстремальных условиях — одна из наиболее актуальных и интенсивно развивающихся фундаментальных научных дисциплин, находящаяся на стыке физики плазмы, нелинейной оптики, конденсированного состояния, ядерной, атомной и молекулярной физики, релятивистской и магнитной гидродинамики. В нашей стране исследования в области физики высокой плотности энергии и экстремальных состояний вещества динамично развиваются благодаря активному сотрудничеству Российской академии наук и Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”.

Ключевые слова: экстремальные состояния вещества, высокая плотность энергии, ударные волны, неидеальная плазма, мощные магнитные поля.

DOI: 10.31857/S0869587321050091

Первые десятилетия XX в. ознаменовались многими яркими научными достижениями в исследовании строения атома и атомного ядра. Опираясь на результаты работ в этой области ряда

ФОРТОВ Владимир Евгеньевич — академик РАН, научный руководитель ОИВТ РАН с 2018 по 2020 г. ИЛЬКАЕВ Радий Иванович — академик РАН, почётный научный руководитель РФЯЦ–ВНИИЭФ. РЫКОВАНОВ Георгий Николаевич — академик РАН, научный руководитель РФЯЦ–ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина. СЕЛЕМИР Виктор Дмитриевич — член-корреспондент РАН, директор Научно-производственного центра физики РФЯЦ–ВНИИЭФ. ШАРКОВ Борис Юрьевич — академик РАН, вице-директор ОИЯИ.

ведущих физиков мира, И.В. Курчатов, Я.Б. Зельдович, Ю.Б. Харитон и другие уже в 1939 г. обосновали возможность протекания в уране цепной реакции деления ядер, а следовательно, возможность практического использования принципиально нового — ядерного — источника энергии, в миллионы раз более мощного, чем традиционные химические реакции. Вскоре после этого были сформулированы условия реализации цепной ядерной реакции взрывного типа (открытой ранее академиком Н.Н. Семёновым для химических реакций) с выделением беспрецедентно большого количества энергии [1, 2]. Это означа-

ло, что учёные подошли к порогу создания оружия необычайно разрушительной силы [2, 3].

В середине XX в. развитие физики высоких плотностей энергии получило мощный импульс в связи с вхождением нашей цивилизации в атомную и космическую эру. Первым шагом в этом направлении стало создание ядерного и термоядерного оружия [2–7]. В ядерных зарядах высокие плотности энергии, порождаемые мощными ударными волнами, используются для инициирования цепных ядерных реакций в сжатом ядерном топливе. В термоядерных зарядах высокоэнергетические состояния — основной инструмент для сжатия, разогрева термоядерного топлива и инициации в нём термоядерных реакций синтеза. То есть работа ядерных устройств с квазиконтролируемым (атомные и водородные заряды) и с контролируемым (инерционный управляемый термоядерный синтез) энерговыделением основана на инициировании ядерных реакций синтеза в смеси дейтерия и трития в сильно сжатом и разогретом ядерном топливе.

Большой вклад в развитие науки об экстремальном состоянии вещества на этом этапе внесли выдающиеся учёные академики Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров, Ю.Б. Харитон, Е.И. Заббахин, А.И. Павловский, член-корреспондент АН СССР С.Б. Кормер, доктор физико-математических наук Л.В. Альтшулер и другие. Начатые ими в середине 1950-х годов исследования в рамках ядерных оборонных проектов СССР в дальнейшем получили значительное развитие с появлением новых устройств генерации высоких плотностей энергии, таких как лазеры, пучки заряженных частиц, сильноточные Z-пинчи, взрывные, электровзрывные генераторы мощных ударных волн, многоступенчатые легкогазовые пушки и алмазные наковальни. Эти сложные и дорогие технические устройства позволили существенно продвинуться по шкале доступных для физического эксперимента концентраций энергии и получить в лабораторных или квазилабораторных условиях состояния мега- и гигабарного диапазонов давлений, недостижимых для традиционной техники физического эксперимента. Кроме того, устойчивым прагматическим стимулом таких исследований явилось практическое применение состояний с высокими концентрациями энергии в ядерной, термоядерной и импульсной энергетике, электрофизике высоких напряжений и мощностей для синтеза сверхтвёрдых веществ, упрочнения и сварки материалов, противометеоритной защиты космических аппаратов и, конечно, для нужд обороны.

Физика высоких плотностей энергии превратилась сегодня в обширный и быстро развивающийся раздел современной науки, где приме-

няются самые передовые средства генерации, методы диагностики и компьютерного моделирования на наиболее мощных суперкомпьютерах. “Высокими” традиционно принято считать концентрации энергии в веществе, превышающие 10^4 – 10^5 Дж/см³, что соответствует энергии связи валентных электронов в несколько эВ и давлениям примерно от 100 кбар до 1 Мбар [3, 8, 9]. Эти давления значительно превосходят пределы механической прочности веществ, что вызывает необходимость учёта их сжимаемости при гидродинамическом движении в результате импульсного энерговыделения.

Состояние вещества, характеризующееся предельно высокими температурами и давлениями, а следовательно, экстремально высокими концентрациями энергии, всегда привлекало исследователей перспективами получения в лабораториях таких экзотических условий, при которых возникла наша Вселенная в результате Большого взрыва. Экзотическое состояние характерно и сегодня для подавляющей (90–95%) массы барионного (видимого) вещества — в звёздных и межзвёздных объектах, в планетах и экзопланетах [10].

Как правило, вещество в условиях высоких плотностей энергии находится в плазменном (ионизированном) состоянии, так как в нём идут процессы термической ионизации и/или ионизации давлением. В астрофизических объектах такое сжатие и разогрев осуществляются гравитационными силами и ядерными реакциями, а в лабораторных условиях — мощными ударными волнами, для возбуждения которых применяется широкий набор “драйверов” — от двухступенчатых газовых пушек до лазеров и сильноточных Z-пинчей мощностью сотни тераватт [3, 10]. При этом, если в астрофизических объектах время существования экстремальных состояний варьируется от миллисекунд до миллиардов лет, позволяя проводить их подробное наблюдение и измерение при помощи космических зондов, орбитальных и наземных телескопов различных длин волн, то в земных условиях речь идёт о микро-, фемто-, аттосекундном диапазоне длительностей [3, 11], что требует применения специфических предельно быстродействующих средств диагностики.

