

УДК 533.9

ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ФИЗИКЕ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ. НАЧАЛО

© 2021 г. В. Б. Минцев*

*Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия***E-mail: minvb@icp.ac.ru*

Поступил в редакцию 06.09.2021 г.

После доработки 06.09.2021 г.

Принят к публикации 28.09.2021 г.

Настоящий обзор посвящен истории проведения академиком В.Е. Фортовым научных исследований в Институте проблем химической физики РАН в г. Черноголовка, где в 1971 г. он начинает свою работу после защиты кандидатской диссертации. Здесь В.Е. Фортовым проводятся исследования генерации, изучение физических свойств и газодинамики неидеальной низкотемпературной плазмы. Интенсивные экспериментальные и теоретические исследования сжимаемости, электропроводности, оптических свойств такой среды публикуются в ряде центральных журналов, таких как “Успехи физических наук”, “Журнал экспериментальной и теоретической физики”, “Доклады Академии наук”, “Теплофизика высоких температур” и др. В 1977 г. В.Е. Фортов защищает докторскую диссертацию “Исследование неидеальной плазмы динамическими методами”. После защиты фронт работ по исследованию неидеальной плазмы и процессов при воздействии мощных ударных волн сильно расширяется. Проводятся эксперименты по взрывной генерации нейтронов, отражательным свойствам мощных ударных волн, изучаются процессы преобразования энергии взрыва в электромагнитную. Особое внимание уделяется процессам “металлизации” водорода и инертных газов, обнаружен плазменный фазовый переход в дейтерии. В обзоре сделана попытка кратко обобщить исследования В.Е. Фортова по неидеальной плазме, генерируемой взрывом, показать логику их возникновения.

DOI: 10.31857/S0040364421060156

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Начало. Черноголовка
2. Первые эксперименты
3. Дальнейшее развитие динамических методов
4. Неидеальная плазма в Германии

Заключение

Список литературы

ВВЕДЕНИЕ

Трудно писать о великом человеке, ученом с большой буквы, с которым автор проработал почти 50 лет. Эти годы отмечены вспышками ярких научных идей, большой радостью при их реализации, многодневными спорами при постановке научных задач, вдохновенным тяжелым 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 настоящем обзоре хочется вспомнить, как все начиналось, рассказать историю появления работ по неидеальной плазме, показать логику возникновения новых научных идей, вспомнить людей, с которыми эти работы на-

чинались. Конечно, такое представление будет несколько субъективным, поскольку будут описаны работы, в которых я принимал непосредственное участие.

1. НАЧАЛО. ЧЕРНОГОЛОВКА

Я познакомился с В.Е. Фортовым в 1972 г., когда мне — студенту четвертого курса МФТИ кафедры горения и взрыва (зав.кафедрой член-корреспондент РАН Ф.И. Дубовицкий) — определили научного руководителя — молодого активного “свежеиспеченного” кандидата наук Владимира Фортова. Нелегкая запутанная история попадания В.Е. Фортова в Черноголовку хорошо описана в его книге [1] “Траектория. Владимир Фортов”, бережно подготовленной его дочерью Светланой и изданной в 2015 г. к 70-летию Владимира Евгеньевича. Его судьбу решило яркое выступление на симпозиуме по горению и взрыву в Ленинграде в 1971 г., где его талант заметил выдающийся физик академик Я.Б. Зельдович и рекомендовал его нобелевскому лауреату академику Н.Н. Семёнову, который в свою очередь определил его в Отделение института химической физики в Черноголовке, а его директор член-корреспондент АН Ф.И. Дубовицкий зачислил Владимира Форто-



Рис. 1. Фортов В.Е. и его учителя в Черногловке (по часовой стрелке): Фортов В.Е. и Зельдович Я.Б., Фортов В.Е. и Дубовицкий Ф.И., Семенов Н.Н., Дремин А.Н. [1].

ва младшим научным сотрудником в ОИХФ АН, в лабораторию одного из первых зав.лабораторией “Черногловки” А.Н. Дремина, который занимался проблемами детонации и взрыва (рис. 1).

Так, В.Е. Фортов начал свою работу в Черногловке. Черногловка начала 1970-х гг. была удивительным местом. Работа здесь велась в режиме “7 на 24”, т.е. семь дней в неделю по 24 часа в сутки. Были созданы такие условия, при которых ученый семь дней в неделю мог заниматься только своим делом, только наукой. Работалось легко, поскольку рядом были Институт физики твердого тела, Институт теоретической физики им. Ландау и другие. Можно было получить научную консультацию, придя в любой институт, или встретившись с нужным ученым на озере или на прогулке в лесу. В ОИХФ тогда интенсивно развивались работы по исследованию мощных взрывчатых веществ, твердых ракетных топлив и процессов детонации и горения.

