

В.Е. Фортов и динамические методы в физике неидеальной плазмы. Черноголовка

В.Б. Минцев, В.К. Грязнов

Владимир Евгеньевич Фортов внёс огромный вклад в физику экстремальных состояний вещества и высоких плотностей энергии, физику ударных и детонационных волн, теплофизику, химическую физику, энергетику и ряд других областей физики и техники. Среди этих поразительных по широте спектра научных интересов В.Е. Фортова особое место занимают динамические методы в физике неидеальной плазмы. Именно с этой тематики началась его научная деятельность, и именно она оставалась в центре его внимания всю жизнь. Сделана попытка кратко обобщить исследования В.Е. Фортова по неидеальной плазме, генерируемой взрывом, показать логику их возникновения.

Ключевые слова: неидеальная плазма, ударные волны, экстремальные состояния вещества, Черноголовка

PACS numbers: 01.60.+q, 62.50.-p, 64.10.+h, 64.30.-t, 65.40.-b

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.10.039090>

Содержание

1. Введение (1212).
2. Организация работ по неидеальной плазме (1212).
3. Динамические методы в физике неидеальной плазмы. Начало (1214).
4. Развитие динамических методов (1217).
5. Электродинамическая установка (1221).
6. Сотрудничество с немецкими учёными (1223).
7. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе (1225).
8. Заключение (1226).
9. Приложение. Статьи В.Е. Фортова в журнале *Успехи физических наук* (1226).

Список литературы (1227).

1. Введение

Трудно писать о великом человеке, учёном с большой буквы, с которым мы проработали почти 50 лет. Эти годы отмечены вспышками ярких научных идей, большой радостью при их реализации, многодневными спорами при постановке научных задач, вдохновенным тяжёлым круглосуточным трудом без сна для осуществления возникающих идей и воплощения их в жизнь, совместными переживаниями при неудачах, которые в свою очередь рождали новые идеи.

В.Б. Минцев^(а), В.К. Грязнов

Институт проблем химической физики РАН,
просп. Академика Семёнова 1, 142432 Черноголовка,
Московская область, Российская Федерация
E-mail: ^(а) minvb@icp.ac.ru

Статья поступила 27 сентября 2021 г.

Когда говорят о личности такого масштаба, как академик В.Е. Фортов, с такой яркой творческой судьбой, очевидно, что в поле зрения попадают многие научные коллективы и научные направления. Черноголовка и динамические методы генерации неидеальной плазмы сильно выделяются среди них. Недаром в первом интервью с В.Е. Фортовым в качестве Президента РАН на вопрос: "Ваша первая поездка?" — последовал моментальный ответ: "В Черноголовку, в научный центр в Черноголовке...".

В настоящей статье хочется вспомнить, как всё начиналось, рассказать историю появления работ по неидеальной плазме, показать логику возникновения новых научных идей, вспомнить людей, с которыми эти работы начинались. Конечно, такое представление будет несколько субъективным, поскольку описание в основном коснётся работ, в которых мы принимали непосредственное участие.

2. Организация работ по неидеальной плазме

Нетривиальная история попадания В.Е. Фортова в Черноголовку хорошо описана в книге [1] *Траектория. Владимир Фортов*, бережно подготовленной его дочерью Светланой и изданной в 2015 г. к 70-летию Владимира Евгеньевича Фортова. Его судьбу решило яркое выступление на III Всесоюзном симпозиуме по горению и взрыву в 1971 г. в Ленинграде, где он был замечен выдающимся физиком академиком Я.Б. Зельдовичем, рекомендовавшим его Нобелевскому лауреату академику Н.Н. Семёнову, который в свою очередь предложил В.Е. Фортову работать в Отделении Института химической физики (ОИХФ) Академии наук (АН) СССР¹ в Черноголов-

¹ С 1997 г. — Институт проблем химической физики РАН.



Рис. 1. Владимир Фортвов и его учителя в Черногловке: (а) Я.Б. Зельдович, (б) А.Н. Дрёмин, (в) Н.Н. Семёнов (слева) и Ф.И. Дубовицкий на первомайской демонстрации у Дома учёных в Черногловке (1975 г.). (г) В.Е. Фортвов на той же демонстрации. (Из книги [1].)

ке. Директор ОИХФ, ученик и помощник Н.Н. Семёнова, Ф.И. Дубовицкий² зачислил Фортвова младшим научным сотрудником в лабораторию одного из первых заведующих лабораториями Черногловки А.Н. Дрёмина³, который занимался физикой взрыва и детонации.

Так В.Е. Фортвов начал работу в Черногловке, которая в начале 1970-х годов была удивительным местом. Работа здесь велась в режиме "7 на 24", т.е. семь дней в неделю по 24 часа в сутки (это был его принцип) — были созданы все условия для такой напряжённой научной работы. Работалось легко, поскольку рядом были Институт физики твёрдого тела, Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау и др., и можно было получить научную консультацию, придя в любой институт или встретившись с нужным учёным на озере или на прогулке в лесу. В ОИХФ тогда интенсивно развивались работы по исследованию мощных взрывчатых веществ, твёрдых ракетных топлив и процессов детонации и горения.

Первые работы В.Е. Фортвова в Черногловке были посвящены уравнениям состояния конденсированных сред при высоких динамических давлениях, оценкам параметров критической точки, кинетике испарения и конденсации при изоэнтропическом расширении металлов [2–8]. Однако сюда он принёс и свою любовь к неидеальной плазме, любовь, которая привела потом к созданию нового направления в науке — физики экстремальных состояний вещества и динамических процессов при высоких плотностях энергии. Статья Фортвова "Гидродинамические эффекты в неидеальной плазме" [9], опубликованная в журнале *Теплофизика высоких температур* в 1972 г., была посвящена именно проблемам изучения поведения неидеальной плазмы в быстропротекающих процессах.

Физикой неидеальной плазмы В.Е. Фортвов начал заниматься ещё студентом и аспирантом Московского физико-технического института (МФТИ) в Научно-исследовательском институте тепловых процессов (НИИТП)⁴ под руководством В.М. Иевлева⁵. В.Е. Фортвовым совместно с Б.Н. Ломакиным был проведён цикл работ по исследованию свойств неидеальной плазмы цезия на подогреваемой ударной трубе [10, 11]. Эти работы были обобщены в 1980 г. в книге *Теплофизические свойства рабочих сред газозофазного ядерного реактора* под редакцией В.М. Иевлева [12].

Оказавшись в Черногловке, Фортвов понял, что техника ударных волн, генерируемых с помощью энергии конденсированных взрывчатых материалов, является уникальным инструментом для генерации высокоплотной плазмы с сильным межчастичным взаимодействием. Были проведены расчёты состояний вещества за фронтом мощных ударных волн, что нашло отражение в первой совместной работе В.К. Грязнова, И.Л. Иосилевского и В.Е. Фортвова [13], где показано, что ударно-сжатая плазма инертных газов с высокими параметрами неидеальности возникает в этих газах при повышенном начальном давлении и скоростях ударной волны $\sim 5 \text{ км с}^{-1}$, легко реализуемых при использовании взрывных ударных труб.

Хотя В.Е. Фортвов был ярко выраженным теоретиком, было понятно, что для исследований неидеальной плазмы, для которой нет строгой теории ввиду отсутствия малого параметра, необходимо организовать экспериментальные работы и уже на их основе строить теоретические модели. Кроме того, для адекватной интерпретации экспериментов необходимо понимать гидродинамику взрывных течений, уметь проводить их сложное трёхмерное моделирование с реальными параметрами вещества при высоких давлениях и температурах.

² Ф.И. Дубовицкий (1907–1999) — советский и российский физико-химик, член-корреспондент РАН (1991 г.; член-корреспондент АН СССР с 1979 г.). Дважды лауреат Государственной премии СССР (1970 г., 1986 г.), лауреат премии Совета министров СССР (1981 г.).

³ А.Н. Дрёмин (1930–2008) — заслуженный деятель науки, профессор, доктор физико-математических наук, лауреат премии Совета Министров СССР.

⁴ В настоящее время — Государственный научный центр РФ "Исследовательский центр им. М.В. Келдыша".

⁵ В.М. Иевлев (1926–1990) — советский учёный, теплофизик и механик, член-корреспондент АН СССР (1964 г.).

Первую поддержку в организации взрывного эксперимента по неидеальной плазме в Черногловке оказала группа В.В. Якушева. Воспитанник этой группы лаборант физико-механических испытаний Н.А. Афанасьев стал первым сотрудником группы Владимира Фортова. Работа «Об "аномальных" эффектах при выходе детонационной волны на свободную поверхность» [14] показала возможность генерации плотной плазмы воздуха за фронтом ударных волн, образующихся при детонации конденсированных взрывчатых веществ. Большую техническую поддержку в организации экспериментальных работ оказала группа Е.Ф. Лебедева из Института высоких температур АН СССР (ИВТАН)⁶, которая проводила в Черногловке эксперименты по исследованию взрывных магнитогидродинамических генераторов [15].

В.Е. Фортов задумал осуществить широкий фронт экспериментальных работ по исследованию неидеальной плазмы, генерируемой взрывом. Нужны были люди, и он подбирает к себе в группу первых аспирантов и студентов. Задача создания взрывного генератора неидеальной плазмы на основе взрывных ударных труб и исследование её теплофизических свойств была поставлена заочному аспиранту Ю.В. Иванову — сокурснику В.Е. по МФТИ. Аспиранту Томского университета А.А. Леонтьеву были поручены исследования процессов изохорического расширения конденсированных сред в области сильного межчастичного взаимодействия и уравнений состояния неидеальной плазмы инертных газов. Аспирант МФТИ кафедры В.М. Иевлева В.К. Грязнов стал заниматься расчётами свойств ударно-сжатой плазмы с использованием различных моделей неидеальной плазмы. Студенту кафедры высоких температур МФТИ В.Е. Беспалову были поручены эксперименты по исследованию сжимаемости аргоновой плазмы за фронтом мощных ударных волн. В то же время был принят в группу и студент четвёртого курса МФТИ кафедры горения и взрыва (заведующий кафедрой Ф.И. Дубовицкий) В.Б. Минцев. По воспоминаниям автора настоящей статьи В.Б. Минцева:

"Хорошо помню первую встречу с В.Е. Фортовым. В то время студенты имели возможность встречаться с

различными активными учёными и имели право брать себе научного руководителя. Владимир беседовал со мной более двух часов. Он ярко описал научную задачу, открыл мне новый неизведанный мир проблем, возникающих в сильнонагретом веществе с сильным межчастичным взаимодействием, особенно увлечённо он рассказывал о возможных специфических плазменных фазовых переходах и о металлизации вещества при высоких давлениях, ссылаясь на единственную совместную работу наших великих учёных Л.Д. Ландау и Я.Б. Зельдовича 1945 года [16]. В.Е. Фортов подробно рассказал, как он видит решение этих проблем и какие конкретные задачи необходимо решать уже сейчас. Он дал мне две книжки: Зельдовича, Райзера [17] и Франка-Каменецкого [18] — со словами: "Изучайте, молодой человек, и приходите через недельку, выберите то, что Вам наиболее интересно". Так моей первой задачей стало исследование электропроводности неидеальной плазмы".

3. Динамические методы в физике неидеальной плазмы. Начало

Началась интенсивная дружная работа всей группы В.Е. Фортова. Прежде всего необходимо было разобраться с методами генерации взрывной неидеальной плазмы. Дело в том, что для проведения измерений теплофизических свойств сред за фронтом ударных волн и получения однородного плазменного сгустка необходимо обеспечить одномерность и стационарность течения. Тогда параметры ударно-сжатого вещества оказываются связанными с кинематическими параметрами течения простыми алгебраическими соотношениями, выражающими законы сохранения массы, импульса и энергии, что позволяет определить калорическое уравнение состояния вещества в виде зависимости внутренней энергии от давления и удельного объёма: $E = E(P, V)$ [17, 19]. Однако внутренняя энергия не является термодинамическим потенциалом по отношению к переменным P и V и для построения замкнутой термодинамической системы необходимо дополнительно выяснить зависимость температуры, $T = T(P, V)$, от этих переменных.

К моменту начала наших работ взрывные методы генерации ударных волн в газах пониженной плотности интенсивно развивались в СССР и США. Был создан широкий спектр устройств — от простых "линейных" взрывных ударных труб до специальных кумулятивных устройств, позволяющих получать скорости ударных волн до 100 км с^{-1} . Эти устройства подробно описаны в обзоре "Взрывные ударные трубы" [20]. Другая техника — на основе метания плоского металлического ударника с помощью конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) — широко использовалась для исследования уравнений состояния конденсированных сред при высоких динамических давлениях [21]. Эту технику также решено было применить для исследования неидеальной плазмы.

В разработанной взрывной линейной ударной трубе (рис. 3) [22] ионизирующая ударная волна образуется при расширении в исследуемый газ продуктов детонации конденсированного ВВ. Применение специальным образом профилированной детонационной линзы и выбор соответствующих размеров активного заряда ВВ обеспечивали одномерность и стационарность параметров детонационного фронта при его выходе из ВВ в исследуемый газ.

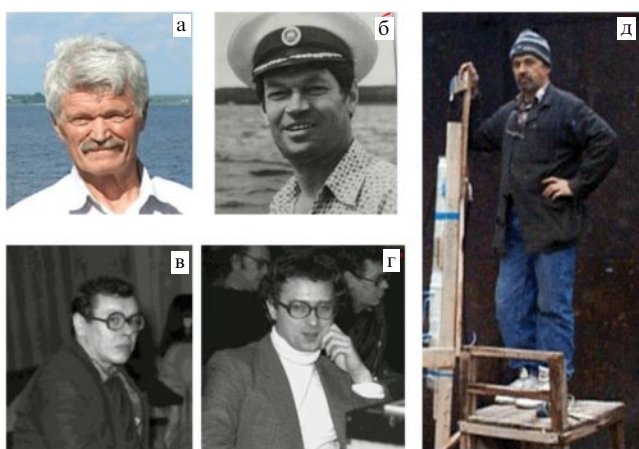


Рис. 2. Первые аспиранты и студенты: (а) В.К. Грязнов, (б) Ю.В. Иванов, (в) В.Е. Беспалов, (г) В.Б. Минцев, (д) А.А. Леонтьев.

⁶ В настоящее время — Объединённый институт высоких температур (ОИВТ) РАН.

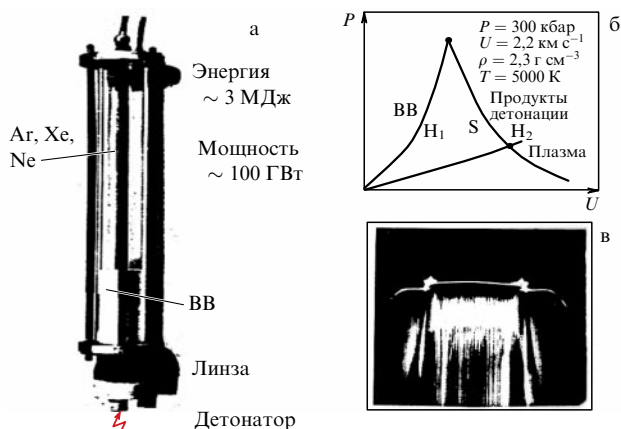


Рис. 3. (а) Фотография взрывного генератора неидеальной плазмы [22]. (б) Диаграмма процесса работы генератора в переменных давление P — массовая скорость вещества U : H_1 — ударная адиабата ВВ, S — изэнтропа расширения продуктов детонации, H_2 — ударная адиабата плазмы. (в) Фоторегистрограмма течения во взрывном генераторе для определения кривизны ударного фронта. (Из презентации В.Е. Фортова 1977 г.)