Важно отметить, что в экспериментах с лабораторной плазмой экстремальных состояний уже сейчас удаётся в малом масштабе частично воспроизвести многие явления и процессы, происходящие в астрофизических объектах, информация о которых стала доступна в результате применения земных и космических наблюдательных средств. Это сведения о гидродинамическом пе-

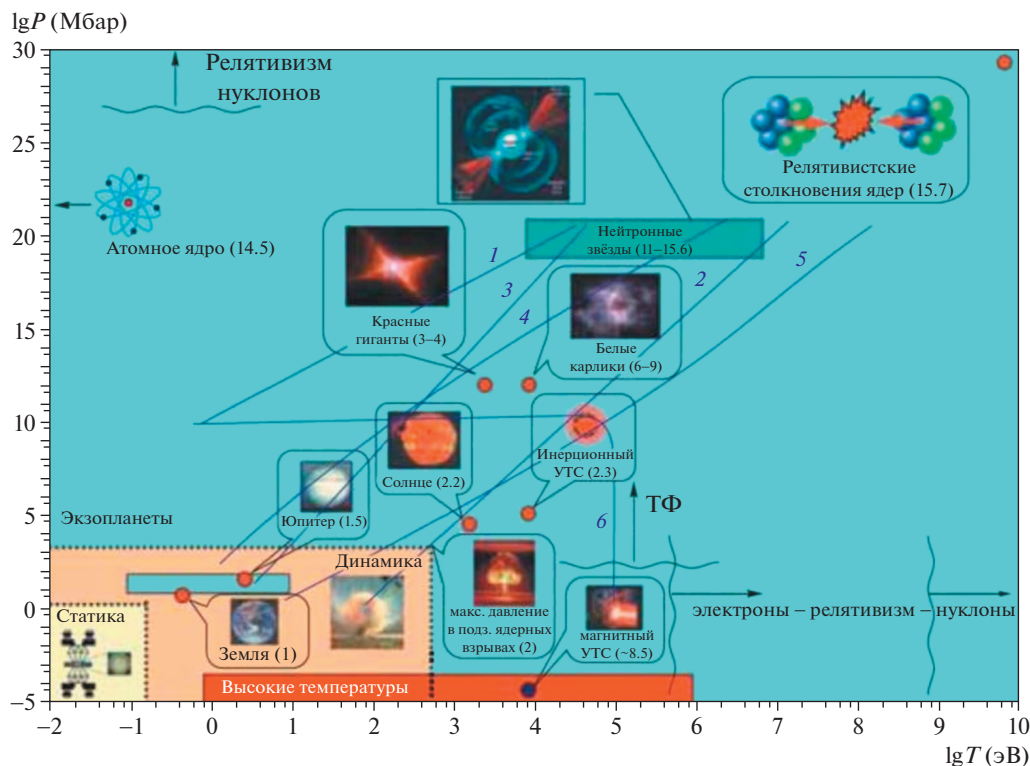


Рис. 1. Экстремальные состояния [3] в природе и в лаборатории

Цифры в скобках указывают логарифм плотности (в г/см^3). Область “статика” соответствует статическому; “динамика” — динамическому методу получения высоких давлений; “высокие температуры” — экспериментам при высоких температурах. Линиями 1–6 обозначены состояния электронной компоненты вещества для углерода: 1 — граница области вырождения ядер; 2 — граница области идеальности; 3 — кривая плавления; 4 — граница области, в которой решётка может считаться классической; 5 — граница области вырождения электронов; 6 — граница области релятивизма электронов

Источник: [4].

ремешивании и разнообразных неустойчивостях, ударно-волновых явлениях, сильноизлучающих, релятивистских и замагниченных потоках и струях, солитонах, релятивистских явлениях, уравнениях состояния, составе и спектрах сжатой неидеальной плазмы, а также характеристики межзвёздной космической плазмы, пыли.

Фазовая диаграмма материи в экстремальном состоянии. На рисунке 1 представлена диаграмма, демонстрирующая экстремальные условия, которые реализуются в ряде физических объектов природы и в технике [10, 12]. Возникновение экстремальных состояний в природе вызвано силами тяготения, носящими дальнедействующий и, в отличие от кулоновских (в электромагнитной плазме), неэкранируемый характер. Эти силы сжимают и разогревают вещество либо непосредственно, либо стимулируя экзотермические ядерные реакции в массивных астрофизических объектах, что проявлялось и на ранних этапах эволюции Вселенной [9, 12].

Плазма как наиболее распространённое состояние вещества в природе (95% массы Вселенной без учёта “тёмной” материи) занимает практически всю область фазовой диаграммы (см. рис. 1). При этом особую трудность при физическом описании такой среды представляет область неидеальной плазмы, где энергия межчастичного кулоновского взаимодействия $e^2 n^{1/3}$ сравнима или превосходит кинетическую энергию движения частиц E_k . В этой области, где параметр неидеальности $\Gamma = e^2 n^{1/3} / E_k > 1$, эффекты плазменной неидеальности не могут быть описаны теорией возмущений [8, 12], а применение машинных беспараметрических методов Монте-Карло или молекулярной динамики [13] связано с трудностями выбора адекватных псевдопотенциалов и правильного учёта квантовых эффектов.

Квантовые эффекты определяются параметром вырождения $n\lambda^3$ ($\lambda = \sqrt{\hbar^2 / 2mkT}$ — тепловая дебройлевская длина волны). Для вырожденной плазмы, $n\lambda^3 \gg 1$, масштабом кинетической энер-

гии является энергия Ферми $E_F \approx \hbar^2 n^{2/3}/2m$, которая растёт с ростом плотности плазмы, делая её по мере сжатия, $n \rightarrow \infty$, всё более идеальной: $\Gamma = me^2/(\hbar^2 n^{1/3}) \rightarrow 0$. Условие релятивизма, соответствующее условию $m_e c^2 \approx E_F \approx 0.5$ МэВ, даёт плотность $\rho \approx 10^6$ г/см³.

Эффекты релятивизма электронов в уравнении состояния и транспортных свойств плазмы, когда $m_e c^2 \approx kT$, соответствуют $T \approx 0.5$ МэВ $\approx 6 \times 10^6$ К. Выше этой температуры вещество становится неустойчивым по отношению к спонтанному рождению электрон-позитронных пар.

Масштабы реализуемых в природе экстремальных состояний способны поразить самое смелое воображение (см. рис. 1). На дне Марианской впадины (11 км) давление воды достигает 1.2 кбар, в центре Земли — 3.4 Мбар, $T \approx 0.5$ эВ, плотность $\rho \approx 10\text{--}20$ г/см³; в центре Юпитера $P \approx 40\text{--}70$ Мбар, $\rho \approx 30$ г/см³, $T \approx 2 \times 10^4$ К; в центре Солнца $P \approx 240$ Гбар, $T \approx 1.6 \times 10^3$ эВ, $\rho \approx 150$ г/см³; в остывающих звёздах — белых карликах $P \approx 10^{10}\text{--}10^{16}$ Мбар, $\rho \approx 10^6\text{--}10^9$ г/см³, $T \approx 10^3$ эВ. В мишенях управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы $P \sim 200$ Гбар, $\rho \approx 150\text{--}200$ г/см³, $T \sim 10^8$ эВ. Нейтронные звёзды, являющиеся элементами пульсаров, магнитаров, источниками γ -всплесков, имеют, по-видимому, рекордно высокие параметры: $P \approx 10^{19}$ Мбар, $\rho \approx 10^{11}$ г/см³, $T \approx 10^4$ эВ для мантии и $P \approx 10^{23}$ Мбар, $\rho \approx 10^{14}$ г/см³, $T \approx 10^4$ эВ для ядра при гигантской величине индукции магнитного поля $10^{11}\text{--}10^{16}$ Гс.