Первые работы В.Е. Фортов в Черногловке были посвящены уравнениям состояния конденсированных сред при высоких динамических давлениях, оценкам параметров критической точки, кинетике испарения и конденсации при изэнтропическом расширении металлов [2–8]. Однако сюда он принес и свою любовь к неидеальной плазме, любовь, которая привела потом к созданию нового направления в науке — физика экстремальных состояний вещества и динами-

ческих процессов при высоких плотностях энергии. Его статья “Гидродинамические эффекты в неидеальной плазме” [9], опубликованная в журнале “Теплофизика высоких температур” в 1972 г., как раз была посвящена проблемам изучения поведения неидеальной плазмы при быстропротекающих процессах.

Физикой неидеальной плазмы В.Е. Фортов начал заниматься еще студентом и аспирантом МФТИ в Центре им. Кельдыша под руководством члена-корреспондента РАН В.М. Иевлева. Был проведен цикл работ по исследованию свойств неидеальной плазмы цезия на подогреваемой ударной трубе [10, 11], которые были обобщены в 1980 г. в книге “Теплофизические свойства рабочих сред газофазного ядерного реактора” под редакцией В.М. Иевлева [12]. Уже в Черногловке Владимир Евгеньевич понял, что техника ударных волн, генерируемых с помощью энергии конденсированных взрывчатых материалов, является уникальным инструментом для генерации плотной плазмы с сильным межчастичным взаимодействием. Были проведены расчеты состояния вещества за фронтом мощных ударных волн и показано, что ударно-сжатая плазма инертных газов с высокими параметрами неидеальности реализуется в них при повышенном начальном давлении и скоростях ударной волны ~ 5 км/с, что легко реализуется при использовании взрывных ударных труб [13].

Хотя Владимир был ярко выраженным теоретиком, было понятно, что для исследований неидеальной плазмы, где нет строгой теории ввиду отсутствия малого параметра, необходимо организовать экспериментальные работы и уже на их основе строить теоретические модели, проводить первопринципные расчеты. Также для правильной интерпретации экспериментов необходимо понимать гидродинамику взрывных течений, уметь проводить сложное трехмерное их моделирование с реальными параметрами вещества при высоких давлениях и температурах.

Первую поддержку в организации взрывного эксперимента по неидеальной плазме в Черноголовке оказала группа В.В. Якушева. Воспитанник этой группы механик Н.А. Афанасьев стал первым сотрудником группы Владимира Фортова. Работа “Об “аномальных” эффектах при выходе детонационной волны на свободную поверхность” [14] показала возможность генерирования 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 ИВТ АН, которая проводила в Черноголовке эксперименты по исследованию взрывных МГД-генераторов [15].

В.Е. Фортов задумал широкий фронт экспериментальных работ по исследованию неидеальной плазмы, генерируемой взрывом. Нужны были люди, и Владимир подбирает к себе в группу первых аспирантов и студентов (рис. 2). Задача создания взрывного генератора неидеальной плазмы на основе взрывных ударных труб и исследование ее теплофизических свойств была поставлена заочному аспиранту Ю.В. Иванову – сокурснику В.Е. по МФТИ. Аспиранту Томского университета А.А. Леонтьеву были поручены исследования изэнтроп расширения конденсированных сред в области сильного межчастичного взаимодействия и уравнения состояния неидеальной плазмы инертных газов. Аспирант МФТИ кафедры В.М. Иевлева В.К. Грязнов стал заниматься расчетами ударно-сжатой плазмы с использованием химической модели плазмы, учитывающей различные модели сильного межчастичного взаимодействия. Студенту кафедры высоких температур МФТИ В.Е. Беспалову были поручены исследования сжимаемости аргоновой плазмы за фронтом мощных ударных волн. Тогда был принят в группу и я. Хорошо помню первую встречу с В.Е. Фортовым. В то время студенты имели возможность встречаться с различными активными учеными и имели право выбрать себе научного руководителя. Владимир беседовал со мной более двух часов. Он ярко описал научную задачу, открыл мне новый неизведанный мир проблем, возникающих в сильно-разогретом веществе с сильным межчастичным взаимодействием, особенно увлеченно он рассказывал о возможных специфических плазменных фазовых пе-

реходах и о металлизации вещества при высоких давлениях, ссылаясь на единственную совместную работу наших великих ученых Л.Д. Ландау и Я.Б. Зельдовича 1945 г. [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 Франк-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. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Началась интенсивная дружная работа всей группы.