дуемый газ. Полное энергосодержание в каждом эксперименте составляло $\sim 3 \times 10^6$ Дж при мощности $\sim 10^{11}$ Вт, что приводило, разумеется, к разрушению всего устройства и необходимости работы в специально защищённых помещениях с соблюдением мер безопасности. Результаты фотографических, электрофизических и рентгенографических измерений показали одномерность и квазистационарность течения плазмы, что обеспечивалось инерционным удержанием ударно-сжатой плазмы массивными стенками канала ударной трубы.

Скорость фронта ударной волны измерялась оптическим и электроконтактным базисными методами с помощью скоростных кинокамер и ионизационных датчиков с точностью $\sim 1-1,5\%$. В пределах этой погрешности фронт ионизации совпадал с фронтом свечения ударной волны и положением гидродинамического скачка уплотнения. Плотность ударно-сжатой аргоновой плазмы регистрировалась с точностью $\sim 8\%$ методом им-

пульсной рентгенографии [22, 23], не вносящим возмущения в поток плазмы и обладающим высоким временным ($\sim 10^{-7}$ с) и пространственным (~ 2 мм) разрешением.

Благодаря прозрачности газа перед фронтом ударной волны и малым размерам вязкого скачка уплотнения тепловое излучение может беспрепятственно выходить из плазменного объёма и предоставлять информацию о равновесной температуре и коэффициентах поглощения ударно-сжатой плазмы. Интенсивность этого излучения при яркостном методе регистрации температуры (точность $5-10\%$) определялась фотометрическим сравнением развёрток во времени свечения ударно-сжатой плазмы и эталонных источников света. Совместная регистрация скорости фронта и плотности определяет в соответствии с законами сохранения калорическое уравнение состояния неидеальной плазмы $E = E(P, V)$, которое совместно с измеренной зависимостью $T = T(P, V)$ даёт термодинамически полную информацию о плазме аргона при давлении до 600 МПа и температуре $T = 15,5-23$ кК.

Для измерений термодинамических и оптических характеристик плазмы при более высоких давлениях, по сравнению с таковыми в ударных трубах, применялись взрывные генераторы прямоугольных ударных волн (рис. 4) различной интенсивности и длительности. В этих установках ионизирующая ударная волна возникала при расширении в исследуемые газы (аргон, ксенон) металлических или полимерных мишеней, предварительно сжатых до давлений $\sim 10^6$ бар. Мощные ударные волны в мишенях возбуждались линейными взрывными металлическими устройствами [24], действие которых основано на ускорении продуктами детонации плоских металлических ударников до скоростей $2-6$ км с^{-1} . Характерные энергосодержания в опытах составляли $2-30 \times 10^6$ Дж при мощности 10^{11} Вт.

В опытах на этих генераторах электроконтактным и оптическим базисными методами независимо регистрировались совместно два кинематических параметра: скорость фронта D и массовая скорость U плазмы. Открытые электроконтактные датчики регистрировали на скоростных осциллографах скорость фронта D с точностью $\sim 1\%$. Скорость U измерялась (точность $1-$

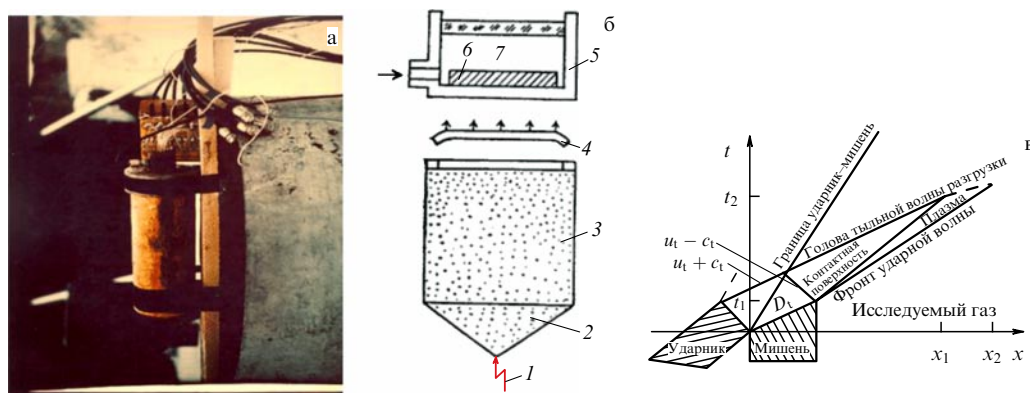


Рис. 4. (а) Фотография взрывного генератора прямоугольных ударных волн. (б) Схема устройства [24]: 1 — капсуль-детонатор, 2 — детонационная линза, 3 — заряд ВВ, 4 — металлический ударник, 5 — экспериментальная сборка, 6 — мишень, 7 — исследуемый газ. (в) Диаграмма в координатах время — расстояние ($t-x$) работы генератора: D_1 — скорость ударной волны в мишени, t_1 и t_2 — момент выхода волны разгрузки на тыльную поверхность ударника и момент догона тыльной волной разгрузки контактной поверхности соответственно, x_1 , x_2 — координаты контактной поверхности и фронта ударной волны в момент догона тыльной волной разгрузки контактной поверхности соответственно.

2 %) с помощью закрытых датчиков специальной конструкции, не реагирующих на ударную волну в плазме и срабатывающих в момент прихода тяжёлой контактной поверхности раздела плазмы с мишенью. При оптической методике регистрации на заданном расстоянии от мишени устанавливалась плексигласовая преграда, через которую с помощью скоростных кинокамер или электронно-оптических преобразователей фиксировалось излучение ударно-сжатой плазмы — характер изменения этого свечения позволял судить о движении ударной волны и контактной поверхности плазмы. Полученные результаты по уравнению состояния неидеальной плазмы аргона и ксенона относятся к широкому диапазону параметров: $P \sim 0,03\text{--}3$ ГПа, $T \sim 18\text{--}22$ кК, в котором реализуется развитая ионизация и сильное кулоновское взаимодействие, параметр неидеальности $\Gamma \sim 1\text{--}5$.

Анализ полученных термодинамических данных показал, что в сильно сжатой плазме наблюдаются эффекты, не описываемые стандартной плазменной теорией, в которой учитывается кулоновское взаимодействие заряженных частиц, а атомы обычно считаются идеальной подсистемой. Не помогало адекватно описать экспериментальные данные и учёт взаимодействия нейтральных частиц в рамках вириального разложения. На самом деле в рассматриваемой области высоких плотностей плазмы средние межчастичные расстояния сравнимы с характерными размерами атомов, значительная доля которых (вследствие высокой плотности плазмы) находится в возбуждённом состоянии. Возникла идея попытаться учесть вклад в термодинамические свойства плазмы возбуждённых атомов, в результате взаимодействия которых с окружающими частицами деформируется их спектр возбуждений. Эти эффекты, кстати, были обнаружены и в первых экспериментах по ударному сжатию цезиевой плазмы, проведённых ранее В.Е. Фортовым вместе с Б.Н. Ломакиным в НИИТП [11].

Для того чтобы оценить возможные эффекты, связанные с деформацией спектра атомного возбуждения, у В.Е. Фортова возникла идея привлечь к сотрудничеству работавших под руководством Ави́ги Николаевны Ивановой математиков ОИХФ, которые на тот момент обладали уникальным опытом расчёта структуры многоэлектронных атомов, — А.Н. Ивановой с коллегами впервые в мире был разработан метод расчёта электронной структуры многоэлектронных атомов на основе метода Хартри–Фока, обладавший необходимой устойчивостью и сходимостью. Работа А.Н. Ивановой с соавторами [25] была опубликована в *Литовском физическом сборнике* в 1963 г. на несколько месяцев раньше работы Шарлотты Фрез Фишер [26], считающейся пионером в этой области. Так в результате этого сотрудничества появилась модель ограниченного атома, которая как раз и учитывала влияние внешнего окружения на внутреннюю структуру атомов. С помощью этой модели было объяснено [23, 24, 27] появление эффекта дополнительного отталкивания в уникальных ударно-волновых экспериментах, в которых генерировалась сильно сжатая плазма мегабарных давлений.

Электропроводность во взрывной ударной трубе измерялась четырёхточечным зондовым методом, обладающим высоким пространственным разрешением и относительной простотой реализации в условиях однократного динамического эксперимента (рис. 5) [28]. Была измерена

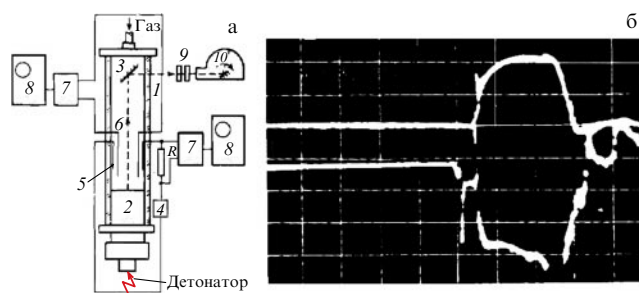


Рис. 5. Схема измерения электропроводности: 1 — канал взрывной ударной трубы, 2 — заряд ВВ, 3 — зеркало, 4 — источник постоянного тока, 5, 6 — токовые и потенциальные электроды, 7 — дифференциальные усилители, 8 — осциллографы, 9 — оптическая система, 10 — скоростная кинокамера. (б) Типичная осциллограмма тока и напряжения, развёртка 2,5 мкс на одно деление [28].

электропроводность плазмы инертных газов в широком диапазоне параметров неидеальности, от $\Gamma \sim 0,3$, где различие между теориями невелико и имеется значительное количество опытных данных, вплоть до области экстремально высоких $\Gamma \sim 5\text{--}10$, при которых большинство теоретических приближений расходится. Полученная совокупность экспериментальных данных определённо указывала на занижение измеренных значений электропроводности по сравнению с предсказываемыми теорией Спитцера [28]. Количественное расхождение между результатами различных групп экспериментов связывалось как с особенностями поведения высокотемпературной плазмы, так и с фактическим несоответствием первичных данных и трудностями выделения кулоновской компоненты в слабоионизованной плазме.

Для описания результатов экспериментов была предложена модель [29], в которой ионные корреляции описывались в приближении Займана, заимствованном из теории жидких металлов и полупроводников, а рассеяние зарядов рассчитывалось в борновском приближении с экранированным кулоновским потенциалом. Полученные соотношения обладают правильной спитцеровской асимптотикой при $\Gamma \ll 1$ и приемлемыми экстраполяционными свойствами, не имеют нефизических расхождений и удовлетворительно описывают "низкотемпературный" эксперимент вплоть до области экстремально высоких Γ .

Кроме организации эксперимента по неидеальной плазме, генерируемой взрывом, и непосредственного участия в нём В.Е. Фортов продолжает заниматься уравнениями состояния конденсированных сред, исследованием уравнения состояния металлов методом изоэнтропического расширения и "плазменным фазовым переходом" при детонационных явлениях, изучает гидродинамические эффекты в неидеальных средах. Результаты исследований публикуются в центральных журналах, таких как *Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ)*, *Доклады Академии наук СССР (ДАН СССР)*, *Теплофизика высоких температур (ТВТ)* и др. (см. список литературы).

Зимой 1977 г. В.Е. Фортов успешно защищает докторскую диссертацию "Исследование неидеальной плазмы динамическими методами" на специализированном совете при ИВТАН. Консультантом во время работы над диссертацией был академик Я.Б. Зельдович, а оппонентами выступили профессор Л.В. Альтшулер, чьё имя



Рис. 6. Лаборатория физической газодинамики ОИХФ АН СССР (1981 г.). Верхний ряд (слева направо): В.Я. Терновой, В.Е. Беспалов, В.К. Грязнов, В.Б. Минцев, В.Е. Фортков, Н.А. Афанасьев. Средний ряд (слева направо): А.Л. Ни, Н.С. Гуцева, Г.А. Павлов, А.А. Овчинников, А.В. Бушман, С.В. Дудин, А.П. Жарков. Нижний ряд (слева направо): П.В. Скачков, С.В. Разорёнов, Г.И. Канель, Л.Г. Ермолов, М.И. Кулиш, Ю.Б. Запорожец, В.П. Патлажан, А.В. Шутов, А.С. Филимонов, Д.И. Герасимов.

занимает достойное место в ряду создателей советского ядерного оружия, и академик Е.П. Велихов — всемирно известный специалист в области плазменных исследований. Оппоненты отметили, что комплекс проведённых Фортковым исследований знаменует собой появление нового научного направления — динамической физики неидеальной плазмы. Действительно, уже после выхода серия обзоров в *УФН* [30–33]. В соавторстве с И.Т. Якубовым выпускается книга *Физика неидеальной плазмы* [34].

1 декабря 1977 года подписывается приказ о создании лаборатории физической газодинамики под руководством В.Е. Форткова на основе уже существующей группы (рис. 6). В неё дополнительно входят только что защитившие студенческие дипломы экспериментаторы В.Я. Терновой, А.П. Жарков, теоретики кандидат наук Г.А. Павлов и выпускник Куйбышевского политехнического института А.А. Овчинников. Первым заместителем по лаборатории стал В.Е. Беспалов. Немного позднее в связи с необходимостью проведения массивных газодинамических расчётов в лабораторию приходят А.Л. Ни, А.В. Шутов. Для активной работы с моделями уравнений состояния вещества привлекается ученик Л.В. Алтшулера А.В. Бушман, который приходит со своим учеником И.В. Ломоносовым, являющимся в настоящее время исполняющим обязанности директора нашего Института проблем химической физики (ИПХФ) РАН. В середине 1980-х годов в связи с работой над проектом "Вега" в лабораторию входит группа Г.И. Канеля. А.Л. Ни после защиты докторской диссертации в 1982 г. становится заместителем заведующего лабораторией. В 1991 г. эта работа поручается В.Б. Минцеву, а в 2001 г. замести-

телем заведующего уже Отдела экстремальных состояний вещества становится В.К. Грязнов.

4. Развитие динамических методов

После защиты докторской диссертации В.Е. Фортков не останавливается, он полон сил, энергии и идей, фронт работ по исследованию неидеальной плазмы и процессов при воздействии мощных ударных волн на плотные среды значительно расширяется. Совместно с коллегами из г. Сарова проводятся эксперименты по термодинамике неидеальной плазмы инертных газов в более широком диапазоне параметров при давлениях до $P \sim 4$ ГПа и температурах до $T \sim 56$ кК [27] (рис. 7). Эти эксперименты подтвердили тенденции, обнаруженные ранее при ударном сжатии цезиевой [11, 35] и аргоновой [23] плазмы. Для описания данного эффекта на основе химической модели плазмы в [27] применены модель "ограниченного" атома [23] и псевдопотенциальная модель [36] плазмы.