При столкновениях тяжёлых ядер, разогнанных в современных ускорителях до релятивистских скоростей, возникают состояния сверхсжатой кварк-глюонной плазмы с ультраэкстремальными параметрами $P \approx 10^{30}$ бар, $\rho \approx 10^{15}\text{--}10^{16}$ г/см³, $T \approx 10^{14}$ К, превосходящими условия, реализуемые в экстремальных астрофизических объектах [10].

Методы генерации высоких плотностей энергии в веществе. Современные экспериментальные возможности хотя и быстро увеличиваются, но позволяют лишь частично вторгнуться в область ультраэкстремальных астрофизических состояний. Прочность вещества принципиально ограничивает применение статических методов исследования высоких плотностей энергии, так как подавляющее большинство конструкционных материалов не способно выдержать интересующие экспериментаторов высокие давления. Исключение составляет алмаз — рекордсмен по твёрдости ($\sigma_n \approx 500$ кбар), что позволяет, используя его в алмазных наковальнях, достигать в статических опытах давлений 3–5 Мбар [10]. Пальма

первенства принадлежит сейчас динамическим методам [3, 8, 14, 15], основанным на импульсной кумуляции высоких плотностей энергии в веществе. Время жизни таких высокоэнергетических состояний определяется временем инерционного разлёта плазмы, имеющего характерный масштаб $10^{-10}\text{--}10^{-6}$ с, что требует применения средств диагностики с высоким временным разрешением.

Использование ударных волн, генерируемых источниками высоких локальных плотностей энергии, позволяет резко расширить диапазон доступных для эксперимента давлений и температур, проникнуть в область, промежуточную между параметрами химических взрывчатых веществ и уникальными параметрами подземных ядерных взрывов. Уже в первых экспериментах с лазерными, пучковыми и электродинамическими ударными волнами удалось получить важные экспериментальные данные об уравнении состояния водорода, дейтерия, меди, железа, углерода и воды и использовать их для анализа строения планет-гигантов Солнечной системы и экзопланет [3, 8, 11].

Спектр экспериментальных устройств для генерации высоких плотностей энергии весьма широк. Он включает в себя алмазные наковальни для статического сжатия вещества, пороховые и легкогазовые метательные устройства — “пушки”, взрывные генераторы мощных ударных волн, электровзрывные устройства, магнитокумулятивные генераторы, лазеры, сильноточные генераторы мощных импульсов электрического тока, ускорители заряженных частиц и возможные комбинации этих устройств. В таблице 1 приведены параметры наиболее мощных из действующих и строящихся типов установок: лазеры, импульсные электротехнические устройства, Z-пинчи, ускорители заряженных частиц [10, 11]. Созданные для проведения плазменных исследований в интересах обороны и физики высоких энергий ускорители релятивистских заряженных частиц (электронов и ионов) сегодня с успехом применяются и для работ по фундаментальной физике плазмы высоких плотностей энергии.

Ударно-волновые динамические методы. Продвижение по шкале высоких плотностей энергии связано с переходом к динамическим методам исследований [8, 9, 15, 16], базирующимся на импульсной кумуляции энергии в изучаемом веществе при помощи мощных ударных волн либо при помощи электромагнитного или корпускулярного излучения различной природы. Возникающие при этом температуры и давления плазмы значительно превосходят термочностные пределы конструкционных материалов установок, что приводит к ограничениям характерного времени

Таблица 1. Источники энергии и экспериментальные устройства, применяемые в физике высоких концентраций энергии

Первичный источник энергии	Конечная форма источника энергии	Плотность энергии, МДж/см ³	Температура, эВ	Давление, 10 ⁵ Па	Полная энергия, МДж	Длительность, с	Мощность, Вт
Химические ВВ	Химические ВВ	10 ⁻²	0.5	5 × 10 ⁵	10 ²	10 ⁻⁷	10 ¹⁰
	Металлические пластины	0.3	60	10 ⁷	3	10 ⁻⁶	10 ¹⁰
	Магнитное поле 1 МЭ	4 × 10 ⁻³	0.3	5 × 10 ⁴	5	10 ⁻⁶	5 × 10 ¹²
	Магнитное поле 25 МЭ	2.5	200	2.5 × 10 ⁷	1	10 ⁻⁷	10 ¹³
	Взрывные генераторы плазмы	10 ⁻²	60	10 ⁵	30	10 ⁻⁶	10 ¹²
Ядерные ВВ	Ядерные ВВ	10 ⁴	10 ⁷	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ⁻⁶	10 ²²
	Нейтронный нагрев	10	50	2 × 10 ⁷	10 ³	10 ⁻⁶	10 ¹⁵
	Ударные волны в твёрдом теле	5	50	5 × 10 ⁷	10 ⁴	3 × 10 ⁻⁶	10 ¹⁵
	Ударные волны в газе	0.3	40	2 × 10 ⁵	10 ⁷	10 ⁻⁵	10 ¹⁸
Сжатый газ	Адиабатическое сжатие	2 × 10 ⁻⁵	0.3	150	10 ³	6 × 10 ⁻³	10 ⁵
	Ударные трубы пневматические	10 ⁻⁴	1	250	10 ⁻²	10 ⁻⁴	3 × 10 ⁸
	Ударные трубы на горении	10 ⁻⁶	2	10	2 × 10 ⁻²	3 × 10 ⁻⁴	10 ⁸
	Ударные трубы, электрический разряд	10 ⁻⁷	2	1	10 ⁻²	10 ⁴	10 ⁸
Лазер	—	10 ⁻⁶	—	—	0.5 × 10 ⁻³	—	10 ¹³
	Мишень	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁸	0.5	10 ⁻¹⁰	5 × 10 ¹⁴
Электронный пучок	—	10 ⁻⁶	—	—	1	10 ⁻⁸	10 ¹⁴
	Мишень	5 × 10	5 × 10 ³	10 ⁷	0.1	10 ⁻⁸	10 ¹³

Источник: [10].

жизни плазмы в динамических экспериментах — оно определяется динамикой разлёта мишени и составляет примерно 10⁻¹⁰–10⁻⁵ с. При динамическом подходе отсутствуют принципиальные ограничения на величину создаваемых в мишени максимальных плотностей энергии и давления, они

лимитируются только мощностью энергетического источника — “драйвера”.