Сначала 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 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 calorическое уравнение состояния вещества в виде зависимости внутренней энергии от давления и удельного объема $E = E(P, V)$ [17, 19]. Внутренняя энергия, однако, не является термодинамическим потенциалом по отношению к переменным P и V и для построения замкнутой термодинамической системы необходимо дополнительно знать зависимость температуры $T = T(P, V)$. К началу наших работ взрывные методы генерации ударных волн в газах пониженной плотности интенсивно развивались в работах советских и американских ученых. Был создан широкий спектр устройств от простых “линейных” взрывных ударных труб до специальных кумулятивных устройств, позволяющих получать скорости ударных волн до 100 км/с. Эти устройства достаточно подробно описаны в обзоре “Взрывные ударные трубы” [20]. Другая техника на основе метания плоского металлического ударника с помощью конденсированных взрывчатых веществ была широко использована 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 взрывчатого вещества (ВВ). Применение специальным образом профилированной детонационной линзы и выбор соответствующих размеров активного заряда



Рис. 2. Первые аспиранты, студенты (по часовой стрелке): Грязнов В.К., Иванов Ю.В., Леонтьев А.А., Минцев В.Б., Беспалов В.Е.

ВВ обеспечивали одномерность и стационарность параметров детонационного фронта при его выходе из ВВ в исследуемый газ. Полное энерговыделение в каждом эксперименте составляло $\sim 3 \times 10^6$ Дж при мощности $\sim 10^{11}$ Вт, что приводило, разумеется, к уничтожению всего устройства и необходимости работы в специально защищенных 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 базисным методами с помощью скоростных кинокамер и ионизационных датчиков с точностью 1–1.5%. В пределах данной 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 импульсной рентгенографии [22, 23], не вносящим возмущения в поток плазмы и обладающим высоким временным ($\sim 10^{-7}$ с) и пространственным (~ 2 мм) разрешением.

Ввиду прозрачности плазмы перед фронтом ударной волны и малых размеров вязкого скачка уплотнения тепловое излучение имеет возможность беспрепятственно выходить из плазменного объема и дает информацию о равновесной температуре и коэффициентах поглощения ударно-сжатой плазмы. Интенсивность этого излучения при яркостном методе регистрации температуры (точность 5–10%) определялась фотометрическим сравнением разверток во времени свечения ударно-сжатой плазмы и эталонных источников света. Совместная регистрация скорости фронта и плотности определяет в соответствии с законами сохранения уравнение состояния неидеальной плазмы $E = E(P, V)$, которое совместно с измеренной зависимостью $T = T(P, V)$ представляет собой термодинамически полную информацию о плазме аргона при давлении до 600 МПа и температуре $T = 15.5\text{--}23$ кК.

Для измерений термодинамических и оптических характеристик плазмы при более высоких по сравнению с ударными трубами давлениях 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 полимер-