Примерно в то же время проводились работы (В.Е. Беспалов, В.Е. Фортков) по исследованию оптических свойств ударно-сжатой плазмы. Измерения коэффициента поглощения неидеальной аргоновой плазмы в зависимости от плотности показали его значительное занижение по сравнению с расчётными величинами при больших плотностях плазмы [37] (рис. 8). Причём с повышением плотности экспериментальные значения стремились к теоретическим, обусловленным только связанно-связанными переходами. Этот эффект был интерпретирован в [37] как результат деформации электронного энергетического спектра атомов при их сжатии под дей-

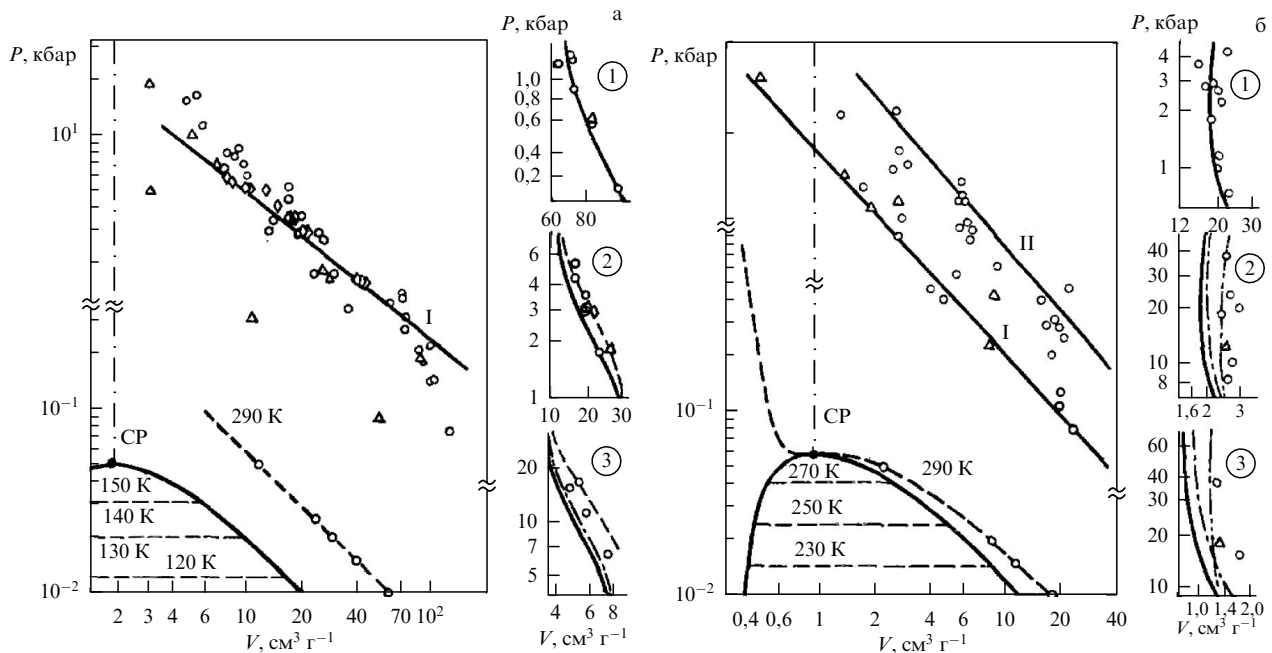


Рис. 7. Фазовые диаграммы аргона (а) и ксенона (б) [27]. В левых частях рис. а и б отмечены границы двухфазной области и критические точки СР, штриховые линии — изотермы исходных состояний, штрихпунктирные — изохоры V_{CP} , линии I и II — границы однократной и двукратной ионизации, кружки — результаты динамических экспериментов (см. [27]). В правых частях рис. а и б проводится сравнение экспериментальных ударных адиабат (символы) с результатами теорий: сплошные кривые — учёт взаимодействия заряженных частиц в кольцевом дебаевском приближении [13], штрихпунктирные — дополнительный учёт взаимодействия атомов в приближении второго вириального коэффициента [27], штриховые — расчёт по модели "ограниченного" атома [27], штрихпунктирные с двумя точками — взаимодействие зарядов по модели [27] с псевдопотенциалом. В правой части рис. а — ударные адиабаты аргона при $P_0 = 1$ бар ①, $P_0 = 5$ бар ②, $P_0 = 20$ бар ③, в правой части рис. б — ударные адиабаты ксенона при $P_0 = 1$ бар ①, $P_0 = 10$ бар ②, $P_0 = 20$ бар ③.

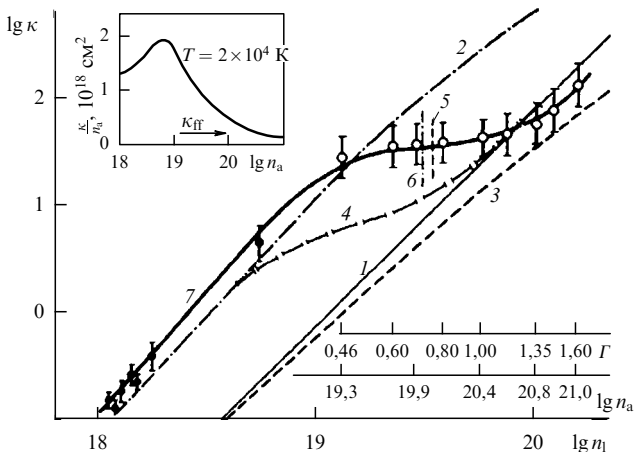


Рис. 8. Коэффициент поглощения неидеальной аргонной плазмы в зависимости от плотности [37]. Светлые кружки — данные [37], тёмные — данные других работ (см. ссылки в [37]). Результаты расчёта: 1 — свободно-свободные переходы (κ_{ff}), 2 — учтена фотоионизация, 3 — свободно-свободные переходы с учётом плазменного экранирования, 4 — расчёт по модели ограниченного атома [37], 5, 6 — оценка по результатам других работ (см. ссылки в [37]); кривая 7 соединяет экспериментальные точки, приведённые к частоте излучения $h\nu = 2,14$ эВ и температуре $T = 2 \times 10^4$ К. На вставке — коэффициент поглощения κ/n_a , рассчитанный на один атом, в зависимости от плотности атомов.

ствием на них окружающих частиц. В плотной плазме межчастичное взаимодействие делает внутриатомный потенциал более короткодействующим, что приводит к конечному числу дискретных энергетических уровней и последовательному переходу высоковозбуждённых со-

стояний в непрерывный спектр с возрастанием плотности плазмы. Такое исчезновение части возбуждённых энергетических уровней исключает механизм фотоионизационного поглощения из этих состояний и приводит к наблюдаемому в эксперименте уменьшению коэффициента поглощения. Для описания этого эффекта вновь была привлечена модель ограниченного атома, но в данном случае в дополнение к термодинамическим величинам вычислялись с использованием рассчитанных волновых функций возбуждённых атомов сечения фотоионизации аргона.

Был также расширен диапазон параметров при исследовании электропроводности неидеальной плазмы. Усовершенствование временных характеристик зондовых измерений электропроводности и улучшение газодинамики течения на взрывной ударной трубе позволили провести измерения за отражёнными ударными волнами и повысить давления в ксеноне до $P \sim 7$ ГПа и температуру в плотной плазме до $T \sim 100$ кК при степени ионизации вплоть до трёхкратной [38]. Для реализации сильнонагретой неидеальной плазмы использовались также кумулятивные устройства на основе сжатия потока в условиях остроугольной геометрии. Электрофизические свойства такой плазмы оказались в значительной мере неожиданными [38], так как они свидетельствовали об отсутствии подобия кулоновской компоненты неидеальной плазмы — безразмерная электропроводность высокотемпературной плазмы (рис. 9) оказывается меньше низкотемпературной при тех же величинах кулоновской неидеальности Γ . Анализ высокотемпературных данных показывает, что причиной этого эффекта является некулоновский характер рассеяния высокоэнергетичных элек-

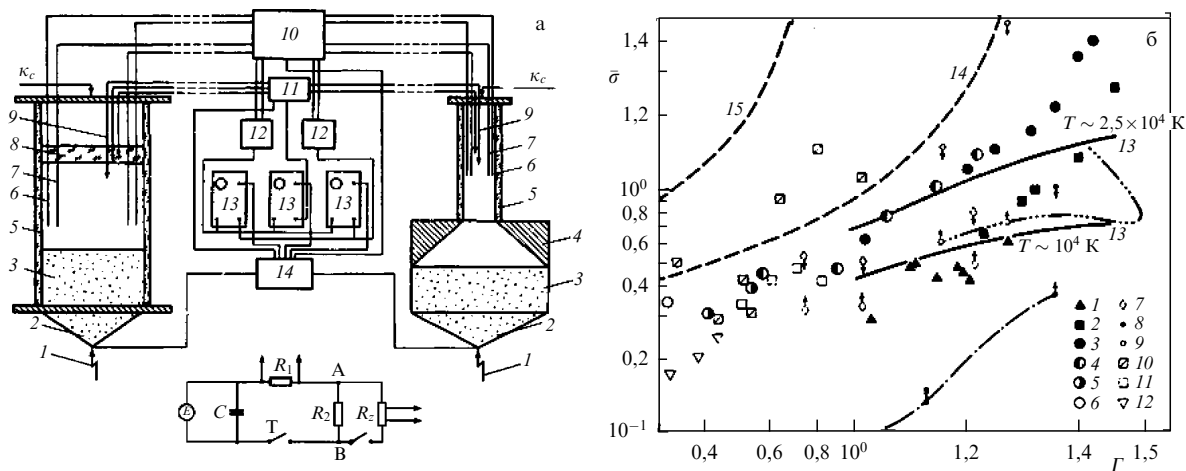


Рис. 9. (а) Схема измерений электропроводности σ на линейном (в левой части рисунка) и кумулятивном (в правой части рисунка) генераторах [38]: 1 — капсуль-детонатор, 2 — взрывная линза, 3 — заряд ВВ, 4 — камера сжатия, 5 — канал ударной трубы, 6 и 7 — токовые и потенциальные электроды, 8 — преграда, 9 — электроды измерения скорости ударной волны, 10 — блок генерации измерительного импульса электропроводности, 11 — блок генерации измерительного импульса скорости ударной волны, 12 — дифференциальные усилители, 13 — регистрирующие осциллографы, 14 — блок задержки. В нижней части рисунка показана принципиальная электрическая схема измерений: E — источник напряжения, C — зарядный конденсатор, R_1 , R_2 — эталонные сопротивления, T — замыкающий ключ, A , B — цепь замыкания плазмы. (б) Безразмерная электропроводность в зависимости от параметра неидеальности [38]: 1–12 — экспериментальные данные (см. ссылки в [38]), 13–15 — результаты расчёта (см. ссылки в [38]).

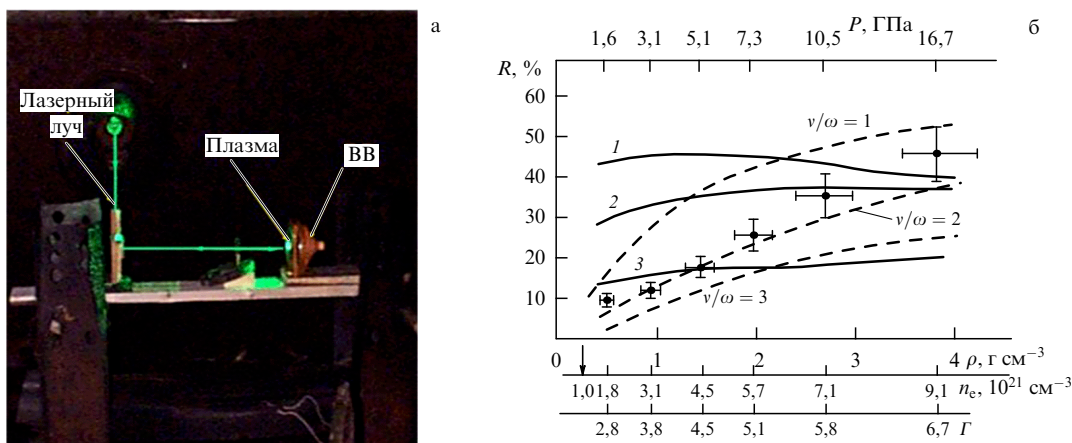


Рис. 10. (а) Сборка перед экспериментом. (б) Зависимость коэффициента отражения R ксеноновой плазмы от плотности [39]. Результаты расчёта [39]: 1 — с применением теории Друде, 2 — с использованием интегральных соотношений, 3 — с учётом электронного рассеяния на тепловых плазменных колебаниях; v — электронная частота столкновений, ω — частота лазерного излучения.

тронов на тяжёлых ионах. Действительно, с возрастанием температуры амплитуда кулоновского рассеяния $f_C \sim e^2/(k_B T)$ убывает и оказывается сравнимой с характерными размерами ионов ксенона $\sim 4 \text{ \AA}$, так что высокоэнергетические электроны проводимости при своём рассеянии могут подходить достаточно близко к ядру, где потенциал взаимодействия уже не является чисто кулоновским — он искажён внутренними электронными оболочками. В этой окрестности ядра потенциал оказывается более сильным, чем внешний ионный потенциал, что и приводит к увеличению сечения рассеяния и, следовательно, к наблюдаемому в опытах (рис. 9б) относительному уменьшению электропроводности.

Проведённые эксперименты давали лишь косвенную информацию о свободных носителях в неидеальной плазме. Между тем проблема определения электронной концентрации выглядела очень острой: какие электроны можно считать связанными, а какие — свободными? Поэтому возникла идея использования лазерного излучения

для диагностики неидеальной плазмы. Лазеры как раз в то время стали широко применяться в экспериментальной технике. Было предложено использовать хорошо известный в радиолокации и физике твёрдого тела эффект полного отражения электромагнитного излучения с длиной волны λ от среды с электронной концентрацией, превышающей критическое значение $n_e^{\text{кр}} \geq \pi c^2 m / (\lambda^2 e^2)$. Концентрация свободных носителей в плотной плазме достаточно велика, поэтому область интересующих нас длин волн лежит в оптическом диапазоне ($n_e^{\text{кр}} = 10^{21} \text{ см}^{-3}$ соответствует $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$). Ю.Б. Запорожцем был построен экспериментальный стенд по лазерной диагностике плотной плазмы ксенона, создаваемой взрывным генератором прямоугольных импульсов, и получены первые данные по отражательным свойствам ксенона при давлениях до $P \sim 17 \text{ ГПа}$ и электронных концентрациях $n_e \sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ [39, 40].

Результаты оказались достаточно неожиданными (рис. 10): наблюдалось плавное увеличение коэффициен-

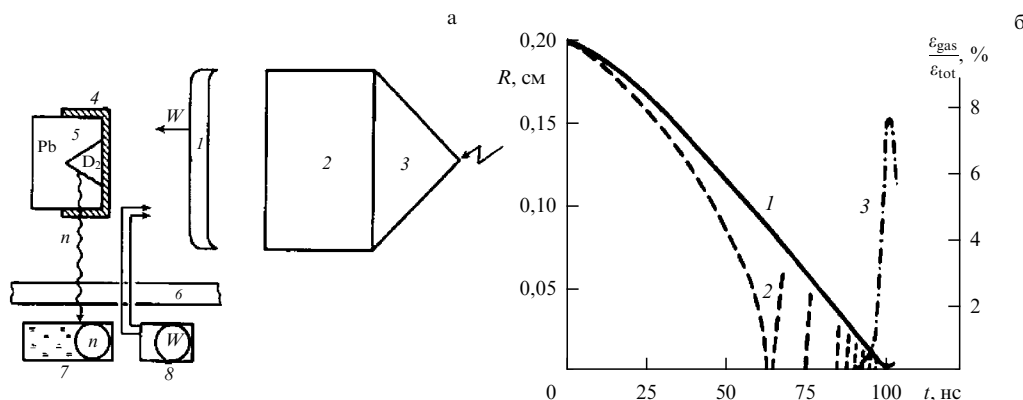


Рис. 11. (а) Схема установки по генерации нейтронов: 1 — ударник, 2 — заряд ВВ, 3 — детонационная линза, 4 — крышка мишени, 5 — мишень, 6 — стальная защита, 7 — блок регистрации нейтронов, 8 — блок измерения скорости полёта ударника. (б) Результаты численного расчёта динамики сжатия мишени: 1 — движение внутренней границы лайнера, 2 — ударные волны, 3 — доля энергии, переданная дейтериевой плазме [46].

та отражения в зависимости от плотности, вплоть до значений $R \sim 50\%$, характерных для металлов, — ожидаемой ступеньки на критической плотности обнаружено не было. Удалось лишь оценить частоту столкновений электронов, которая оказалась порядка удвоенной лазерной частоты, $\sim 3 \times 10^{15} \text{ с}^{-1}$.