Наиболее распространённым инструментом создания высоких плотностей энергии служат мощные ударные волны [3, 14, 15], характеризующиеся вязким скачком уплотнения, в котором

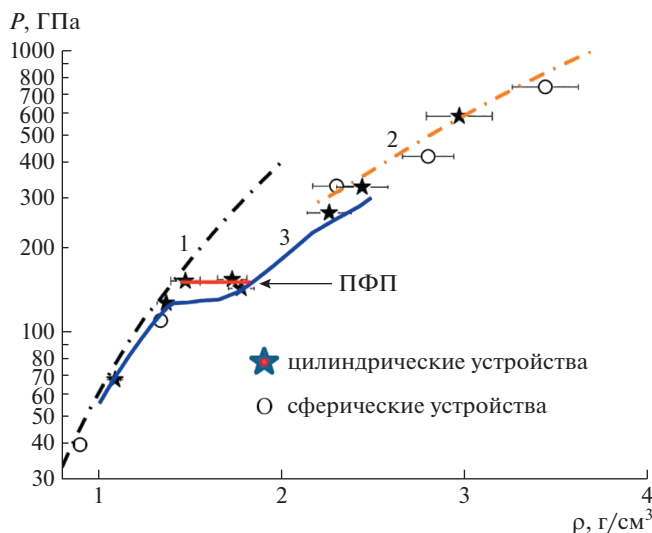


Рис. 2. Квазиизэнтропическое сжатие газообразного дейтерия в области давлений до 10 Мбар

1 – изэнтропа $S = 23.5$ Дж/г, 2 – изэнтропа $S = 26.0$ Дж/г·К, 3 – численное моделирование ОИВТ РАН [10]. Ступенька в давлении привязана к плазменному фазовому переходу (ПФП)

Источник: [19].

кинетическая энергия набегающего потока преобразуется в тепловую энергию сжатой и необратимо разогретой плазмы. Ударные волны возникают в результате нелинейных гидродинамических явлений в веществе при его движении, вызванном импульсным энерговыделением. Такая волна не только сжимает, но и разогревает вещество до высоких температур, что особенно важно для получения плазмы – ионизованного состояния материи. Ряд динамических методик, используемых при экспериментальном изучении сильнонеидеальной плазмы, рассматривается в работах [8, 10, 15].

Ударное сжатие вещества в твёрдом или жидком исходном состоянии даёт возможность получить за фронтом ударной волны состояние неидеальной вырожденной (статистика Ферми) и классической (статистика Больцмана) плазмы, сжатой до максимальных давлений примерно 4 Гбар и разогретой до температур порядка 10^7 К [10, 16], при которых плотность внутренней энергии плазмы сопоставима с ядерной плотностью энергии, а температуры близки к условиям, когда энергия и давление равновесного излучения начинают играть заметную роль в суммарной термодинамике и динамике таких высокоэнергетических состояний.

Для снижения эффектов необратимого нагрева целесообразно использовать сжатие вещества падающими и отражёнными ударными волнами в

определённой последовательности, тогда оно становится близким к более “мягкому” изэнтропическому, что позволяет получить значительно более высокие (в 10–50 раз) степени сжатия и более низкие (примерно в 10 раз) температуры по сравнению с однократным ударно-волновым воздействием. Многократное ударное сжатие было успешно применено для экспериментального изучения ионизации плазмы давлением [10, 17, 18] и диэлектризации вещества [10] при мегабарных давлениях. Квазиадиабатическое сжатие реализовано также при взрывном высокосимметричном цилиндрическом и сферическом сжатии дейтерия, гелия и инертных газов [10, 18–20]. При этом в дейтерии получены рекордные параметры плазмы. При начальном давлении газообразного дейтерия $p_0 = 267$ атм и $T_0 = 10.5^\circ\text{C}$ зарегистрирована плотность ударно-сжатой дейтериевой плазмы $\rho = (4.3 \pm 0.7)$ г/см³ при давлении $P = 1830$ ГПа. В этих условиях плазма оказывается сильнонеидеальной ($\Gamma \approx 4.5 \times 10^2$), с вырожденной ($n\lambda_e^3 \approx 2.8 \times 10^2$) электронной компонентой и числом электронов $n \approx 2.8 \times 10^{23}$ см⁻³ (рис. 2).

На рисунке 3 приведена схема эксперимента во ВНИИЭФ по измерению сжимаемости газов для моделирования экстремальных астрофизических явлений в лабораторных условиях с использованием уникального рентгенографического комплекса этого института и экспериментальных устройств цилиндрической и сферической геометрии, трансформирующих ударно-волновое сжатие в квазиизэнтропическое. Сжатие образующейся плазмы в таких устройствах осуществляется системой ударных волн, реверберирующих в её объёме, и стальных оболочек, сходящихся к центру под действием продуктов взрыва мощного конденсированного взрывчатого вещества массой до ≈ 85 кг тринитротолуола. Процесс получил название квазиизэнтропического, потому что после прохождения первой ударной волны дальнейшее сжатие плазмы происходит практически без её существенного нагрева при более длительном удержании вещества в сжатом состоянии. Цель эксперимента – регистрация $R(t)$ траектории движения оболочек экспериментального устройства и определение размера внутреннего каскада в момент “остановки”, когда достигается максимальное сжатие исследуемого вещества. Его плотность вычисляется из выражения: $\rho = \rho_0 \cdot (R_0/R_{\min})^n$, где ρ_0 – начальная плотность газа, R_0 и R_{\min} – внутренний радиус оболочки в исходном состоянии и в момент её “остановки” соответственно; $n = 2$ для цилиндрической или 3 для сферической геометрии.

Экспериментальное устройство сферической или цилиндрической геометрии с исследуемым газом размещается перед бетонным сооружением, в котором смонтирован комплекс, разработанный под руководством члена-корреспондента РАН В.Д. Селемира, состоящий из трёх безжелезных импульсных бетатронов БИМ234.3000 с граничной энергией электронов ≈ 60 МэВ. Использование таких бетатронов позволяет просвечивать объекты с массовой толщиной ~ 230 г/см², что эквивалентно толщине ~ 200 мм свинца. Особенность бетатронов ВНИИЭФа — возможность работать в режиме последовательной генерации трёх импульсов рентгеновского излучения с длительностью ~ 150 – 180 нс. Это позволяет в эксперименте зарегистрировать одновременно до 9 фаз сжатия плазмы. В опытах применяется оптико-электронная система детектирования, активируемая синхронно с импульсами бетатрона. В качестве преобразователей рентгеновского излучения в видимое используются монокристаллы йодистого натрия и силикат лютетия. Для устранения влияния рассеянного излучения на высокочувствительные детекторы размер поля регистрации в каждой из проекций ограничивается свинцовыми коллиматорами. Для защиты бетатронов и оптико-электронных регистраторов рентгеновского излучения применены алюминиевые конусы. В динамических экспериментах с устройствами цилиндрической геометрии зарегистрирована аномалия сжимаемости плазмы дейтерия, вызванная фазовым переходом, что сопровождается скачком плотности $\sim 15\%$ в области давлений $P \approx \sim 150$ ГПа при температуре $T \approx 3700$ К [19].