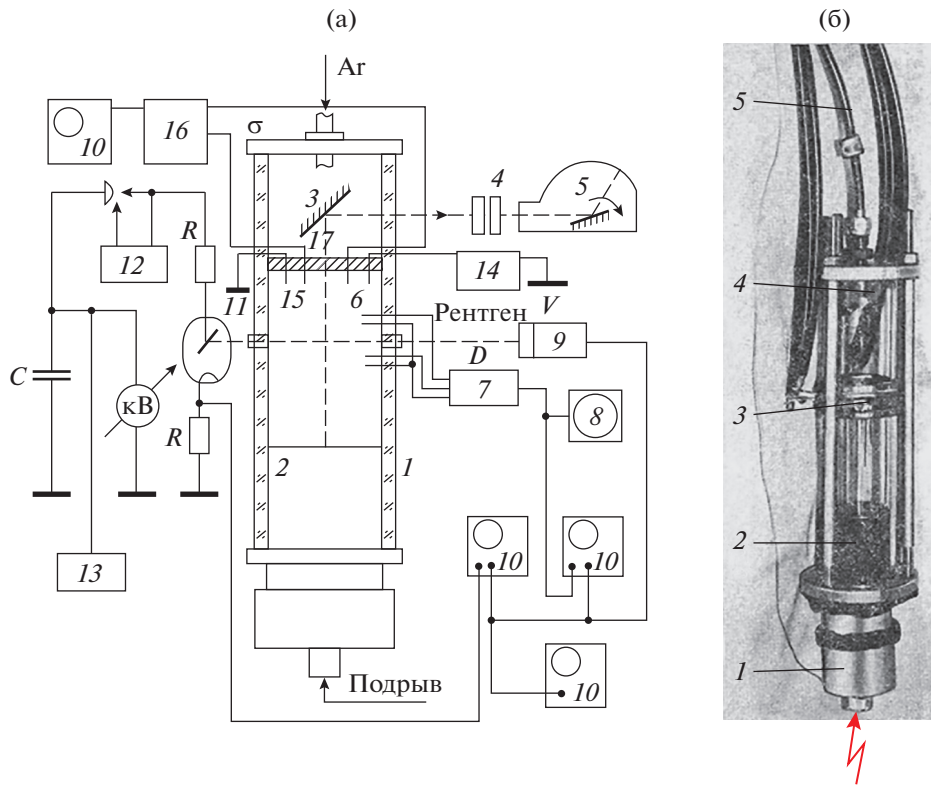


Рис. 3. Схема диагностики (а) и взрывной генератор неидеальной плазмы (б) [22, 23].

ных мишеней, предварительно сжатых до давлений $\sim 10^6$ бар. Возбуждение мощных ударных волн в мишенях осуществлялось линейными взрывными ме-

тательными устройствами [24], действие которых основано на ускорении продуктами детонации плоских металлических ударников до скоростей

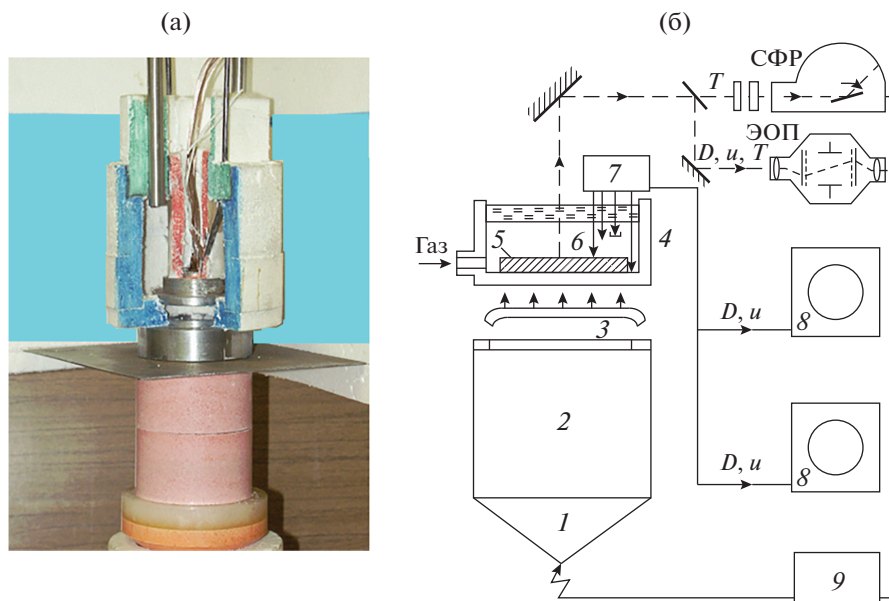


Рис. 4. Взрывной генератор прямоугольных ударных волн (а) и схема диагностики (б) [24].

2–6 км/с. Характерные энерговыделения в экспериментах составляли $(2–30) \times 10^6$ Дж при мощности 10^{11} Вт.

В экспериментах на этих генераторах электроконтактным и оптическим базисным методами выполнялась совместная независимая регистрация двух кинематических параметров: скорости фронта D и массовой скорости U движения плазмы. Открытые электроконтактные датчики регистрировали на скоростных осциллографах скорость фронта D с точностью $\sim 1\%$. Измерение массовой скорости U (точность 1–2%) осуществлялось закрытыми датчиками специальной конструкции, не реагирующими на ударную волну в плазме и срабатывающими в момент прихода тяжелой контактной поверхности раздела плазмы с мишенью. При оптической методике регистрации на заданном расстоянии от мишени устанавливалась плексигласовая преграда, через которую при помощи скоростных кинокамер или электронно-оптических преобразователей фиксировалось излучение ударно-сжатой плазмы, а 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 — $P = 0.03–3$ ГПа, $T = 18–22$ кК, где реализуется развитая ионизация и сильное кулоновское взаимодействие, $\Gamma = 1–5$.