В это время началось наше сотрудничество с Игорем Ткаченко, тогда работавшим в Одесском университете (сейчас Игорь — профессор Университета Валенсии (Испания)). Он предложил использовать для определения диэлектрической проницаемости неидеальной плазмы данные по отражению [41]. Немного позднее началось сотрудничество с немецкими учёными из Университета Росток (Г. Репке, Р. Редмер, Х. Рейнгольц). В тесном сотрудничестве с ними были поставлены новые эксперименты на различных длинах волн и при различных углах падения лазерного излучения [42–44]. Были учтены влияние ширины ударного фронта и кинетика установления во фронте ионизационного равновесия, что привело к разумному описанию всей совокупности экспериментов. Это плодотворное сотрудничество продолжается и в настоящее время.

Отметим, что желаемое прямое измерение электронной концентрации в неидеальной плазме было осуществлено несколько позднее, после введения в строй электродинамической установки, которая позволяла проводить эксперименты с сильными магнитными полями. Так, в работах Н.С. Шилкина исследовались эффект Холла в неидеальной плазме и зависимость электросопровитивления от величины магнитного поля [45].

С неидеальной плазмой связывают реализацию многих энергетических и космических проектов. В одном из них — разработке физических принципов работы газофазного ядерного реактора — В.Е. принял участие, ещё когда был студентом и аспирантом. Другое чрезвычайно интересное направление — управляемый термоядерный синтез. Для того чтобы пошла реакция синтеза, слияния, нужны очень высокая температура и крайне высокие давления. Впервые такое "горение", только инициированное ядерным зарядом, было реализовано более 60 лет назад при взрыве первой водородной бомбы. Однако такой взрыв — процесс неуправляемый, пригодный только для разрушения. Чтобы использовать его для созидания,

надо научиться его контролировать. В.Е. начал развивать схемы реализации импульсного термоядерного синтеза, основанные на сжатии дейтерия в конических мишенях с помощью лайнеров, разгоняемых конденсированными взрывчатыми веществами (КВВ) до высоких скоростей [46]. Первые шаги были сделаны на стандартном генераторе прямоугольных импульсов, разгоняющих металлические ударники до скоростей $\sim 5,5 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 11). Работу поддержал академик А.М. Прохоров, который не раз приезжал в Черногоровку для ознакомления с "живыми" результатами, а его сотрудник из Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН) И.К. Красюк дневал и ночевал в нашем институте.

Совместная работа всей нашей лаборатории и сотрудников ФИАНа привела к интересным результатам: был зарегистрирован нейтронный выход порядка 10^6 нейтронов за импульс, что говорило о реализации в условиях эксперимента термоядерной плазмы при давлении $P \sim 5\text{--}10 \text{ ТПа}$, температуре $T \sim 0,3\text{--}0,5 \text{ кэВ}$ и степени сжатия $\sim 10^3$. Конечно, этого недостаточно для зажигания реакции, в связи с чем в дальнейшем усилия были направлены на увеличение скорости метания ударников. Были разработаны слоистые системы, позволяющие разгонять тонкие фольги из молибдена толщиной 0,1 мм до скоростей $\sim 12,8 \text{ км с}^{-1}$ [47], и конические взрывные генераторы, в которых были реализованы скорости ударной волны $\sim 17 \text{ км с}^{-1}$ в меди и получены давления $P \sim 1,4 \text{ ТПа}$ [48] (рис. 12).

Правда, платой за такое увеличение параметров стало уменьшение времени существования плазменного сгустка и существенно меньшая его масса. Однако это было уже на несколько лет позднее, в экспериментах с термоядерной плазмой ударные устройства не использовались, поскольку проведённые на основании первых экспериментов расчёты показали, что скорости ударников в такой постановке для зажигания термоядерной реакции должны быть в несколько раз больше. Тем не менее эти устройства оказались чрезвычайно интересными для исследования уравнения состояния вещества в мегабарном диапазоне давлений. Существенный прогресс в реализации простых конических конструкций терапаскальных давлений был достигнут лишь в последнее десятилетие [49].

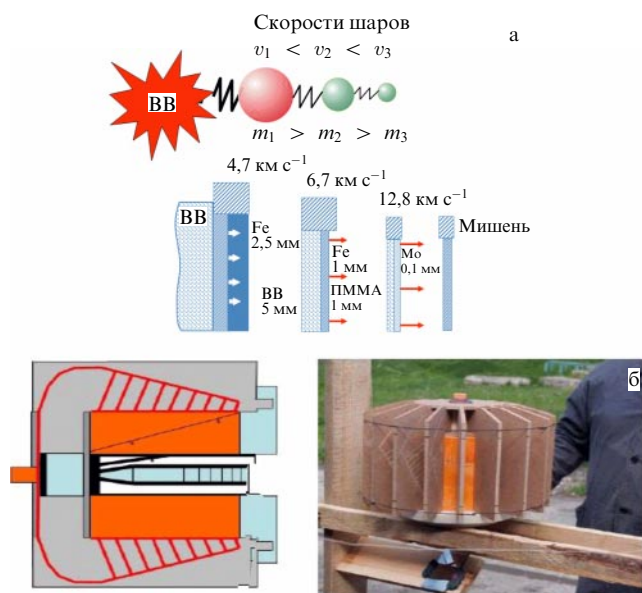


Рис. 12. (а) Схема градиентной кумуляции [47] (ПММА — полиметилметакрилат). (б) "Маховский" кумулятивный генератор [49]. (Из презентации В.Е. Фортова 2012 г.)

5. Электродинамическая установка

Каким образом можно существенно повысить скорости метания конденсированных ударников? Все методы метания с помощью химической энергии КВВ имеют существенные ограничения, связанные с конечной скоростью звука толкающего сжатого и разогретого газа. Здесь перспективным выглядит использование электромагнитных пондеромоторных сил, при котором ограничений такого рода, на первый взгляд, не видно. В конце 1970-х годов была очень популярной идея использования для достижения скоростей порядка 100 км с^{-1} так называемого рельсотрона [50], представляющего собой две параллельные металлические шины, между которыми движется замыкающий электрическую цепь пластмассовый ударник, разгоняемый магнитопритянутым разрядом с импульсным током $\sim 1 \text{ МА}$. В этом устройстве для создания мощных импульсов тока привлекательным выглядело использование химической энергии конденсированных взрывчатых веществ, которое могло бы значительно уменьшить его габариты. Дело в том, что плотность химической энергии в КВВ составляет несколько мегаджоулей на 1 кг, что на несколько порядков превышает плотность запасённой в конденсаторах энергии. Разработанные к тому времени в Сарове и Лос-Аламосе различные конструкции взрывомагнитных генераторов (ВМГ) представляли собой достаточно компактные устройства, позволяющие получать рекордно высокие значения тока ($\sim 300 \text{ МА}$), энергии ($\sim 300 \text{ МДж}$), магнитных полей ($\sim 28 \text{ МГс}$) [51, 52].

В это же время В.Е. Фортов при обсуждении экспериментов с нейтронами познакомился с Л.П. Феоктистовым⁷, и ими была предложена идея [53] создания

мощного источника термоядерных нейтронов на основе обжатия с помощью цилиндрического лайнера предварительно разогретой до температур $\sim 0,6 \text{ кэВ}$ плазмы, находящейся в продольном магнитном поле. Для ускорения лайнера предлагалось использовать химическое КВВ, а для предварительного нагрева плазмы — столкновение потоков дейтерия, разгоняемых плазменными ускорителями до скоростей $\sim 300 \text{ км с}^{-1}$.

Для реализации таких работ необходимо было создать специальный взрывной стенд, оснащённый низковольтными и высоковольтными конденсаторными батареями мегаджоульного уровня запаса энергии. Директор ОИХФ Ф.И. Дубовицкий поддержал эти идеи, было выделено место на полигоне в Павильоне А-3 ОИХФ РАН, и начались закупки необходимого оборудования и строительство электродинамической установки, научное руководство которой было поручено В. Минцеву. Надо честно сказать, хотя работа со взрывчатыми материалами в нашем институте была поставлена на высоком уровне, специалистов по высоковольтной технике у нас не было. Пришлось ездить по разным институтам, подбирать необходимое оборудование, консультироваться по различным вопросам. К 1986 году установка начала работать, были проведены предварительные эксперименты.

В 1986 г. ушёл из жизни Н.Н. Семёнов, Ф.И. Дубовицкий постепенно отдалялся от управления институтом. Личности масштаба Н.Н. Семёнова, способной удерживать большой институт, не находилось, хотя сильных учёных в области химической физики было много. Непрерывно менялись директора, на короткое время даже был назначен "варяг" из Института общей и неорганической химии (ИОНХ) АН СССР. Лаборатория В.Е. Фортова переходила из сектора в сектор (из сектора макрокинетики и газодинамики экстремальных химико-технологических процессов в сектор физики горения и взрыва, и наоборот). В 1986 году Владимир Евгеньевич был избран заведующим лабораторией в ИВТАН и перешёл туда по приглашению академика А.Е. Шейндлина на постоянную работу. С собой он забрал ряд задач, связанных с сильноточной электроникой, в частности рельсотронную тематику. К его чести, надо сказать, что про Черноголовку он не забыл, он остался заведующим лабораторией на общественных началах. Однако его отсутствия мы даже не ощущали, поскольку каждое его появление в Черноголовке сопровождалось бурными обсуждениями научных проблем и постановкой новых задач. С тех пор появилась "святая" пятница — день, когда Владимир Фортов обязательно был в лаборатории, если, конечно, не находился в дальних командировках. Эта традиция сохранялась всегда, даже когда В.Е. занимал ответственные государственные должности, до самых последних дней.

Несмотря на все пертурбации в институте, работа на электродинамической установке стала развиваться дальше, хотя акценты сместились. Как уже говорилось, рельсотронной тематикой стали интенсивно заниматься в ИВТАН, где в тот момент уже имелись всё необходимое оборудование и опыт работ. К работе с нейтронными источниками мы вернулись только через 15 лет благодаря активности директора Государственного научного центра "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (ТРИНИТИ) В.Е. Черковца. К 2010 году были разработаны специальные взрывомаг-

⁷ Л.П. Феоктистов (1928–2002) — советский и российский физик-ядерщик, один из разработчиков ядерного и термоядерного оружия в СССР, академик РАН (2000 г.), Герой Социалистического Труда (1971 г.), лауреат Ленинской премии (1958 г.) и Государственной премии СССР (1978 г.).

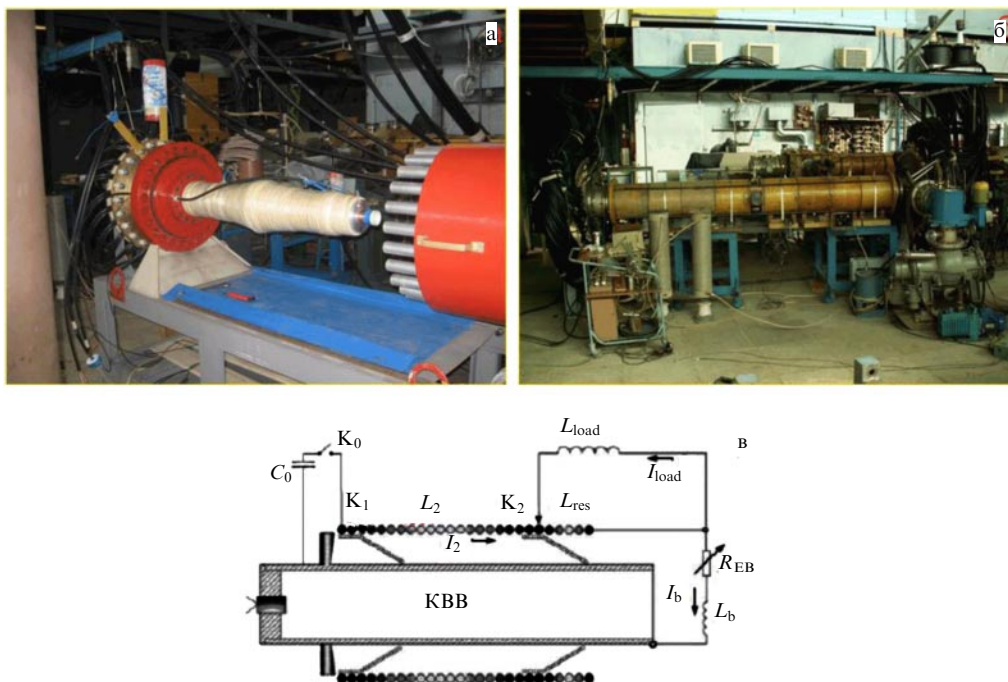


Рис. 13. (а) Взрывомagnetный генератор для запитки плазменных ускорителей. (б) Плазменный ускоритель ТРИНИТИ. (в) Электрическая схема работы ВМГ с ключами-замыкателями K_0 , K_1 , K_2 , взрывным прерывателем R_{EB} , L_2 — начальная индуктивность ВМГ, L_{res} — остаточная индуктивность ВМГ, L_{load} — индуктивность нагрузки, L_b — балластная индуктивность, I_i — токи в соответствующих цепях [54].

нитные генераторы для запитки плазменных ускорителей [54] (рис. 13).

Но появились новые интересные задачи. В частности, каким образом и с какой эффективностью можно преобразовать химическую энергию КВВ в энергию электромагнитной волны? В 1985 году к нам приехал А.Б. Прищепенко со своими компактными устройствами, разработанными в Центральном научно-исследовательском институте химии и механики (ЦНИИХМ). На полигоне были проведены серии экспериментов, специально разработанных для этих экспериментов диагностикой были зафиксированы достаточно мощные импульсы электромагнитного излучения как в мегагерцевом, так и в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазонах длин волн. Однако взрывные устройства работали крайне нестабильно. Принцип их действия авторами скрывался, поставить эксперименты по физике процесса было невозможно. Поэтому совместное продолжение работ выглядело бессмысленным. Кроме того, не нашло общего языка и наше начальство.

Тогда же родилась идея использовать в таких экспериментах сильнооточную релятивистскую электронику. Мы обратили внимание на то, что ВМГ позволяют преобразовывать химическую энергию КВВ в энергию электромагнитного поля с эффективностью до 40 %, а релятивистские СВЧ-излучатели имеют эффективность преобразования электрической энергии в энергию электронного пучка и электромагнитного излучения до 50 %. Однако при этом возникает ряд нетривиальных проблем, вызванных несоответствием масштаба характерных кинетических энергий. Дело в том, что типичный уровень энерговыделений при детонации КВВ соответствует энергии валентных электронов и составляет величину порядка 1 эВ, в то время как эффективное преобразование энергии электронного пучка в электромагнитное

излучение осуществляется в релятивистском диапазоне $\sim 0,5$ МэВ. Высокая эффективность работы взрывомagnetных генераторов реализуется лишь при их работе на низкоиндуктивных нагрузках, в то время как релятивистские источники работают обычно на мегавольтном уровне напряжений и обладают высоким электрическим импедансом, на уровне нескольких десятков ом. Необходимо было придумать схемы их согласования.

Разработкой специального короткоимпульсного высоковольтного источника на основе ВМГ с перехватом потока мы занялись совместно с В.П. Исаковым и его студентами из Красноярского государственного университета. Были разработаны два типа компактных (масса КВВ 200–600 г) высоковольтных ВМГ с перехватом магнитного потока: цилиндрический генератор с осевым иницированием заряда КВВ [55] и малогабаритный конический генератор со скользящей точкой контакта [56, 57]. А.Н. Диденко⁸ и его группа из Научно-исследовательского института ядерной физики (НИИЯФ) Томского политехнического университета (ТПУ) под руководством А.Г. Жерлицина в качестве источника СВЧ-излучения предложили использовать триод с виртуальным катодом (виркатор) [58]. Это устройство отличалось сравнительной простотой, В.Е. называл его просто "кастрюлей с электродами". Для согласования работы устройств использовались взрывающиеся проволочки, отработанные Е.И. Азаркевичем из Научно-исследовательского института высоких напряжений (НИИВН) при ТПУ.