Сегодня использование экспериментальной техники мощных ударных волн для изучения экстремальных состояний вещества — это основной источник информации о поведении сильносжатой сильнонеидеальной плазмы в области рекордно высоких температур и давлений мегабарного и гигабарного диапазонов. Будучи экзотическими для земных условий, ультраэкстремальные состояния вполне характерны для большинства астрофизических объектов, определяя строение, эволюцию и светимость звёзд, планет Солнечной системы, а также более 100 открытых недавно экзопланет [10].

Кроме того, с плазмой ультрамегабарного диапазона связываются перспективные энергетические проекты по управляемому термоядерному синтезу с инерционным удержанием плазмы и реализации высокотемпературных состояний в сжатом водороде. Эти обстоятельства — постоянно действующий стимулирующий фактор экспериментального изучения свойств сильносжатой неидеальной плазмы водорода, дейтерия и инертных газов с использованием мощных ударных

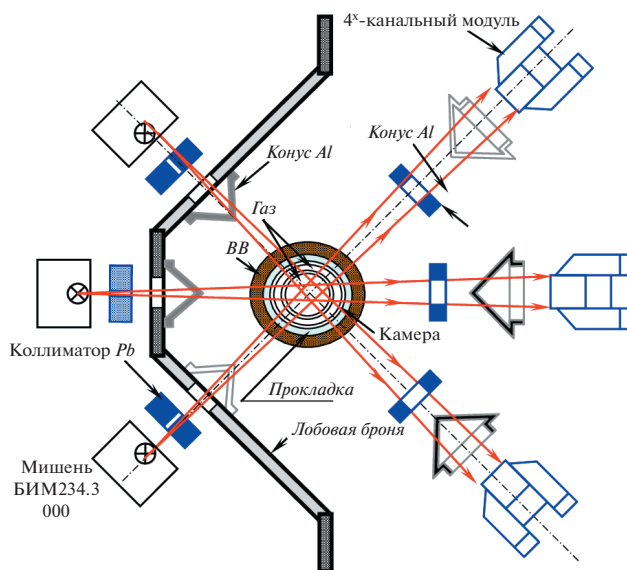


Рис. 3. Схема эксперимента ВНИИЭФ по измерению сжимаемости газов. Ударное сжатие дейтерия и гелия до 185 Мбар, $\rho = 14$ г/см³

волн, для возбуждения которых применяются легкогазовые [17] и взрывные плоские, сферические и полусферические устройства, мощные лазеры и электродинамические ускорители [10, 18, 21].

Уникальное физическое явление — ядерный взрыв. Физики, и в первую очередь разработчики ядерного оружия, в полной мере оценили возможность ядерных взрывов как невиданного дотоле источника генерации сверхмощных ударных и радиационных волн в конденсированных средах и изучения с их помощью ультраэкстремальных состояний вещества [10, 22–24]. Для получения необходимых сведений о физических свойствах и газодинамических особенностях поведения вещества в условиях ядерного взрыва был развёрнут масштабный комплекс экспериментальных и теоретических работ, давших начало новой науке — физике высоких плотностей энергии [8, 16, 22, 23, 25] и динамической физике высоких давлений.

Наряду с измерениями интегральных характеристик ядерного взрыва и его воздействия выполнялись опыты по изучению физических свойств вещества при экстремальных давлениях и температурах. Постановка и основные физические результаты таких экспериментов содержатся в обстоятельном обзоре [24] и представлены на рисунке 4 [10, 26, 27]. Мировой рекорд уровня давления, при котором были измерены параметры уравнения состояния сильносжатой и многократно ионизированной плазмы, состав-

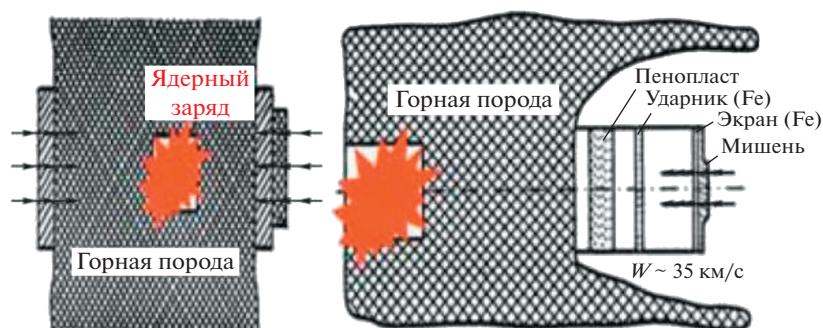


Рис. 4. Схема экспериментов по генерации мощных ударных волн в ближней зоне ядерного взрыва

Источники: [10, 16, 24].

ляет $P \approx 4$ млрд атмосфер — он получен в ближней зоне ядерного взрыва.

Совокупность экспериментальных данных по ударно-сжатой плазме алюминия приведена в работах [10, 16, 24], где наивысшие значения давлений соответствуют рекордным в земных условиях параметрам. Плотность внутренней энергии такой плазмы составляет $E \approx 10^9$ Дж/см³, что близко к плотности энергии ядерной материи, а давление $P \approx 4$ Гбар близко к давлению во внутренних слоях Солнца. Плазма в этих условиях ($n_e \approx 4 \times 10^{24}$ см⁻³, $T \approx 8 \times 10^6$ К) невырождена, $n\lambda^3 \approx 0.07$, двенадцатикратно ионизирована, а параметр неидеальности невелик, $\Gamma \sim 0.1$, что служит экспериментальной иллюстрацией тезиса об упрощении физических свойств плазмы в пределе ультравысоких плотностей энергии. Исследованный диапазон параметров примыкает к области, где в термодинамике системы заметен вклад энергии и давления равновесного светового излучения: $E_R = 4\sigma T^4/c$; $P_R = E_R/3 = 4/3\sigma T^4/c$. Таким образом, реализуется близкий к радиационно-газодинамическому режим динамики плазмы [4, 27].

Кроме возможности получения сверхвысоких плотностей энергии, эти опыты обладают и рядом других уникальных особенностей. Это широчайший диапазон изменения давления, одномерность и хорошая симметрия проведения измерений с использованием больших образцов, размеры которых на порядки превышают лабораторные. В результате был получен значительный объем бесценной экспериментальной информации в области ультравысоких давлений, к нижнему диапазону которых сейчас приближается техника мощных лазеров [10]. Рекордные в земных условиях плотности энергии плазмы получены именно в ближней зоне ядерного взрыва.