Анализ полученных термодинамических данных свидетельствует о наличии в сильносжатой плазме межчастичного отталкивания, не описываемого стандартными плазменными теориями. В рассматриваемой области высоких плотностей плазмы средние межчастичные расстояния сравнимы с характерными размерами атомов и ионов. Это обстоятельство, а также сильное кулоновское взаимодействие свободных зарядов может вызвать заметную деформацию энергетических уровней. Поэтому для интерпретации результатов использовалась наиболее популярная в физике плазмы “химическая” модель [25, 26], в которой описание межчастичного отталкивания потребовало привлечения нетрадиционной для физики плазмы квантовомеханической модели (модель “ограниченного атома” [27, 28]), учитывающей воздействие плазменного окружения на дискретный спектр атомов и ионов в сильно сжатой плазме. Для описания этого эффекта в дальнейшем использовались также модели твердых и мягких сфер.

Измерение электропроводности во взрывной ударной трубе осуществлялось четырехточечным зондовым методом, обладающим высоким пространственным разрешением и относительно простой реализацией в условиях однократного динамического эксперимента. Были проведены измерения электропроводности плазмы инертных газов в широком диапазоне параметров неидеально-

сти от $\Gamma \sim 0.3$, где различия между теориями невелики и имеется значительное количество экспериментальных данных, вплоть до области экстремально высоких $\Gamma \sim 5–10$, где расходится большинство теоретических приближений. Полученная совокупность экспериментальных данных определенно указывает на занижение измеренных значений электропроводности по сравнению с теорией Спитцера [29]. Имеющееся количественное расхождение между различными группами экспериментов связано 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 [30], в которой ионные корреляции описывались в заимствованном из теории жидких металлов и полупроводников приближении Займана, а рассеяние зарядов рассчитывалось в борновском приближении с экранированным кулоновским потенциалом. Полученные соотношения имеют правильную спитцеровскую асимптотику при $\Gamma \ll 1$ и обладают приемлемыми экстраполяционными свойствами, не имея нефизических расходимостей и удовлетворительно описывая “низкотемпературный” эксперимент вплоть до области экстремально высоких Γ .

Кроме организации и участия в эксперименте по неидеальной плазме, генерируемой взрывом, В.Е. Фортов продолжает заниматься уравнениями состояния конденсированных сред, исследованием уравнения состояния металлов методом изэнтропического расширения и “плазменным фазовым переходом” при детонационных явлениях, изучает гидродинамические эффекты в неидеальных средах. Результаты всех исследований публикуются в ряде центральных журналах, таких как “Журнал экспериментальной и теоретической физики”, “Доклады Академии наук”, “Теплофизика высоких температур” и др. (см. список литературы). Зимой 1977 г. В.Е. Фортов успешно защищает докторскую диссертацию “Исследование неидеальной плазмы динамическими методами” на специализированном совете при ИВТ АН. Консультантом во время работы над диссертацией был академик Я.Б. Зельдович, а оппонентами выступили профессор Л.В. Альшулер, чье имя занимает достойное место в ряду создателей советского ядерного оружия, и академик Е.П. Велихов — всемирно известный специалист в области плазменных исследований. Оппоненты дружно отмечают высокий уровень проведенных работ, их актуальность и научную значимость. Тогда ими было отмечено, что комплекс проведенных Владимиром Фортовым исследований знаменует собой появление нового научного направления — динамической физики неидеальной плазмы. Действительно уже после выходит серия обзоров в журнале “Успехи физических наук” [25, 31–33]. Совместно с

И.Т. Якубовым выпускается книга “Физика неидеальной плазмы” [34].

1 декабря 1977 г. подписывается приказ о создании лаборатории физической газодинамики под руководством В.Е. Фортова на основе уже существующей группы. В нее входят дополнительно только что защитившие студенческие дипломы экспериментаторы В.Я. Терновой, А.П. Жарков, теоретики кандидат наук Г.А. Павлов и выпускник КПУ А.А. Овчинников. Первым заместителем по лаборатории стал В.Е. Беспалов. Чуть позже в связи с необходимостью проводить массивные газодинамические расчеты в лабораторию приходят А.Л. Ни, А.В. Шутов. Для активной работы с моделями уравнений состояния вещества привлекается ученик Л.В. Альтшулера А.В. Бушман, который приходит со своим учеником И.В. Ломоносовым, являющимся в настоящее время и.о. директора Института проблем химической физики. В середине 1980-х гг. в связи с работой над проектом “Вега” в лабораторию входит группа Г.И. Канеля. После защиты докторской диссертации в 1982 г. А.Л. Ни становится заместителем заведующего лабораторией. В 1991 г. эта работа поручается мне. А в 2001 г. заместителем заведующего уже отдела экстремальных состояний вещества становится В.К. Грязнов.

4. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

После защиты докторской диссертации казалось, что можно немного отдохнуть и расслабиться, однако В.Е. Фортов 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 учеными из 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 [28] (рис. 5). Было обнаружено значительное превышение давления и занижение внутренней энергии по сравнению с существующими моделями. Возможным объяснением является деформация электронных уровней в сильно сжатой плазме. Для описания этого эффекта на основе химической модели плазмы в [28] предложены модель “ограниченного” атома и псевдопотенциальная модель плазмы.

Модель “ограниченного” атома успешно была использована для объяснения эффекта “просветления” в неидеальной плазме. Проведенные В.Е. Беспаловым измерения коэффициента поглощения неидеальной аргоновой плазмы в зависимости от плотности показали его значительное занижение по сравнению с расчетными величинами при больших плотностях плазмы ([27], рис. 6). Причем экспериментальные значения с повышением плотности стремились к теоретическим, обусловленным только связано-связанными переходами. Данный эффект был интерпретирован в [27] как результат деформации электронного энергетического спектра атомов при их сжатии в результате воздействия на них окружающих частиц. В плотной плазме межчастичное взаимодействие делает внутриатомный потенциал более короткодействующим, что приводит к конечному числу дискретных энергетических уровней и последова-

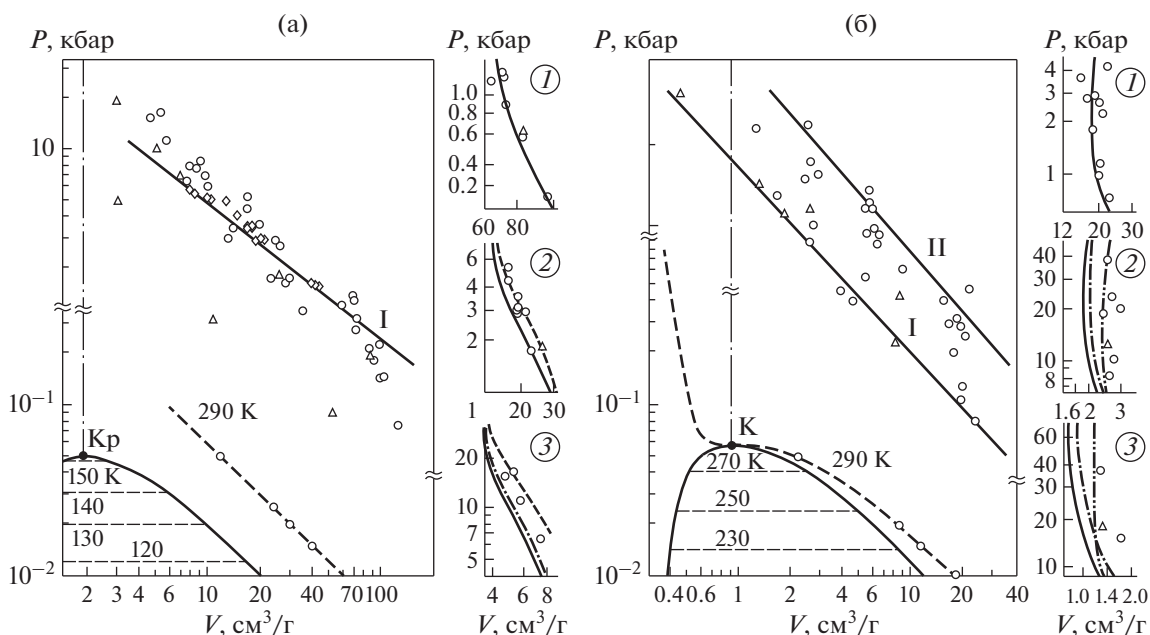


Рис. 5. Фазовая диаграмма аргона (а) и ксенона (б) [28].

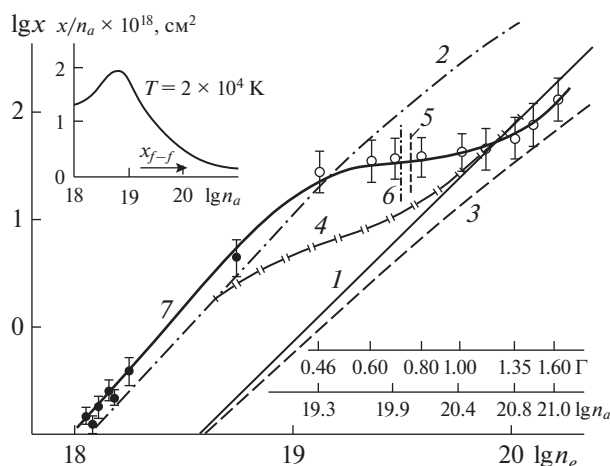


Рис. 6. Коэффициент поглощения неидеальной аргонной плазмы в зависимости от плотности [27].