⁸ А.Н. Диденко (1932–2017) — советский и российский физик, специалист в области физики пучков заряженных частиц, член-корреспондент РАН (1991 г.; член-корреспондент АН СССР с 1984 г.). Награжден орденом Трудового Красного Знамени. Лауреат премии Совета Министров СССР (1991 г.) и премии Правительства РФ (1999 г.).

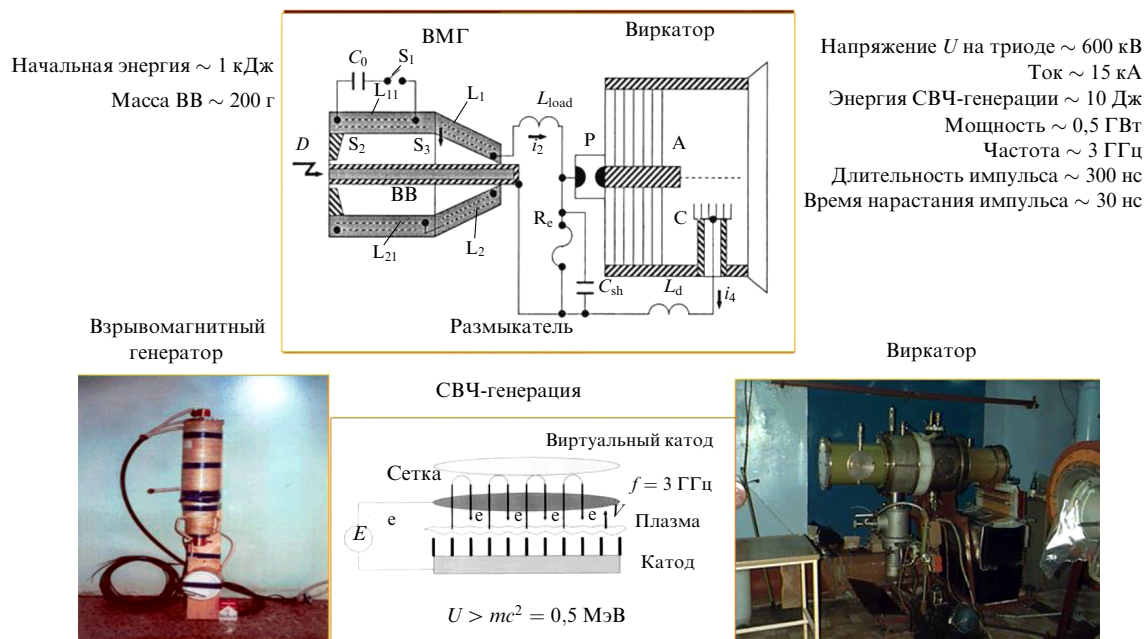


Рис. 14. Схема преобразования энергии взрыва в электромагнитное излучение [60]. (Слайд из презентации В.Е. Фортова, 1995 г.)

Использование высоковольтных ВМГ с перехватом магнитного потока позволило разработать бестрансформаторную схему (рис. 14) [59, 60] генерации электронного пучка и импульсов СВЧ-излучения с помощью энергии КВВ на основе "бустерного" спирального ВМГ с перехватом потока, играющего роль энергетического источника, "быстрого" высоковольтного ВМГ с перехватом потока, взрывающихся проволочек, газонаполненного разрядника Р, обостряющей ёмкости C_{sh} и виркатора. От небольшой ёмкости, $C_0 = 10^{-4}$ Ф напряжением 3 кВ осуществляется запитка внешней спирали бустерного ВМГ L_{11} , который усиливает электрическую энергию в нагрузке — внешнем соленоиде высоковольтного ВМГ L_1 — до 5 кДж. При расширении лайнера высоковольтного генератора магнитный поток "перехватывается" внутренним соленоидом L_2 , вызывая ток в цепи электровзрывного прерывателя R_c . Возникающее при размыкании тока перенапряжение приводит к пробое разрядника Р и высоковольтный импульс прикладывается к аноду А виркатора, вызывая взрывную эмиссию с катода С, формирование электронного пучка и генерацию СВЧ-излучения. В ходе экспериментов на виркаторе получены импульсы напряжения U до 600 кВ и токи до 16 кА, что соответствует мощности релятивистского электронного пучка 10 ГВт. Мощность выведенного в атмосферу излучения составила более 100 МВт.

Предложена модель работы элементов схемы и показано её разумное согласие с результатами эксперимента. Таким образом, проведённые эксперименты продемонстрировали возможность генерации мощного СВЧ-излучения с помощью энергии ВВ. Дальнейшее развитие эти работы получили уже в лаборатории Е.В. Нестерова в ИВТАН.

6. Сотрудничество с немецкими учёными

Начиная с 1980-х годов бурно развивается международное сотрудничество. В.Е. Фортов активно участвует

в работе различных международных конференций, Черноголовку посещают делегации учёных из разных стран для ознакомления с работами в области экстремальных состояний вещества. Хочется отметить особенно плотное взаимодействие с немецкими учёными. В Германии в области физики неидеальной плазмы работала мощная группа теоретиков в университетах городов Берлина, Росток и Грейфсвальда под руководством профессоров В. Эбелинга, В. Крефта, Д. Кремпа, Г. Репке. Эксперименты проводились в Центральном институте электронной физики ГДР под руководством Х. Хесса. Регулярно проводились конференции по физике неидеальной плазмы. Сразу же намечались совместные работы. В 1990 г. была опубликована книга *Теплофизические свойства горячей плотной плазмы* В. Эбелинга, А. Форстера, В.Е. Фортова, В.К. Грязнова и А. Полищука [61]. Вышел в свет также ряд статей В.Е. Фортова и его российских коллег в соавторстве с учёными из Росток Г. Репке, Р. Редмером, Х. Рейнгольц [42–44]. Черноголовка была закрытым городом, и среди первых учёных, посетивших её в конце 1980-х годов, были В. Эбелинг, Р. Редмер и Л. Хичке. Это сотрудничество плодотворно продолжается и в настоящее время.

Другое направление совместных научных работ с немецкими учёными осуществлялось с Обществом по исследованию тяжёлых ионов (нем. Gesellschaft für Schwerionenforschung — GSI) (г. Дармштадт) в лаборатории физики плазмы, возглавляемой профессором Дитером Хоффманном. Во всех совместных экспериментах принимали также активное участие сотрудники Института экспериментальной и теоретической физики (ИТЭФ) (Москва) под руководством Б.Ю. Шаркова (академик РАН с 2016 г.) и А.А. Голубева. Тяжелоионный ускорительный комплекс в GSI позволял получить сфокусированные пучки ионов с энергией 200–300 МэВ на нуклон, интенсивностью до $\sim 5 \times 10^9$ (число частиц за один импульс для ионов урана) и длительностью им-

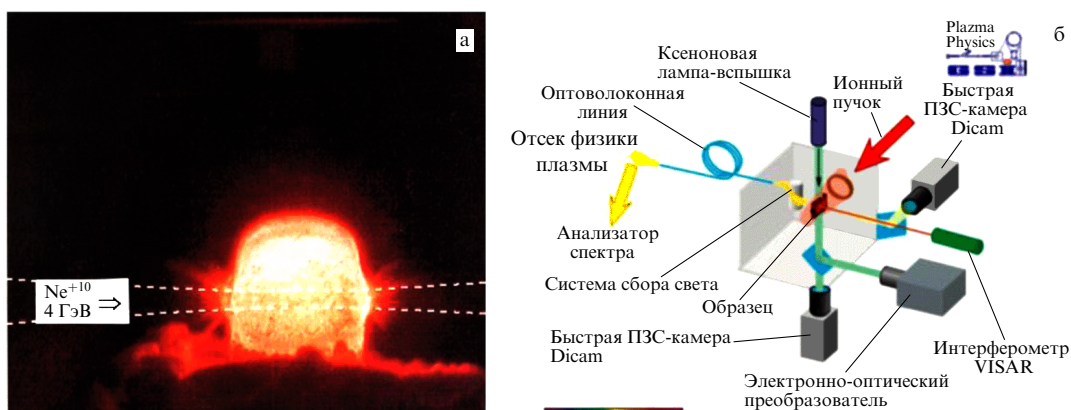


Рис. 15. (В цвете онлайн.) (а) Фотография воздействия пучка на кристалл ксенона. (б) Схема эксперимента NINEX (ПЗС — прибор с зарядовой связью, VISAR — Velocity Interferometer System for Any Reflector) [64].

пульса на мишени до 100 нс за счёт временной компрессии пучка высокочастотным полем [62].

В.Е. Фортов первым заметил, что такой драйвер выглядит очень интересным с точки зрения генерации плотной неидеальной плазмы. Действительно, простые оценки показывают, что высокая интенсивность и значительная длина пробега ионов в веществе мишеней (несколько миллиметров) позволяют достигать уровня концентрации удельной энергии в веществе до 1 кДж г^{-1} , что достаточно для нагрева твёрдого вещества до температуры $> 10^3 \text{ К}$. Были предложены две основные концепции по изучению фундаментальных свойств состояний вещества с высокой плотностью энергии, получаемых с помощью интенсивных ионных пучков [62, 63]: 1) NINEX (Heavy Ion Heating and EXpansion), согласно которой цилиндрическая или плоская мишень квазиизохорически нагревается пучком ионов, а затем образец изотропически расширяется и проходит интересные области фазовой диаграммы, включая двухфазную область; 2) LAPLAS (LABoratory PLANetary Sciences), в соответствии с которой осуществляется квазиизотропическое обжатие цилиндрической мишени до мегабарных давлений веществом, разогретым кольцевым ионным пучком.

Схема эксперимента NINEX и фотография воздействия пучка на кристалл ксенона приведены на рис. 15. В ходе этих экспериментов [62, 64] реализованы давления до 3 ГПа, температуры до 15 кК и проведены измерения теплофизических свойств и гидродинамического отклика мишеней из различных материалов (Pb, W, Ta, Al, UO_2).

Сотрудничество с немецкими учёными было двусторонним. Сотрудники лаборатории физики плазмы приезжали в Черногоровку для проведения совместных экспериментов по исследованию плазмы, генерируемой взрывом. Из наиболее интересных результатов надо отметить исследование поведения спектральных линий ксенона и примесных линий алюминия в ксеноновой плазме [65]. В этих экспериментах удалось проследить уширение, сдвиг и исчезновение линий в зависимости от плотности плазмы, что позволило построить модели механизмов указанных процессов в условиях сильного кулоновского взаимодействия [66].

Интенсивно развиваемые В.Е. методы исследования плотных сильновзаимодействующих сред требовали совершенно новых и необычных подходов. В середине 1990-х годов родилась идея использовать для диагно-



Рис. 16. Взрывная камера на ускорителе в GSI [69].

стики неидеальной плазмы мощные пучки релятивистских ионов. Дело в том, что такие пучки обладают высокой проникающей способностью в веществе и определенное изменение интенсивности пучка позволило бы непосредственно определить важный параметр плазмы — тормозные потери, тем более что благодаря сильному кулоновскому межчастичному взаимодействию можно было ожидать проявления очень интересного эффекта: увеличения пробега ионов в плазме — её "просветления".

Задача оказалась достаточно трудной. Действительно, каким образом можно совместить чрезвычайно "грязную" взрывную технику, генерирующую высокие давления, ударные волны и всепроникающую пыль, с высокочистой глубоковакуумной ускорительной техникой? Все эти вопросы были быстро решены при слаженной работе сплочённых команд российских институтов ИПХФ РАН, ИТЭФ и ОИВТ РАН и немецких коллег из Общества по изучению тяжёлых ионов (GSI) Дармштадта. Впервые установка была апробирована и первые эксперименты с протонными пучками были проведены в Москве в ИТЭФ в ноябре 1997 г. [67, 68]. Затем эксперименты были продолжены в Дармштадте уже с пучками тяжёлых ионов [69]. На рисунке 16 приведена фотография взрывной камеры на 150 г тротила (ТНТ), встроенная в пучковую линию в GSI. Полученный в ходе этих экспериментов обширный экспериментальный материал позволил значительно продвинуться в понимании процессов, происходящих в неидеальной плазме, и

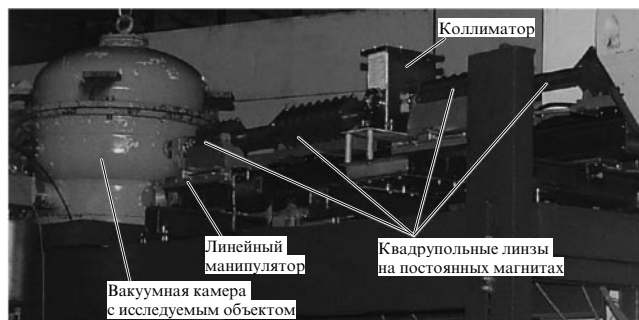


Рис. 17. Протонный микроскоп на ускорительном комплексе ТВН-ИТЭФ [70].

послужил основой для построения теоретических моделей.

Третьим направлением работ, развиваемым в кооперации GSI, ИПХФ РАН и ИТЭФ, явилась протонная радиография [70]. Существующие радиографические установки на ускорителях протонов в США [71] и России [70, 72] наглядно показали преимущества метода протонной радиографии над традиционными рентгенографическими методами диагностики при исследовании плотных объектов в динамических опытах. На ускорительном комплексе ТВН-ИТЭФ (Тераваттном накопителе ИТЭФ) создана протонно-радиографическая установка с применением магнитной оптики (протонный микроскоп ПУМА), которая позволяет измерять распределения плотности вещества внутри статических и динамических объектов с помощью пучка протонов с энергией 800 МэВ [70]. Специально для проведения экспериментов со взрывчатыми материалами в состав установки была включена взрывная камера на 150 г тротилового эквивалента. Внешний вид протонного микроскопа ПУМА приведён на рис. 17. К сожалению, эта установка была разрушена в 2012 г. в результате пожара. Однако на ней удалось провести эксперименты по регистрации химического пика в ТНТ [73] и измерения плотности ударно-сжатой неидеальной плазмы аргона и ксенона [74].

Более мощный протонный микроскоп PRIOR (*Proton microscope for FAIR*) на энергию 3,5–4,5 ГэВ был разработан и апробирован в динамических экспериментах на взрывающихся проводниках в GSI [75]. В.Е. Фортвов всегда говорил о необходимости включения в состав этой установки взрывной камеры для получения важной информации о плотности ударно-сжатого вещества и её пространственном распределении. Большое внимание он уделял разработке компактных взрывных генераторов, специально предназначенных для экспериментов с протонным микроскопом. Надеемся, что такие эксперименты станут возможными при вводе в эксплуатацию проекта FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) в 2025 г.

В начале 2000-х годов в GSI (Дармштадт) началась подготовка к созданию научного центра на базе многоцелевого ускорителя антипротонов и тяжёлых ионов — проекта FAIR. Физическая программа нового международного научного центра охватывает не только физику экстремального состояния материи [76, 77], но и исследования фазового перехода ядерного вещества в кварк-глюонную плазму при высокой плотности ядерного вещества, исследования адронной физики с помощью ан-

нигиляции антипротонов, а также ряд инновационных приложений. В.Е. Фортвов вносил весомый вклад в работу Наблюдательного совета FAIR, являясь представителем от Российской Федерации и защитником интересов российских физиков.

7. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе

Выше описано, как начинались и развивались научные исследования В.Е. в Черногоровке. Хотелось бы подчеркнуть, что работа в Институте проблем химической физики, даже после перехода Владимира Евгеньевича в ИВТАН, не прекращалась и велась на протяжении всей его жизни, став одной из генеральных линий в его судьбе. Он руководил лабораторией, а затем Отделом экстремальных состояний вещества на общественных началах, являлся членом Учёного совета, каждую пятницу проводил семинары, даже когда был председателем Государственного комитета по науке и технологиям, министром науки и технологий РФ, вице-премьером, президентом РАН. Видимо, невозможно описать весь круг задач, которые решались этим, по-настоящему с большой буквы, учёным. Но остались его книги, статьи, труды.