Сверхсильные магнитные поля. Изучение механизмов формирования сверхвысоких плотностей

энергии электрического и магнитного полей — важная задача, стоящая перед исследователями. Российская наука со времён академика П.Л. Капицы занимала лидирующее положение в генерации сильных магнитных полей. Сохранение магнитного потока в замкнутом проводнике при его симметричном сжатии взрывом позволило академику А.Д. Сахарову предложить метод магнитной кумуляции (МК) для реализации сверхсильных магнитных полей [28]. Им же был разработан принцип действия первых взрывомангнитных генераторов. Его суть состоит в следующем. В радиальном генераторе (генератор поля) исходный магнитный поток с индукцией B_0 радиально обжимается металлическим цилиндром, ускоряемым к центру детонацией конденсированного взрывчатого вещества. При условии сохранения магнитного потока $S = H_0 \pi R_0^2 = H \pi R^2$ напряжённость магнитного поля внутри цилиндра $H = H_0 (R_0/R)^2$ достигает многих мегагаусс [29]. Под руководством академика РАН А.И. Павловского разработаны генераторы воспроизводимых сверхсильных магнитных полей десятимегагауссного диапазона и рекорд магнитного поля доведён до 17 МГс [30].

С начала XXI столетия генератор воспроизводимых сверхсильных магнитных полей (МК-1) использовался в серии международных экспериментов “Капица”. Уникальная экспериментальная база Росатома в области сверхсильных магнитных полей, в данном случае выступавшая в качестве центра коллективного пользования, предоставлялась для исследований электронной структуры различных материалов, включая органические металлы, гетероструктуры, магнитные материалы, определения характеристик фазовых переходов, а также критических магнитных полей в высокотемпературных сверхпроводниках [31]. Размещение во внутреннем объёме генератора МК-1 сверхсильных магнитных полей соосного

полого цилиндра из проводящего материала позволяет преобразовать его в генератор для изоэнтропического сжатия веществ при давлении вплоть до 7 Мбар. С использованием этого генератора исследованы уравнения состояния при изоэнтропическом сжатии изотопов водорода, имеющие важное значение для определения характеристик планет-гигантов [31], и в качестве прикладной задачи — уравнения состояния при изоэнтропическом сжатии конструкционных материалов.

Коллективом под руководством члена-корреспондента РАН В.Д. Селемира ведутся работы по совершенствованию генераторов сверхсильных магнитных полей. В “матрёшке” из вложенных друг в друга генераторов МК-1 реализованы предельные возможности использования энергии взрывчатых веществ и в макрообъёмах $\sim 3 \text{ см}^3$ получено магнитное поле 28 МГс — максимальная величина, которой в макроскопических объёмах пока удалось достичь на Земле (рис. 5). Этим взрывным устройствам принадлежат сегодня рекорды по величине импульсного электрического тока $\approx 300 \text{ МА}$, что соответствует экстремально высокой электромагнитной энергии $H^2/8\pi \approx 3 \text{ МДж/см}^3$. Взрывомагнитные генераторы — наиболее мощные энергетические устройства на сегодня, их мощность достигает $\approx 100 \text{ ТВт}$ [32].

Продвижение в область сверхсильных магнитных полей стомегагауссного диапазона, при котором давление в макрообъёмах порядка нескольких см^3 достигает 400 млн атмосфер, потребует использования энергии атомного взрыва [33].

Исследование метода магнитной кумуляции для формирования импульсов тока позволило создать мощные, до 100 ТВт, энергетические устройства [34]. Эти генераторы применяются для преобразования энергии взрыва в энергию мощных плазменных образований, когерентное и некогерентное световое излучение, мощное микроволновое излучение [32]. Благодаря уникальным энергетическим возможностям магнитокумулятивных генераторов удалось впервые смоделировать воздействие импульса молнии с амплитудой тока в сотни кА на заземляющие устройства [35] и создать подвижные комплексы для применений в практической электроэнергетике [36].

Устройства сильноточной импульсной энергетики ($10^5\text{--}10^7 \text{ А}$) используются для получения плазмы высоких плотностей энергии в экспериментальных постановках. Электрическая энергия может осуществлять прямой импульсный джоулев нагрев (электровзрыв) проводников либо магнитодинамическое сжатие и разогрев плазменных

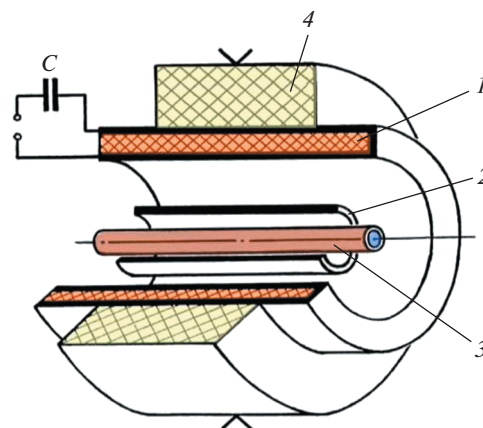


Рис. 5. Схема эксперимента по изоэнтропическому сжатию водорода сверхсильным магнитным полем 1 — соленоид-оболочка МК-1, 2 — каскад, 3 — металлическая трубка с исследуемым веществом, 4 — цилиндрический заряд взрывчатого вещества
Источники: [30, 31].

образований. Запасённая энергия может использоваться для получения интенсивных вспышек мягкого рентгеновского излучения (с радиационной температурой 200–300 эВ) с последующей генерацией этим излучением мощных ударных или радиационных тепловых волн либо для электродинамической генерации ударных волн, а также для электродинамического разгона металлических лайнеров.

Наибольшие параметры плазмы получены в настоящее время в мощных Z-пинчах тераваттного диапазона мощности, в которых электрическая энергия конденсаторов осуществляет электродинамический разгон плазмы с последующей фокусировкой её кинетической энергии на оси цилиндра [37–39]. В этих экспериментах цилиндрическая плазменная оболочка (лайнер) создаётся электровзрывом сотен тонких (6–50 мкм) вольфрамовых проводников током 20 МА с фронтом нарастания порядка 100 нс. При схлопывании вокруг оси была получена вольфрамовая плазма с плотностью ионов порядка 10^{20} см^{-3} и степенью ионизации более 50.

В экспериментах на установке “Ангара” [38–40] (рис. 6) импульсный ток $\approx 4 \text{ МА}$ разгонял плазменный ксеноновый лайнер до скорости $\approx 500 \text{ км/с}$. Высокосимметричный удар этого лайнера о поверхность цилиндрической сильнопористой мишени возбуждал в ней тепловую радиационную волну, излучающую мягкое рентгеновское излучение с температурой порядка 100 эВ. Это излучение использовалось для высокосимметричной генерации плоских ударных волн с амплитудой давления $\approx 5 \text{ Мбар}$ для возбуждения



Рис. 6. Импульсный генератор “Ангара-5”, ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований госкорпорации “Росатом”
 Источник: [35].

тепловых радиационных волн со скоростью распространения ~ 100 км/с, а также для разгона металлических ударников до 10–12 км/с.