тельному переходу высоковозбужденных состояний в непрерывный спектр с ростом плотности плазмы. Такое исчезновение части возбужденных энергетических уровней вызывает исключение механизма фотоионизационного поглощения из этих состояний и приводит к наблюдаемому в эксперименте уменьшению коэффициента поглощения.

Также был 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 отраженными ударными волнами и таким образом повысить давление в ксеноне до $P \sim 7$ ГПа и температуру в плотной плазме до $T \sim 100$ кК при значениях степени ионизации до трехкратной величины [35]. Для реализации сильно разогретой неидеальной плазмы были использованы также кумулятивные устройства на основе сжатия потока в условиях остроугольной геометрии. Электрофизические свойства такой плазмы оказались в значительной мере неожиданными [35], так как они свидетельствуют об отсутствии подобия кулоновской компоненты неидеальной плазмы — безразмерная электропроводность высокотемпературной плазмы (рис. 7) оказывается меньше высокотемпературной при тех же величинах кулоновской неидеальности Γ . Анализ высокотемпературных данных показывает, что причиной этого эффекта является некулоновский характер рассеяния высокоэнергетических электронов на тяжелых ионах. Действительно, с ростом температуры амплитуда кулоновского рассеяния $f_k \sim e^2/(kT)$ убывает и оказывается сравнимой с характерными размерами ионов ксенона $\sim 4 \text{ \AA}$, так что высокоэнергетические электроны проводимости при рассеянии могут подходить достаточно близко к ядру, где потенциал взаимодействия уже не является чисто

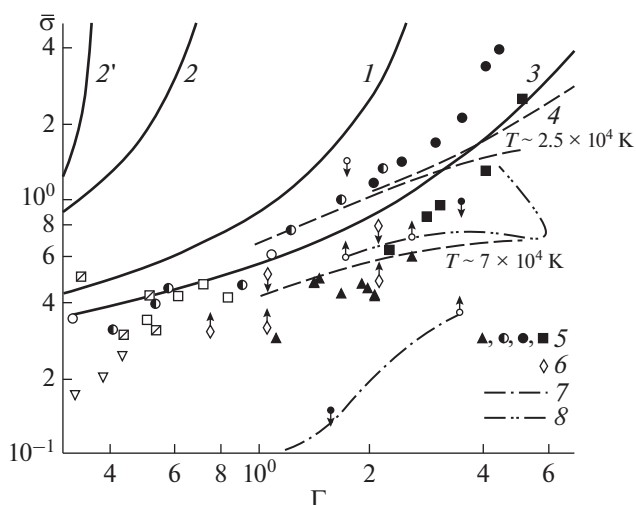


Рис. 7. Безразмерная электропроводность в зависимости от параметра неидеальности [35].

кулоновским и оказывается искаженным внутренними электронными оболочками. В этой окрестности ядра потенциал является более сильным, чем внешний ионный потенциал, что и приводит к увеличению сечения рассеяния и, следовательно, к наблюдаемому в экспериментах (рис. 7) относительному уменьшению электропроводности.

Проведенные эксперименты давали лишь косвенную информацию о свободных носителях в неидеальной плазме. Между тем проблема определения электронной концентрации выглядела очень “горячо”: какие электроны можно считать связанными, какие свободными? Поэтому возникла идея использования лазерного излучения для диагностики неидеальной плазмы. Лазерная техника как раз в эти времена стала широко использоваться в экспериментах. Было предложено использовать хорошо известный в радиолокации и физике твердого тела эффект полного отражения электромагнитного излучения с длиной волны λ от среды с электронной концентрацией, превышающей критическое значение $n_{cr} \geq (\pi c^2 m)/(\lambda^2 e^2)$. Концентрация свободных носителей в плотной плазме достаточно велика, а потому область интересующих нас длин волн лежит в оптическом диапазоне ($n_{cr} = 10^{21} \text{ см}^{-3}$ соответствует длина волны $\lambda = 1.06 \text{ мкм}$). Ю. Б. Запорожцем был создан экспериментальный стенд по лазерной диагностике плотной плазмы ксенона, генерируемой с помощью взрывного генератора прямоугольных импульсов, и получены первые данные по отражательным свойствам ксенона при давлениях до $P \sim 17$ ГПа и электронных концентрациях $n_e \sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ [36, 37]. Результаты оказались достаточно неожиданными (рис. 8): наблюдалось плавное увеличение коэффициента отражения R в зависимости от плотности вплоть до значений $R \sim 50\%$, характерных для металлов, ожидаемой сту-