Последний разговор автора этих строк В.Б. Минцева с В.Е. состоялся по телефону в начале ноября 2020 г. В.Е. уже находился в больнице. Его волновал вопрос пленарного доклада на Всероссийской конференции по физике низкотемпературной плазмы в Казани. Уже было понятно, что сам он выступить не может, поэтому В.Е. поручил выступить мне. Ему было уже трудно говорить, и он кратко отметил, какие наиболее важные вопросы необходимо осветить в докладе. Это ионизация давлением водорода и инертных газов в мегабарном диапазоне давлений, плазменный фазовый переход в дейтерии, достижение рекордно высоких давлений ~ 20 ТПа в водороде и гелии, квантовый предел вязкости в сильно взаимодействующих средах.

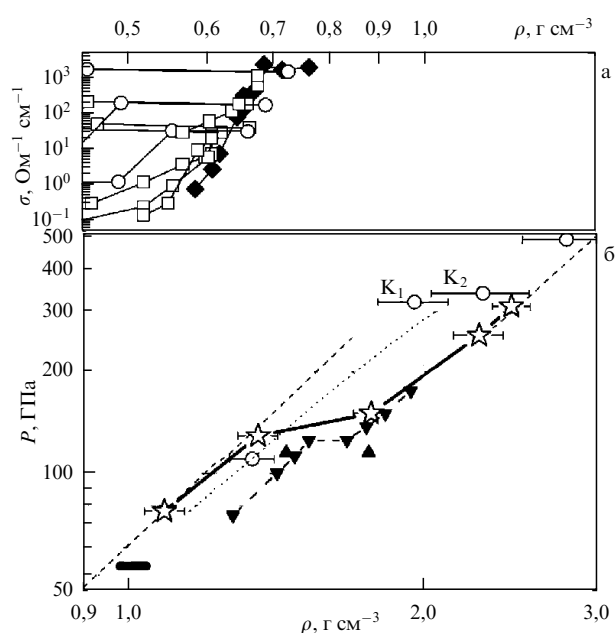


Рис. 18. Электропроводность (а) и давление (б) при квазиизотропическом сжатии дейтерия в зависимости от плотности [79].

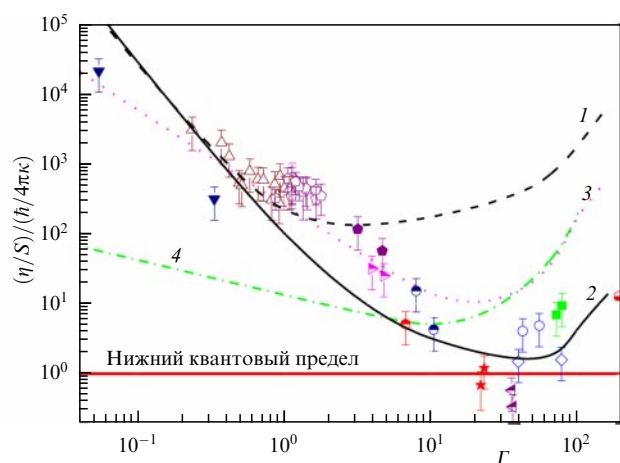


Рис. 19. (В цвете онлайн.) Отношение сдвиговой вязкости к удельной энтропии в зависимости от параметра неидеальности [84].

Действительно, проведенные в конце 1990-х годов эксперименты по исследованию электрофизических свойств ударно-сжатой плазмы свидетельствовали о появлении высокого уровня электропроводности (соответствующего металлическому) в водороде и инертных газах при высоких плотностях в области мегабарных давлений [78]. Этот процесс "металлизации" плазмы нашёл объяснение в рамках процесса ионизации давлением. А определение сжимаемости водорода в совместных экспериментах с Российским федеральным ядерным центром – Всероссийским научно-исследовательским институтом экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ) впервые позволило говорить об обнаружении особого фазового перехода 1-го рода при давлении ~ 150 ГПа — плазменного фазового перехода [79, 80] (рис. 18). Возможное существование именно такого специфического плазменного фазового перехода было предсказано в работе Г.Э. Нормана и А.Н. Старостина [81] 1968 года (подробнее см. статью Г.Э. Нормана и И.М. Саитова [82] в настоящем номере). Особый интерес В.Е. Фортвов и его сотрудники проявляли к обработке результатов последних экспериментов РФЯЦ – ВНИИЭФ по достижению рекордно высоких давлений ~ 20 ТПа в плазме дейтерия и гелия и выводу новых уравнений состояния в этой экзотической области параметров [83].

В последние годы В.Е. Фортвов много занимался физикой астрономических объектов и кварк-глюонной плазмой, где особенно ярко проявляются эффекты сильного взаимодействия. В частности, анализ предельного выражения для отношения сдвиговой вязкости к удельной энтропии, выведенного в рамках современной теории струн, показал (рис. 19), что неидеальная плазма с сильным кулоновским взаимодействием является примером такой среды и в этом смысле её можно называть совершенной жидкостью [84].

8. Заключение

Наследие, которое оставил нам В.Е. Фортвов, — это почти 30 книг: монографий и учебных пособий. В.Е. Фортвов реализовал ещё один уникальный проект — 26-томная *Энциклопедия по низкотемпературной плазме*, — к реализации которого были привлечены ведущие специалисты России в этой области. В.Е. Фортвов активно

участвовал в работе журнала *Успехи физических наук*, им было опубликовано 30 статей, список которых приведён в приложении (см. [1*–30*]).

Памяти В.Е. Форттова будут посвящены специальные выпуски журналов *Теплофизика высоких температур* **59** (6) (2021) и *Contributions to Plasma Physics* **61** (11) (2021). В этих журналах можно найти дополнительную информацию как о вкладе В.Е. в развитие физики экстремальных состояний вещества так и его последние оригинальные работы в по физике неидеальной плазмы, генерируемой динамическими методами [85–89].

В.Е. Фортвов всегда был полон научных идей. К сожалению, далеко не все идеи удалось воплотить. Но он оставил после себя большую школу последователей, среди которых много молодёжи. Надеемся, они продолжат проникновение в эту чрезвычайно интересную область науки — область экстремальных состояний вещества.

Авторы выражают благодарность И.В. Ломоносову за стимулирующие дискуссии, а также за советы и помощь при подготовке настоящей статьи.

9. Приложение. Статьи В.Е. Форттова в журнале *Успехи физических наук*

- 1*. Альтшулер Л В, Ильяев Р И, Фортвов В Е "Использование мощных ударных и детонационных волн для изучения экстремальных состояний вещества" *УФН* **191** 1231 (2021); Al'tshuler L V, Il'kaev R I, Fortov V E "Using powerful shock and detonation waves to study extreme states of matter" *Phys. Usp.* **64** (11) (2021), DOI:10.3367/UFNe.2021.09.039092
- 2*. Ерёмин А В, Фортвов В Е "Детонационная волна конденсации" *УФН* **191** 1131 (2021); Eremin A V, Fortov V E "Detonation wave of condensation" *Phys. Usp.* **64** (11) (2021), DOI:10.3367/UFNe.2021.02.038936
- 3*. Шварцбург А Б, Печёркин В Я, Василяк Л М, Ветчинин С П, Фортвов В Е "Диэлектрические резонансные магнитные диполи: парадоксы, перспективы, первые эксперименты" *УФН* **188** 780–789 (2018); Shvartsburg A B, Pecherkin V Ya, Vasilyak L M, Vetchinin S P, Fortov V E "Dielectric resonant magnetic dipoles: paradoxes, prospects, the first experiments" *Phys. Usp.* **61** 698–706 (2018)
- 4*. Канель Г И, Зарецкий Е Б, Разоренов С В, Ашитков С И, Фортвов В Е "Необычные пластичность и прочность металлов при ультракоротких длительностях нагрузки" *УФН* **187** 525–545 (2017); Kanel G I, Zaretsky E V, Razorenov S V, Ashitkov S I, Fortov V E "Unusual plasticity and strength of metals at ultra-short load durations" *Phys. Usp.* **60** 490–508 (2017)
- 5*. Пикуз С А (мл.), Фаенов А Я, Скобелев И Ю, Фортвов В Е "Создание экзотических состояний вещества с помощью рентгеновского излучения, генерируемого при фокусировке петаваттного лазерного импульса на твердотельные мишени" *УФН* **184** 759–765 (2014); Pikuz S A (Jr.), Faenov A Ya, Skobelev I Yu, Fortov V E "Production of exotic states of matter with the use of X-rays generated by focusing a petawatt laser pulse onto a solid target" *Phys. Usp.* **57** 702–707 (2014)
- 6*. Фортвов В Е, Ломоносов И В "Я.Б. Зельдович и проблемы уравнений состояния вещества в экстремальных условиях" *УФН* **184** 231–245 (2014); Fortov V E, Lomonosov I V "Ya.B. Zeldovich and equation of state problems for matter under extreme conditions" *Phys. Usp.* **57** 219–233 (2014)
- 7*. Иванов М Ф, Киверин Ф Д, Клумов Б А, Фортвов В Е "От горения и детонации к окислам азота" *УФН* **184** 247–264 (2014); Ivanov M F, Kiverin A D, Klumov B A, Fortov V E "From combustion and detonation to nitrogen oxides" *Phys. Usp.* **57** 234–249 (2014)
- 8*. Фортвов В Е, Шарков Б Ю, Штокер Х "Научная программа в новом международном центре фундаментальной физики — Европейском центре антипротонных и ионных исследований FAIR" *УФН* **182** 621–644 (2012); Fortov V E, Sharkov B Yu, Stöcker H "European Facility for Antiproton and Ion Research

- (FAIR): the new international center for fundamental physics and its research program" *Phys. Usp.* **55** 582–602 (2012)
- 9*. Скобелев И Ю, Фаенов А Я, Пикуз Т А, Фортвов В Е "Спектры полых ионов в сверхплотной лазерной плазме" *УФН* **182** 49–75 (2012); Skobelev I Yu, Faenov A Ya, Pikuz T A, Fortov V E "Spectra of hollow ions in an ultradense laser plasma" *Phys. Usp.* **55** 47–71 (2012)
 - 10*. Халатников И М, Фортвов В Е, Макаров А А, Фридман А М, Мартыненко Ю В "К 100-летию со дня рождения академика Л.А. Арцимовича. (Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук, 18 февраля 2009 г. Совместное заседание Учёного совета Российского научного центра "Курчатовский институт", Президиума Российской академии наук и Госкорпорации "Росатом", 18 марта 2009 г.)" *УФН* **179** 1335–1361 (2009); Khalatnikov I M, Fortov V E, Makarov A A, Fridman A M, Martynenko Yu V "Commemoration of the centenary of the birth of Academician L.A. Artsimovich (Scientific session of the Physical Sciences Division of the Russian Academy of Sciences, 18 February 2009; Joint session of the Research Council of the Russian Research Center "Kurchatov Institute", the Presidium of the Russian Academy of Sciences, and the Rosatom State Corporation, 18 March 2009)" *Phys. Usp.* **52** 1247–1272 (2009)
 - 11*. Фортвов В Е, Макаров А А "Направления инновационного развития энергетики мира и России" *УФН* **179** 1337–1353 (2009); Fortov V E, Makarov A A "Avenues for the innovative development of energetics in the world and in Russia" *Phys. Usp.* **52** 1249–1265 (2009)
 - 12*. Гинзбург В Л, Дрёмин И М, Ширков Д В, Смирнов Б М, Александров Е В, Вершовский А К, Максимов Е Г, Фортвов В Е "Специальное заседание редакционной коллегии журнала *Успехи физических наук*, приуроченного к 90-летию журнала *УФН* (19 ноября 2008 г.)" *УФН* **179** 561 (2009); Ginzburg V L, Dremmin I M, Shirkov D V, Smirnov B M, Aleksandrov E V, Vershovskii A K, Maksimov E G, Fortov V E "Special session of the Uspekhi Fizicheskikh Nauk Editorial Board celebrating the 90th anniversary of the journal (19 November 2008)" *Phys. Usp.* **52** 529–529 (2009)
 - 13*. Фортвов В Е "Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе" *УФН* **179** 653–687 (2009); Fortov V E "Extreme states of matter on Earth and in space" *Phys. Usp.* **52** 615–647 (2009)
 - 14*. Фортвов В Е, Хоффманн Д, Шарков Б Ю "Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества" *УФН* **178** 113–138 (2008); Fortov V E, Hoffmann D N H, Sharkov B Yu "Intense ion beams for generating extreme states of matter" *Phys. Usp.* **51** 109–131 (2008)
 - 15*. Канель Г И, Фортвов В Е, Разоренов С В "Ударные волны в физике конденсированного состояния" *УФН* **177** 809–830 (2007); Kanel G I, Fortov V E, Razorenov S V "Shock waves in condensed-state physics" *Phys. Usp.* **50** 771–791 (2007)
 - 16*. Гинзбург В Л, Фортвов В Е, Смирнов Б М, Руденко О В, Кулипанов Г Н, Денисов С П, Окунь Л Б, Рубаков В А, Менский М Б "Специальное заседание редакционной коллегии журнала *Успехи физических наук*, приуроченное к 90-летию со дня рождения Виталия Лазаревича Гинзбурга (3 октября 2006 г.)" *УФН* **177** 345–346 (2007); Ginzburg V L, Fortov V E, Smirnov B M, Rudenko O V, Kulipanov G N, Denisov S P, Okun L B, Rubakov V A, Menskii M B "Special scientific session of the Editorial Board of the journal "Uspekhi Fizicheskikh Nauk" honoring Vitalii Lazarevich Ginzburg on his 90th birthday (3 October 2006)" *Phys. Usp.* **50** 331–332 (2007)
 - 17*. Фортвов В Е "Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества" *УФН* **177** 347–368 (2007); Fortov V E "Intense shock waves and extreme states of matter" *Phys. Usp.* **50** 333–353 (2007)
 - 18*. Максимов Е Г, Магницкая М В, Фортвов В Е "Непростое поведение простых металлов при высоких давлениях" *УФН* **175** 793–813 (2005); Maksimov E G, Magnitskaya M V, Fortov V E "Non-simple behavior of simple metals at high pressure" *Phys. Usp.* **48** 761–780 (2005)
 - 19*. Клумов Б А, Ким В В, Ломоносов И В, Султанов В Г, Шутков А В, В.Е. Фортвов "Возможные наблюдаемые эффекты в эксперименте Deep Impact" *УФН* **175** 767–777 (2005); Klumov B A, Kim V V, Lomonosov I V, Sultanov V G, Shu-
 - 20*. Фортвов В Е, Храпак А Г, Храпак С А, Молотков В И, Петров О Ф "Пылевая плазма" *УФН* **174** 495–544 (2004); Fortov V E, Khrapak A G, Khrapak S A, Molotkov V I, Petrov O F "Dusty plasmas" *Phys. Usp.* **47** 447–492 (2004)
 - 21*. 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** 323–344 (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** 261–280 (1999)
 - 22*. Нефедов А П, Петров О Ф, Фортвов В Е "Кристаллические структуры в плазме с сильным взаимодействием макрочастиц" *УФН* **167** 1215–1226 (1997); Nefedov A P, Petrov O F, Fortov V E "Quasicrystalline structures in strongly coupled dusty plasma" *Phys. Usp.* **40** 1163–1173 (1997)
 - 23*. Фортвов В Е, Гнедин Ю Н, Иванов М Ф, Ивлев А В, Клумов В А "Столкновение кометы Шумейкер-Леви 9 с Юпитером: что мы увидели?" *УФН* **166** 391–422 (1996); Fortov V E, Gnedin Yu N, Ivanov M F, Ivlev A V, Klumov B A "Collision of comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter: what did we see?" *Phys. Usp.* **39** 363–392 (1996)
 - 24*. Клумов Б А, Кондауров В И, Конюхов А В, Медведев Ю Д, Сокольский А Г, Утюжников С В, Фортвов В Е "Столкновение кометы Шумейкер-Леви 9 с Юпитером: что мы увидим?" *УФН* **164** 617–629 (1994); Klumov B A, Kondaurov V I, Konyukhov A V, Medvedev Yu D, Sokolskii A G, Utyuzhnikov S V, Fortov V E "Collision of comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter: what shall we see?" *Phys. Usp.* **37** 577–588 (1994)
 - 25*. Аврорин Е Н, Водолага Б К, Симоненко В А, Фортвов В Е "Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества" *УФН* **163** (5) 1–34 (1993); Avrorin E N, Vodolaga B K, Simonenko V A, Fortov V E "Intense shock waves and extreme states of matter" *Phys. Usp.* **36** (5) 337–364 (1993)
 - 26*. Фортвов В Е "Уравнение состояния неидеальной плазмы в экстремальной области параметров" *УФН* **147** 192–194 (1985); Fortov V E "Equation of state of a nonideal plasma for extreme values of the parameters" *Sov. Phys. Usp.* **28** 849–850 (1985)
 - 27*. Анисимов С И, Прохоров А М, Фортвов В Е "Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях" *УФН* **142** 395–434 (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** 181–205 (1984)
 - 28*. Бушман А В, Фортвов В Е "Модели уравнения состояния вещества" *УФН* **140** 177–232 (1983); Bushman A V, Fortov V E "Model equations of state" *Sov. Phys. Usp.* **26** 465–496 (1983)
 - 29*. Алексеев В А, Фортвов В Е, Якубов И Т "Физические свойства плазмы высокого давления" *УФН* **139** 193–222 (1983); Alekseev V A, Fortov V E, Yakubov I T "Physical properties of high-pressure plasmas" *Sov. Phys. Usp.* **26** 99–115 (1983)
 - 30*. Фортвов В Е "Динамические методы в физике плазмы" *УФН* **138** 361–412 (1982); Fortov V E "Dynamic methods in plasma physics" *Sov. Phys. Usp.* **25** 781–809 (1982)