Генерация макроскопических объёмов горячей плазмы. Важная положительная особенность ускоренных пучков заряженных частиц — объём-

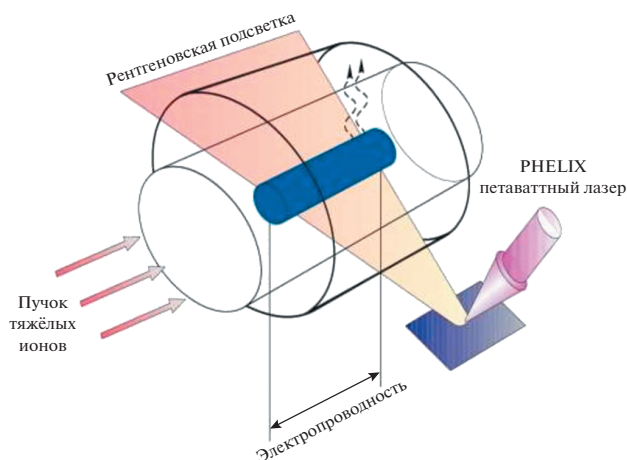


Рис. 7. Схема эксперимента NINEX проекта FAIR с использованием релятивистского пучка тяжёлых ионов и петаваттного лазера
 Источники: [37, 42].

ный характер их энерговыделения [41]. Этим они отличаются от лазерного излучения, где основное энерговыделение с частотой ω_l ограничивается узкой критической зоной [42–44], $\omega_l \sim \omega_p \sim \sim 4\pi e^2 n_e / m_e$ и затем передаётся в глубь мишени благодаря электронной теплопроводности. В результате торможения заряженных частиц возникает слой изохорически разогретой плазмы, последующее расширение которого генерирует ударную волну в глубь мишени или цилиндрическую ударную волну, расходящуюся от оси пучка. В современных исследованиях в области физики высоких плотностей энергии используются обе эти методики — изохорический нагрев и сжатие ударными волнами, генерируемыми корпускулярными пучками.

Созданные для экспериментов в области физики высоких энергий ускорители релятивистских тяжёлых ионов оказались перспективными устройствами не только для управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием, но и для опытов по сжатию и разогреву плотной плазмы [45, 46], то есть для работ по фундаментальной физике плазмы высоких плотностей энергии. Пучки тяжёлых ионов с кинетической энергией 3–300 МэВ на нуклон применялись в экспериментах по нагреву конденсированных и пористых мишеней, по измерению тормозной

способности ионов в плазме, а также по взаимодействию заряженных пучков с ударно-сжатой плазмой, получаемой с помощью взрывных генераторов и мини-взрывных ударных труб [10, 13].

Особый интерес представляет использование тяжёлоионного ускорителя GSI в комбинации с мощной петаваттной лазерной системой PHELIX (рис. 7), что качественно расширяет экспериментальные возможности такого устройства. Перспективы применения ускорительных комплексов GSI в г. Дармштадт (ФРГ) представлены в работах [41, 43]. Интенсивные релятивистские пучки тяжёлых ионов имеют перспективу для генерации плазмы высокой плотности энергии, а также для импульсного термоядерного синтеза.

* * *

Ударно-волновая техника эксперимента играет сегодня ведущую роль в физике высоких плотностей энергии, позволяя получать для многих химических элементов и соединений максимальные динамические давления мегабарного и гигабарного диапазонов. Достигнутый максимум на шесть порядков превосходит давление при ударе пули, на три — давление в центре Земли и оказывается близким к давлению в центральных слоях Солнца и мишенях инерционного термоядерного синтеза. Такие экзотические состояния вещества возникали при рождении нашей Вселенной спустя несколько секунд после Большого взрыва [9, 10]. В определённом смысле можно считать, что, последовательно увеличивая давление и температуру в динамических экспериментах, мы как бы двигаемся вспять по оси времени, приближаясь к моменту рождения Вселенной — Большому взрыву.

Изучение эволюции ранней Вселенной даёт уникальную возможность исследовать высокоэнергетические явления, которые невозможно воссоздать в лаборатории. По современным представлениям [47], эволюция Вселенной во времени проходила крайне неравномерно — сравнительно медленная сейчас, на ранних стадиях она была поразительно быстрой, так что серьёзные качественные изменения состояния занимали доли секунды. Наблюдаемая сейчас Вселенная возникла около 13.7–14 млрд лет назад из некоторого начального сингулярного состояния с бесконечно большими температурой и плотностью и с тех пор непрерывно расширяется и охлаждается до современных размеров, порядка 10^{28} см, и средних температур, порядка 2.7 К. Согласно теории Большого взрыва, дальнейшая эволюция зависит от нынешней скорости расширения Вселенной и средней плотности вещества в ней.

Наука о строении вещества при высоких плотностях энергии и космофизика тесно связаны и взаимно переплетены. И хотя предельные давления лабораторной плазмы пока отличаются от максимальных астрофизических значений на 20–30 порядков, этот разрыв стремительно сокращается, а физические процессы в лаборатории и космосе часто демонстрируют поразительное разнообразие и вместе с тем глубокие аналогии, свидетельствуя как минимум о единстве физических принципов поведения вещества в широчайшем диапазоне плотностей (примерно 42 порядка) и температур (до 10^{13} К).

Достигнутый уровень развития физики высоких плотностей энергии уже сегодня представляет уникальные возможности для решения учёными РАН, Росатома и высшей школы ряда интереснейших фундаментальных и прикладных задач. Исследования изоэнтропического сжатия ряда веществ крайне важны для определения строения как планет Солнечной системы, так и экзопланет. Без изучения электронной структуры материалов невозможен прогресс в разработке новых высокотемпературных сверхпроводников. Не исключено, что первая управляемая термоядерная реакция будет осуществлена при инерциальном термоядерном синтезе. Необходимые для этих исследований давления, напряжённости магнитных полей и температуры можно реализовать только методами физики высоких плотностей энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б.* Кинетика цепного распада урана // ЖЭТФ. 1940. Т. 10. Вып. 5. С. 477–488.
2. Атомный проект СССР. Документы и материалы. Т. 1. 1938–1945 / Под ред. Л.Д. Рябева. М.: Физматлит, 1998.
3. *Форт В.Е.* Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // УФН. 2007. № 4. С. 347–368.
4. *Сахаров А.Д.* Научные труды ОТФ ФИАН. М.: Центрком, 1960.
5. Атомный проект СССР. Документы и материалы. Т. 2. 1945–1954 / Под ред. Л.Д. Рябева. М.: Физматлит, 1999.
6. *Гончаров Г.А., Рябев Л.Д.* О создании первой отечественной атомной бомбы // УФН. 2001. № 1. С. 79–104.
7. *Андрюшин И.А., Илькаев Р.И., Чернышёв А.К.* Решающий шаг к миру. Водородная бомба с атомным обжатием РДС-37. Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2010.
8. *Форт В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т.* Физика неидеальной плазмы. М.: Физматлит, 2004.

9. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. М.: Бюро Квантум, 1995.
10. Фортон В.Е. Физика высоких плотностей энергии. М.: Физматлит, 2013.
11. Анисимов С.И., Прохоров А.М., Фортон В.Е. Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях // УФН. 1984. № 3. С. 395–434.
12. Киржниц Д.А. Экстремальные состояния вещества (сверхвысокие давления и температуры) // УФН. 1971. № 7. С. 489–508.
13. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортон. М.: Наука, 2000.
14. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
15. Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Урлин В.Д. и др. Развитие в России динамических методов исследования высоких давлений // УФН. 1999. № 3. С. 323–344.
16. Аврорин Е.Н., Симоненко В.А., Шибаршов Л.И. Физические исследования при ядерных взрывах // УФН. 2006. № 4. С. 449–454.
17. Nellis W.J. Dynamic Compression of Materials: Metalization of Fluid Hydrogen at High Pressures // Rep. Prog. Phys. 2006. V. 69. № 5. P. 1479–1580.
18. Фортон В.Е., Терновой В.Я., Жерноклетов М.В. и др. Ионизация давлением неидеальной плазмы в мегабарном диапазоне динамических давлений // ЖЭТФ. 2003. № 2. С. 288–309.
19. Fortov V.E., Il'kaev R.I. et al. Phase Transition in Strongly Non-ideal Deuterium Plasma, Generated by Quasiisentropic Compression at Megabars // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. P. 185001; Мочалов М.А., Илькаев Р.И., Фортон В.Е. и др. Квазиизэнтропическая сжимаемость сильнонеидеальной плазмы дейтерия при давлениях до 5500 ГПа: эффекты неидеальности и вырождения // ЖЭТФ. 2017. № 3. С. 592–620.
20. Мочалов М.А., Илькаев Р.И., Фортон В.Е. и др. Квазиизэнтропическая сжимаемость дейтерия в области давлений ~ 12 ТПа // Письма в ЖЭТФ. 2018. № 3–4. С. 173–179; Мочалов М.А., Илькаев Р.И., Фортон В.Е. и др. Измерение квазиизэнтропической сжимаемости газообразного гелия при давлениях ~ 10 ТПа // Письма в ЖЭТФ. 2018. № 10. С. 692–696.
21. Трунин Р.Ф., Урлин В.Д., Медведев А.Б. Динамическое сжатие изотопов водорода при мегабарных давлениях // УФН. 2010. № 6. С. 605–622.
22. Альтшулер Л.В. Успехи физики высоких давлений // УФН. 1970. № 4. С. 721–723.
23. Трунин Р.Ф. Ударная сжимаемость конденсированных веществ в мощных ударных волнах подземных ядерных взрывов // УФН. 1994. № 11. С. 1215–1237.
24. Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н., Трунин Р.Ф., Фортон В.Е. Экспериментальные данные по ударной сжимаемости и адиабатическому расширению конденсированных веществ при высоких плотностях энергии. Черноголовка: ИХФ РАН, 1996.
25. Илькаев Р.И. О фундаментальных физических исследованиях во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики // УФН. 2011. № 4. С. 405–410.
26. Аврорин Е.Н., Водолага Б.К., Симоненко В.А., Фортон В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // УФН. 1993. № 5. С. 1–34.
27. Аврорин Е.Н. и др. Экспериментальное изучение оболочечных эффектов на ударных адиабатах конденсированных веществ // ЖЭТФ. 1987. № 2. С. 613–626.
28. Сахаров А.Д. Взрывомагнитные генераторы // УФН. 1966. № 4. С. 725–734.
29. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Под ред. В.Е. Фортон. М.: Наука, 2002.
30. Павловский А.И., Быков А.И., Колокольчиков Н.П. и др. Генерация воспроизводимых импульсных магнитных полей до 20 МГс // Доклады АН. 1994. Т. 334. № 3. С. 300–303.
31. Борисков Г.В., Быков А.И., Долощенко М.И. и др. Физические исследования в сверхсильных магнитных полях // УФН. 2011. № 4. С. 441–447.
32. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии. Т. 1, 2 / Под ред. В.А. Демидова, Л.Н. Пляшкевича, В.Д. Селемира. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2020.
33. Таценко О.М., Селемир В.Д., Моисеенко А.К. и др. Оптические устройства измерений в физике высоких плотностей энергии / Под ред. В.Д. Селемира, О.М. Таценко, Ю.Б. Кудасова. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2020.
34. Гриневиц Б.Е., Демидов В.А., Ивановский А.В., Селемир В.Д. Взрывомагнитные генераторы энергии и их применение в научных экспериментах // УФН. 2011. № 4. С. 422–427.
35. Вилков Ю.В., Кравченко А.С., Селемир В.Д., Терехин В.А. Моделирование воздействия токового импульса молнии с помощью источников энергии на основе магнитокумулятивных генераторов // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 88–97.
36. Fortov V.E., Kozlov A.V., Shurupov A.V. et al. The Sources of Pulse Current Based on Explosive Magnetic Generators for Mobile Testing Facility // IEEE Transactions on Plasma Science. 2016. V. 44. P. 1956–1960.
37. Jones B., Ampleford D.J., Vesey R.A. et al. Planar wire-array Z-pinch implosion dynamics and X-ray scaling at multiple-MA drive currents for a compact multisource hohlraum configuration // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 125001–125004.
38. Гасилов В.А., Захаров С.В., Смирнов В.П. О генерации мощных потоков излучения и получении мегабарных давлений в лайнерных системах // Письма в ЖЭТФ. 1991. № 2. С. 83–86.
39. Грабовский Е.В., Воробьев О.Ю., Дябилин К.С. и др. Генерация мощных ударных волн мягким рентгеновским излучением плазмы Z-пинча // Письма в ЖЭТФ. 1994. № 1. С. 3–7.
40. Абрамов О.Н., Александров В.В., Волков Г.С. и др. Исследование динамики сжатия волоконного лайнера с установленной на оси дейтерированной мишенью // Физика плазмы. 2020. № 10. С. 879–889.

41. *Фортвов В.Е., Хоффманн Д., Шарков Б.Ю.* Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества // УФН. 2008. № 2. С. 113–138.
42. *Анисимов С.И., Прохоров А.М., Фортвов В.Е.* Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях // УФН. 1984. № 3. С. 395–434.
43. *Atzeni S., Meyer-ter-Vehen J.* The Physics of Inertial Fusion. Oxford: Clarendon Press, 2004.
44. *Lindle J.* Inertial Confinement Fusion. N.Y.: Springer, 1998.
45. Ядерный синтез с инерционным удержанием / Под ред. Б.Ю. Шаркова. М.: Физматлит, 2005.
46. *Tahir N.A., Deutsch C., Fortov V.E. et al.* Studies of strongly coupled plasmas using intense heavy ion beams at the future FAIR facility: the HEDgeHOV collaboration // Contrib. Plasma Phys. 2005. V. 45. № 3–4. P. 229–235.
47. *Хокинг С.* Краткая история времени. От Большого взрыва до чёрных дыр. СПб.: Амфора, 2007.