Список литературы

1. Фортвов В Е (Ред.) *Траектория. Владимир Фортвов* (М.: Международный объединенный биографический центр, 2015)
2. Фортвов В Е "Построение уравнения состояния конденсированных сред с ударными волнами", в сб. *Горение и взрыв. Материалы Третьего Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву, 5–10 июля 1971 г.* (Отв. ред. Л Н Стефик) (М.: Наука, 1972)
3. Фортвов В Е "Уравнение состояния конденсированных сред" *Журн. прикладной механики и технической физики* (6) 156 (1972)
4. Фортвов В Е "Калорическое уравнение состояния окиси кремния и силиконовой жидкости" *Физика горения и взрыва* (3) 428 (1972)
5. Фортвов В Е, Дрёмин А Н "Определение температуры ударно-сжатой меди по измерению параметров волн разгрузки" *Физика горения и взрыва* (5) 743 (1973)
6. Фортвов В Е, Леонтьев А А "О плавлении и испарении металлов в волне разгрузки" *Журн. прикладной механики и технической физики* (3) 162 (1974)

7. Фортов В Е, Дремин А Н, Леонтьев А А, Першин С В "Изоэнтальпическое расширение ударно-сжатого свинца" *Письма в ЖЭТФ* **20** (1) 30 (1974); Fortov V E, Dremine A N, Leont'ev A A, Pershin S V "Isentropic expansion of shock-compressed lead" *JETP Lett.* **20** 13 (1974)
8. Фортов В Е, Дремин А Н, Леонтьев А А "Оценки параметров критической точки" *Теплофизика высоких температур* **13** 1072 (1975)
9. Фортов В Е "Гидродинамические эффекты в неидеальной плазме" *Теплофизика высоких температур* **10** 168 (1972)
10. Фортов В Е, Ломакин Б Н, Красников Ю Г "Термодинамические свойства цезиевой плазмы" *Теплофизика высоких температур* **9** 869 (1971)
11. Ломакин Б Н, Фортов В Е "Уравнение состояния неидеальной цезиевой плазмы" *ЖЭТФ* **63** 93 (1972); Lomakin B N, Fortov V E "Equation of state of a nonideal cesium plasma" *Sov. Phys. JETP* **36** 48 (1973)
12. Грязнов В К, Иосилевский И Л, Кузнецова Н И, Кучеренко В И, Лаппо Г Б, Павлов Г А, Сон Э Е *Теплофизические свойства рабочих сред газозофазного ядерного реактора* (Под ред. В М Иевлева) (М.: Атомиздат, 1980)
13. Грязнов В К, Иосилевский И Л, Фортов В Е "Расчет ударных адиабат аргона и ксенона" *Журн. прикладной механики и технической физики* (3) 70 (1973)
14. Фортов В Е, Дремин А Н, Мусанков С И, Якушев В В "Об "аномальных" эффектах при выходе детонационной волны на свободную поверхность" *Теплофизика высоких температур* **12** 957 (1974)
15. Кириллин В А и др. "Импульсный магнитогиродинамический генератор со сверхпроводящей магнитной системой" *ДАН СССР* **185** (2) 316 (1969); Kirillin V A et al. "Explosion MHD generator with superconducting magnet system" *Sov. Phys. Dokl.* **14** 266 (1969)
16. Зельдович Я Б, Ландау Л Д "Корреляция между жидкими и газообразными состояниями металлов" *ЖЭТФ* **14** 32 (1945)
17. Зельдович Я Б, Райзер Ю П *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Наука, 1966); Пер. на англ. яз.: Zel'dovich Ya B, Raizer Yu P *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena* (New York: Academic Press, 1966, 1967)
18. Франк-Каменецкий Д А *Лекции по физике плазмы* (М.: Атомиздат, 1968)
19. Фортов В Е *Мощные ударные волны на земле и в космосе* (М.: Физматлит, 2019)
20. Минцев В Б, Фортов В Е "Взрывные ударные трубы" *Теплофизика высоких температур* **20** 745 (1982)
21. 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)
22. Фортов В Е, Иванов Ю В, Дремин А Н, Грязнов В К, Беспалов В Е "Взрывной генератор неидеальной плазмы" *ДАН СССР* **221** 1307 (1975); Fortov V E, Ivanov Iu V, Dremine A N, Gryaznov V K, Bepalov V E "Blast generator of a nonideal plasma" *Sov. Phys. Dokl.* **20** 295 (1975)
23. Беспалов В Е, Грязнов В К, Дремин А Н, Фортов В Е "Динамическое сжатие неидеальной плазмы аргона" *ЖЭТФ* **69** 2059 (1975); Bepalov V E, Gryaznov V K, Dremine A N, Fortov V E "Dynamic compression of non-ideal argon plasma" *Sov. Phys. JETP* **42** 1046 (1975)
24. Фортов В Е, Леонтьев А А, Дремин А Н, Грязнов В К "Генерация неидеальной плазмы мощными ударными волнами" *ЖЭТФ* **71** 225 (1976); Fortov V E, Leont'ev A A, Dremine A N, Gryaznov V K "Shock-wave production of a non-ideal plasma" *Sov. Phys. JETP* **44** 116 (1976)
25. Иванова А В, Иванова А Н, Прихоженко А И, Пятацкий-Шапиро И И, Тарнопольский Б Л "Расчет электронных оболочек некоторых атомов по методу Хартри-Фока" *Литовский физический сборник* **3** (1–2) 129 (1963)
26. Froese C "Numerical solution of Hartree-Fock equations" *Can. J. Phys.* **41** 1895 (1963)
27. Грязнов В К, Жерноклетов М В, Зубарев В Н, Иосилевский И Л, Фортов В Е "Термодинамические свойства неидеальной плазмы аргона и ксенона" *ЖЭТФ* **78** 573 (1980); Gryaznov V K, Zhernokletov M V, Zubarev V N, Iosilevskii I L, Fortov V E "Thermodynamic properties of a nonideal argon or xenon plasma" *Sov. Phys. JETP* **51** 288 (1980)
28. Иванов Ю В, Минцев В Б, Фортов В Е, Дремин А Н "Электропроводность неидеальной плазмы" *ЖЭТФ* **71** 216 (1976); Ivanov Yu V, Mintsev V B, Fortov V E, Dremine A N **44** 112 (1976)
29. Грязнов В К, Иванов Ю В, Старостин А Н, Фортов В Е "Теплофизические свойства ударно-сжатого аргона и ксенона" *Теплофизика высоких температур* (3) 643 (1976)
30. Бушман А В, Фортов В Е "Модели уравнения состояния вещества" *УФН* **140** 177 (1983); Bushman A V, Fortov V E "Model equations of state" *Sov. Phys. Usp.* **26** 465 (1983)
31. Фортов 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)
32. Алексеев В А, Фортов В Е, Якубов И Т "Физические свойства плазмы высокого давления" *УФН* **139** 193 (1983); Alekseev V A, Fortov V E, Yakubov I T "Physical properties of high-pressure plasmas" *Sov. Phys. Usp.* **26** 99 (1983)
33. Анисимов С И, Прохоров А М, Фортов 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)
34. Фортов В Е, Якубов И Т *Физика неидеальной плазмы* (Черноголовка: РИСО АН СССР, 1984); Пер. на англ. яз.: Fortov V E, Yakubov I T *Physics of Nonideal Plasma* (New York: Hemisphere Publ. Corp., 1990)
35. Бушман А В, Ломакин Б Н, Сеченов В А, Фортов В Е, Шекоотов О Е, Шарипджанов И И "Термодинамика неидеальной плазмы цезия" *ЖЭТФ* **69** 1624 (1975); Bushman A V, Lomakin B N, Sechenov V A, Fortov V E, Shchekotov O E, Sharipdzhanov I I "Thermodynamics of nonideal cesium plasma" *Sov. Phys. JETP* **42** 828 (1975)
36. Иосилевский И Л "Об уравнении состояния неидеальной плазмы" *Теплофизика высоких температур* **18** 447 (1980)
37. Беспалов В Е, Грязнов В К, Фортов В Е "Излучение ударно-сжатой плазмы аргона высокого давления" *ЖЭТФ* **76** 140 (1979); Bepalov V E, Gryaznov V K, Fortov V E "Radiation emitted by a shock-compressed high-pressure argon plasma" *Sov. Phys. JETP* **49** 71 (1979)
38. Минцев В Б, Фортов В Е, Грязнов В К "Электропроводность высокотемпературной неидеальной плазмы" *ЖЭТФ* **79** 116 (1980); Mintsev V B, Fortov V E, Gryaznov V K "Electric conductivity of a high-temperature non-ideal plasma" *Sov. Phys. JETP* **52** 59 (1980)
39. Запорожец Ю Б, Минцев В Б, Фортов В Е "Отражение лазерного излучения от ударно-сжатой неидеальной плазмы" *Письма в ЖЭТФ* **10** 1321 (1984)
40. Mintsev V B, Zaporozhets Y B "Reflectivity of dense plasma" *Contrib. Plasma Phys.* **29** 493 (1989)
41. Махлайчук В Н, Ортнер Й, Рылюк В М, Ткаченко И М, Минцев В Б, Фортов В Е "Структурные характеристики и отражение лазерного излучения от ударно-сжатой плазмы ксенона", Препринт (Черноголовка: Институт химической физики, 1991)
42. Reinholz H, Zaporozhets Y, Mintsev V, Fortov V, Morozov I, Röpke G "Frequency-dependent reflectivity of shock-compressed xenon plasmas" *Phys. Rev. E* **68** 036403 (2003)
43. Zaporozhets Yu, Mintsev V, Gryaznov V, Fortov V, Reinholz H, Raita T, Röpke G "Reflectivity of nonideal plasmas" *J. Phys. A* **39** 4329 (2006)
44. Zaporozhets Y, Mintsev V, Fortov V, Reinholz H, Röpke G, Rosmej S, Omarbakiyeva Y A "Polarized angular-dependent reflectivity and density-dependent profiles of shock-compressed xenon plasmas" *Phys. Rev. E* **99** 043202 (2019)
45. Шилкин Н С, Дудин С В, Грязнов В К, Минцев В Б, Фортов В Е "Измерение электронной концентрации и проводимости частично ионизированной плазмы инертных газов" *ЖЭТФ* **124** 1030 (2003); Shilkin N S, Dudin S V, Gryaznov V K, Mintsev V B, Fortov V E "Measurements of the electron concentration and conductivity of a partially ionized inert gas plasma" *J. Exp. Theor. Phys.* **97** 922 (2003)
46. Анисимов С И, Беспалов В Е, Вовченко В И, Дремин А Н, Дубовицкий Ф И, Жарков А П, Иванов М Ф, Красюк И К, Пашинин П П, Прохоров А М, Терновой В Я, Фортов В Е, Щур Л Н "Генерация нейтронов при взрывном инициировании ДД-реакции в конических мишенях" *Письма в ЖЭТФ* **31** 67 (1980); Anisimov S I, Bepalov V E, Vovchenko V I, Dremine A N, Dubovitskii F I, Zharkov A P, Ivanov M F, Krasnyuk I K, Pashinin P P, Prokhorov A M, Ternovoi V Ya, Fortov V E, Shchur L N

- "Generation of neutrons as a result of explosive initiation of the DD reactions in conical targets" *JETP Lett.* **31** 61 (1980)
47. Квитов С В, Бушман А В, Кулиш М И, Ломоносов И В, Полищук А Я, Семенов А Ю, Терновой В Я, Филимонов А С, Фортвов В Е "Измерение радиационных характеристик плотной плазмы висмута при ее адиабатическом расширении" *Письма в ЖЭТФ* **53** 338 (1991); Kvitov S V, Bushman A V, Kulish M I, Lomonosov I V, Polishchuk A Ya, Semenov A Yu, Ternovoi V Ya, Filimonov A S, Fortov V E "Measurements of the optical emission of a dense bismuth plasma during its adiabatic expansion" *JETP Lett.* **53** 353 (1991)
 48. Глушак Б Л, Жарков А П, Жерноклетов М В, Терновой В Я, Филимонов А С, Фортвов В Е "Экспериментальное изучение термодинамики плотной плазмы металлов при высоких концентрациях энергии" *ЖЭТФ* **96** 1301 (1989); Glushak B L, Zharkov A P, Zhernokletov M V, Ternovoi V Ya, Filimonov A S, Fortov V E "Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations" *Sov. Phys. JETP* **69** 739 (1989)
 49. Nikolaev D N, Ternovoi V Ya, Kim V V, Shutov A V "Plane shock compression generators, utilizing convergence of conical shock waves" *J. Phys. Conf. Ser.* **500** 142026 (2014)
 50. Кондратенко М М, Лебедев Е Ф, Осташев В Е, Сафонов В И, Фортвов В Е, Ульянов А В "Экспериментальное исследование магнетоплазменного ускорения диэлектрических ударников в рельсотроне" *Теплофизика высоких температур* **26** (1) 159 (1988); Kondratenko M M, Lebedev E F, Ostashev V E, Safonov V I, Fortov V E, Ulyanov A V "Experimental investigation of magnetoplasma acceleration of dielectric projectiles in a rail gun" *High Temperature* **26** (1) 139 (1988)
 51. Фортвов В Е (Ред.) *Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока* (М.: Наука, 2002)
 52. Демидов В А, Пляшкевич Л Н, Селимир В Д (Ред.) *Магнитокумулятивные генераторы — импульсные источники энергии* (Саров: РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2012)
 53. Андреев В Ф, Кареев Ю А, Умрихин Н М, Феоктистов Л П, Фортвов В Е "Условия генерации импульсного нейтронного излучения при взрывном обогащении термоядерной плазмы", Препринт (М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1992)
 54. Дудин С В, Житлухин А М, Козлов А В, Леонтьев А А, Минцев В Б, Ушнурцев А Е, Фортвов В Е, Черковец В Е, Шурупов А В, Шурупова Н П "Взрывомагнитный генератор как источник электропитания импульсного плазменного ускорителя" *Теплофизика высоких температур* **48** (1) 3 (2010); Dudin S V, Zhitlukhin A M, Kozlov A V, Leont'ev A A, Mintsev V B, Ushnurtev A E, Fortov V E, Cherkovets V E, Shurupov A V, Shurupova N P "Magnetocumulative generator as the power supply for pulsed plasma accelerator" *High Temp.* **48** 1 (2010)
 55. Жерлицын А Г, Исаков В П, Лопатин М В, Мельников Г В, Минцев В Б, Тимченко С А, Фортвов В Е, Цветков В И "Генерация импульсов высокого напряжения взрывомагнитным генератором с осевым иницированием" *Теплофизика высоких температур* **28** 370 (1990)
 56. Минцев В Б, Ушнурцев А Е, Фортвов В Е "Модели работы ВМГ с перехватом магнитного потока" *Теплофизика высоких температур* **31** 469 (1993)
 57. Карпушин Ю В, Леонтьев А А, Минцев В Б, Ушнурцев А Е, Фортвов В Е "Экспериментальные исследования компактных ВМГ с перехватом магнитного потока" *Теплофизика высоких температур* **31** 662 (1993)
 58. Диденко А Н, Арзин А П, Жерлицын А Г и др., в сб. *Релятивистская высокочастотная электроника* Вып. 4 (Горький, 1984) с. 104
 59. Азаркевич Е И, Диденко А Н, Долгополов П В, Жерлицын А Г, Исаков В П, Леонтьев А А, Лопатин М В, Минцев В Б, Ушнурцев А Е, Фоменко Г П, Фортвов В Е, Цветков В И, Шнейдер В Б, Ясельский Б К "Генерация импульсов СВЧ излучения с помощью энергии химических взрывчатых веществ" *ДАН СССР* **319** 352 (1991)
 60. Азаркевич Е И, Диденко А Н, Жерлицын А Г, Карпушин Ю В, Леонтьев А А, Мельников Г В, Минцев В Б, Ушнурцев А Е, Фортвов В Е, Цветков В И, Шнейдер В Б, Ясельский Б К "Генерация электронного пучка и импульсов СВЧ-излучения с помощью энергии химических взрывчатых веществ" *Теплофизика высоких температур* **32** (1) 127 (1994)
 61. Ebeling W, Forster A, Fortov V E, Gryaznov V K, Polishchuk A Y *Thermophysical Properties of Hot Dense Plasmas* (Teubner-Texte zur Physik, Bd. 25) (Stuttgart: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1991)
 62. Фортвов 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)
 63. Tahir N A, Deutsch C, Fortov V E, Gryaznov V, Hoffmann D H H, Kulish M, Lomonosov I V, Mintsev V, Ni P, Nikolaev D, Piriz A R, Shilkin N, Spiller P, Shutov A, Temporal M, Ternovoi V, Udrea S, Varentsov D "Proposal for the study of thermophysical properties of high-energy-density matter using current and future heavy-ion accelerator facilities at GSI Darmstadt" *Phys. Rev. Lett.* **95** 035001 (2005)
 64. Varentsov D, Ternovoi V Ya, Kulish M, Fernengel D, Fertman A, Hug A, Menzel J, Ni P, Nikolaev D N, Shilkin N, Turtikov V, Udrea S, Fortov V E, Golubev A A, Gryaznov V K, Hoffmann D H H, Kim V, Lomonosov I V, Mintsev V, Sharkov B Yu, Shutov A, Spiller P, Tahir N A, Wahl H "High-energy-density physics experiments with intense heavy ion beams" *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **577** 262 (2007)
 65. Кулиш М И, Грязнов В К, Квитов С В, Минцев В Б, Николаев Д Н, Терновой В Я, Филимонов А С, Фортвов В Е, Голубев А А, Шарков Б Ю, Хоффманн Д, Штокль К, Ветцлер Х "Коэффициенты поглощения плотной плазмы аргона и ксенона" *Теплофизика высоких температур* **33** 967 (1995)
 66. Денисов О Б, Орлов Н Ю, Фортвов В Е, Кулиш М И, Грязнов В К, Минцев В Б "Исследование механизмов штарковского уширения и сдвига спектральных линий в неидеальной плазме" *Физика плазмы* **30** 944 (2004); Denisov O B, Orlov N Yu, Fortov V E, Kulish M I, Gryaznov V K, Mintsev V B "Investigation of the mechanisms for Stark broadening and shift of the spectral lines in a nonideal plasma" *Plasma Phys. Rep.* **30** 878 (2004)
 67. Mintsev V, Gryaznov V, Kulish M, Fortov V, Sharkov B, Golubev A, Fertman A, Meshcheryakov N, Suss W, Hoffmann D H H, Stetter M, Bock R, Roth M, Stoel C, Gardes D "On measurements of stopping power in explosively driven plasma targets" *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **415** 715 (1998)
 68. Mintsev V, Gryaznov V, Kulish M, Filimonov A, Fortov V, Sharkov B, Golubev A, Fertman A, Turtikov V, Vishnevskiy A, Kozodaev A, Hoffmann D H H, Funk U, Stoewe S, Greisel M, Jacoby J, Gaedes D, Chabot M "Stopping power of proton beam in a weakly nonideal xenon plasma" *Contrib. Plasma Phys.* **37** 101 (1999)
 69. Weyrich K, Wahl H, Hoffmann D H H, Golubev A A, Kantsyrev A V, Sharkov B Yu, Kulish M, Dudin S, Mintsev V B, Fortov V E, Gryaznov V K "Shockwave-driven, non-ideal plasmas for interaction experiments with heavy-ion beams" *J. Phys. A* **39** 4749 (2006)
 70. Канцырев А В, Голубев А А, Богданов А В, Демидов В С, Демидова Е В, Ладыгина Е М, Марков Н В, Скачков В С, Смирнов Г Н, Рудской И В, Кузнецов А П, Худомьясов А В, Шарков Б Ю, Дудин С В, Колесников С А, Минцев В Б, Николаев Д Н, Терновой В Я, Уткин А В, Юрьев Д С и др. "Протонный микроскоп на ускорительном комплексе ТВН-ИТЭФ" *Приборы и техника эксперимента* (1) 5 (2014); Kantsyrev A V, Golubev A A, Bogdanov A V, Demidov V S, Demidova E V, Ladygina E M, Markov N V, Skachkov V S, Smirnov G N, Rudskoy I V, Kuznetsov A P, Khudomyasov A V, Sharkov B Yu, Dudin S V, Kolesnikov S A, Mintsev V B, Nikolaev D N, Ternovoi V Ya, Utkin A V, Yuriev D S et al. "TWAC-ITER proton microscopy facility" *Instrum. Exp. Tech.* **57** 1 (2014)
 71. King N P S et al. "An 800-MeV proton radiography facility for dynamic experiments" *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **424** 84 (1999)
 72. Антипов Ю М, Афонин А Г, Васильевский А В, Гусев И А, Демянчук В И, Зятьков О В, Игнашин Н А, Каршев Ю Г, Ларионов А В, Максимов А В, Матюшин А А, Минченко А В, Михеев М С, Миргородский В А, Пелешко В Н, Рудько В Д, Терехов В И, Тюрин Н Е, Федотов Ю С, Трутнев Ю А и др. "Радиографическая установка ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ ГНЦ ИФВЭ" *Приборы и техника эксперимента* (3) 5 (2010); Antipov Yu M, Afonin A G, Vasilievskii A V, Gusev I A, Demyanchuk V I, Zyat'kov O V, Ignashin N A, Karshv Yu G, Larionov A V, Maksimov A V, Matyushin A A, Minchenko A V, Mikheev M S, Mirgorodskii V A, Peleshko V N, Rud'ko V D, Terekhov V I, Tyurin N E, Fedotov Yu S, Trutnev Yu A et al.

- "A radiographic facility for the 70-GeV proton accelerator of the Institute for High Energy Physics" *Instrum. Exp. Tech.* **53** 319 (2010)
73. Kolesnikov S A, Dudin S V, Lavrov V V, Nikolaev D N, Mintsev V B, Shilkin N S, Ternovoi V Y, Utkin A V, Yakushev V V, Yuriev D S, Fortov V E, Golubev A A, Kantsyrev A V, Sheshtov L M, Smirnov G N, Turtikov V I, Sharkov B Yu, Burtsev V V, Zavialov N V, Kartanov S A, Mikhailov A L, Rudnev A V, Tatsenko M V, Zhernokletov M V "Shockwave and detonation studies at ITP-TWAC proton radiography facility", in *Shock Compression of Condensed Matter — 2011, Proc. of the Conf. of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter* (AIP Conf. Proc., Vol. 1426) (New York: AIP, 2012) p. 390
 74. Mintsev V B, Shilkin N S, Ternovoi V Y, Nikolaev D N, Yuriev D S, Golubev A A, Kantsyrev A V, Skobliakov A V, Bogdanov A V, Varentsov D V, Hoffmann D H H "High-explosive generators of dense low-temperature plasma for proton radiography" *Contrib. Plasma Phys.* **58** (2–3) 93 (2018)
 75. Varentsov D, Ionita B, Rodionova M, Sheshtov L, Vasylyev O, Weyrich K, Antonov O, Efimov S, Krasik Y E, Bakhmutova A, Bogdanov A, Fertman A, Golubev A A, Kantsyrev A V, Markov N, Panyushkin V, Semennikov A, Skachkov V S, Turtikov V, Barnes C W et al. "Commissioning of the PRIOR proton microscope" *Rev. Sci. Instrum.* **87** 023303 (2016)
 76. Фортов В Е, Шарков Б Ю, Штокер Х "Научная программа в новом международном центре фундаментальной физики — Европейском центре антипротонных и ионных исследований FAIR" *УФН* **182** 621 (2012); Fortov V E, Sharkov B Yu, Stöcker H "European Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR): the new international center for fundamental physics and its research program" *Phys. Usp.* **55** 582 (2012)
 77. Schoenberg K, Bagnoud V, Blazevic A, Fortov V E et al. "High-Energy-Density-Science Capabilities at the Facility for Antiproton and Ion Research" *Phys. Plasmas* **27** 043103 (2020)
 78. Фортов В Е, Терновой В Я, Жерноклетов М В, Мочалов М А, Михайлов А Л, Филимонов А С, Пяллинг А А, Минцев В Б, Грязнов В К, Иосилевский И Л "Ионизация давлением неидеальной плазмы в мегабарном диапазоне динамических давлений" *ЖЭТФ* **124** 288 (2003); Fortov V E, Ternovoi V Ya, Zhernokletov M V, Mochalov M A, Mikhailov A L, Filimonov A S, Ryaznov V K, Iosilevskii I L "Pressure-produced ionization of nonideal plasma in a megabar range of dynamic pressures" *J. Exp. Theor. Phys.* **97** 259 (2003)
 79. Fortov V E, Ilkaev R I, Arinin V A et al. "Phase transition in a strongly nonideal deuterium plasma generated by quasi-isentropic compression at megabar pressures" *Phys. Rev. Lett.* **99** 185001 (2007)
 80. Мочалов М А, Ильяев Р И, Фортов В Е, Ерунов С В, Аринин В А, Бликов А О, Огородников В А, Рыжков А В, Комраков В А, Куделькин В Г, Максимкин И П, Грязнов В К, Иосилевский И Л, Левашов П Р, Минаков Д Г, Парамонов М А "Квазиизентропическое сжатие неидеальной плазмы дейтерия и его смеси с гелием в области давлений до 250 ГПа" *ЖЭТФ* **159** 1118 (2021); Mochalov M A, Il'kaev R I, Fortov V E, Erunov S V, Arinin V A, Blikov A O, Ogorodnikov V A, Ryzhkov A V, Komrakov V A, Kudel'kin V G, Maksimkin I P, Gryaznov V K, Iosilevskiy I L, Levashov P R, Minakov D V, Paramonov M A "Quasi-isentropic compression of a nonideal plasma of deuterium and its mixture with helium at pressures up to 250 GPa" *J. Exp. Theor. Phys.* **132** 985 (2021)
 81. Норман Г Э, Старостин А Н "Несостоятельность классического описания невырожденной плотной плазмы" *Теплофизика высоких температур* **6** 410 (1968)
 82. Норман Г Э, Сайтов И М "Плазменный фазовый переход" *УФН* **191** 1153 (2021); Norman G E, Saitov I M "Plasma phase transition" *Phys. Usp.* **64** (11) (2021), <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039004>
 83. Мочалов М А, Ильяев Р И, Фортов В Е, Ерунов С В, Аринин В А, Бликов 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, Ogorodnikov V A, Ryzhkov A V, Komrakov V A, Kudel'kin V G, Maksimkin I P, Gryaznov V K, Iosilevskiy I L, Levashov P R, Minakov D V, Paramonov M A *J. Exp. Theor. Phys.* **133** (5) (2021); <https://doi.org/10.31857/S0044451021110122>
 84. Fortov V E, Mintsev V B "Quantum bound of the shear viscosity of a strongly coupled plasma" *Phys. Rev. Lett.* **111** 125004 (2013)
 85. Минцев В Б "Динамические методы в физике неидеальной плазмы. Начало" *Теплофизика высоких температур* **59** (6) (2021) в печати
 86. Кулиш М И, Минцев В Б, Дудин С В, Николаев Д Н, Ломоносов И В, Фортов В Е "Излучение кремния при давлении ударного сжатия 68 ГПа и в процессе разгрузки в вакуум" *Теплофизика высоких температур* **59** (6) (2021) в печати
 87. Кулиш М И, Минцев В Б, Дудин С В, Николаев Д Н, Ломоносов И В, Фортов В Е "Измерения коэффициента пропускания кремния под воздействием излучения интенсивных ударных волн в ксеноне" *Теплофизика высоких температур* **59** (6) (2021) в печати
 88. Николаев Д Н, Кулиш М И, Минцев В Б, Дудин С В, Ломоносов И В, Фортов В Е "Ударная сжимаемость монокристаллического кремния в диапазоне давления 280–510 ГПа" *Теплофизика высоких температур* **59** (6) (2021) в печати
 89. 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" *Contributions to Plasma Physics* **10** (2021), First published: 15 October 2021. <https://doi.org/10.1002/ctpp.202100113>

V.E. Fortov and dynamic methods in nonideal plasma physics. Chernogolovka

V.B. Mintsev^(a), V.K. Gryaznov

Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,

prosp. Akademika Semenova 1, 142432 Chernogolovka, Moscow region, Russian Federation

E-mail: ^(a) minvb@icp.ac.ru

Vladimir Evgen'evich Fortov made an enormous contribution to the physics of extreme states of matter, high energy density physics, the physics of shock and detonation waves, thermal physics, chemical physics, energetics, and several other realms of physics and technology. Among this amazingly broad spectrum of V.E. Fortov's scientific interests, special place is occupied by dynamic methods in the physics of nonideal plasmas. His scientific activity commenced in precisely this area, and it remained at the focus of his attention throughout his life. We have endeavored to briefly generalize V.E. Fortov's investigations in the area of explosion-produced nonideal plasmas and reveal the logic of their origination.

Keywords: nonideal plasma, shock waves, extreme states of matter, Chernogolovka

PACS numbers: 01.60.+q, 62.50.–p, 64.10.+h, 64.30.–t, 65.40.–b

Bibliography — 89 references

Received 27 September 2021

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **191** (11) 1212–1230 (2021)

Physics – Uspekhi **64** (11) (2021)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.10.039090>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.10.039090>