пеньки на критической плотности обнаружено не было. Удалось лишь провести оценки частоты 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, который работал в Одесском университете (сейчас он профессор университета в г. Валенсия). Он предложил тогда использовать данные по отражению для определения диэлектрической проницаемости неидеальной плазмы [38]. Чуть позже началось сотрудничество с немецкими учеными из Университета г. 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 [39–41]. 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. Отмечу, что желание прямого измерения электронной концентрации в неидеальной плазме было осуществлено несколько позже после пуска в строй электродинамической установки, которая позволяла проводить эксперименты с сильными магнитными полями. Так, в работах Н.С. Шилкина исследовался эффект Холла в неидеальной плазме и зависимость электросопротивления от величины магнитного поля [42].

С неидеальной плазмой связывают реализацию многих энергетических и космических проектов. В одном из них – разработка физических принципов работы газозажигательного ядерного реактора – Владимир Евгеньевич принял участие еще при работе студентом и аспирантом. Другое чрезвычайно интересное направление – управляемый термоядерный синтез. Для того чтобы пошла реакция синтеза, слияния, нужно иметь очень высокую температуру и крайне высокие давления. Впервые такое “горение”, только инициированное ядерным зарядом было реализовано более 60 лет назад, когда была взорвана первая водородная бомба. Однако взрыв – процесс неуправляемый, пригодный только для разрушения. Чтобы использовать его для созидания, нужно научиться его контролировать. В.Е. Фортов начал развивать схемы реализации импульсного термоядерного синтеза, основанные на сжатии дейтерия в конических мишенях с помощью лайнеров, разгоняемых конденсированным взрывчатким веществом (КВВ) до высоких скоростей [43]. Первые шаги были сделаны на стандартном генераторе прямоугольных импульсов, разгоняющих металлические ударники до скоростей $\sim 5.5 \text{ км/с}$ (рис. 9). Работу поддержал академик Прохоров, который не один раз приезжал в Черногоровку для ознакомления с “живыми” результатами, а его сотрудник из ФИАН И.К. Красюк дневал и ночевал в нашем институте. Совместная работа всей нашей лаборатории и сотрудников ФИАН привела к интересным результа-

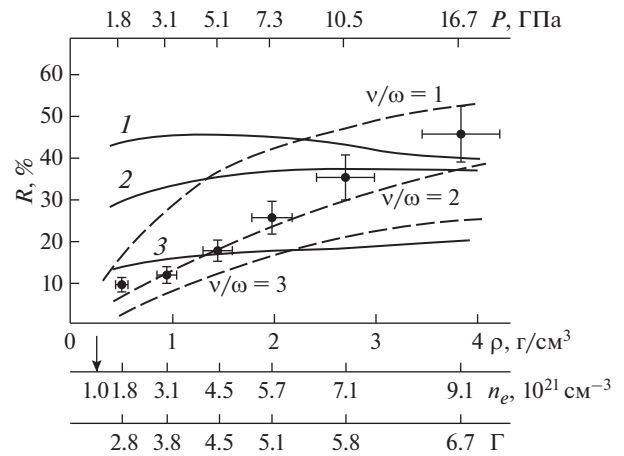


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения ксеноновой плазмы от плотности [36].

там: 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, поэтому в дальнейшем были предприняты усилия для увеличения скорости метания ударников. Были разработаны слоистые системы, позволяющие разгонять тонкие фольги из молибдена толщиной 0.1 мм до скоростей $\sim 12.8 \text{ км/с}$ [44], и конические взрывные генераторы, в которых были реализованы скорости ударной волны $\sim 17 \text{ км/с}$ в меди и получены давления $P \sim 1.4 \text{ ТПа}$ [45]. Правда, платой за такое увеличение параметров было уменьшение времени существования плазменного сгустка и существенно меньшая его масса. Однако это было уже на несколько лет позже, в экспериментах с термоядерной плазмой они не использовались, поскольку проведенные на основании первых экспериментов расчеты показали, что скорости ударников в такой постановке для зажигания термоядерной реакции должны быть в не-

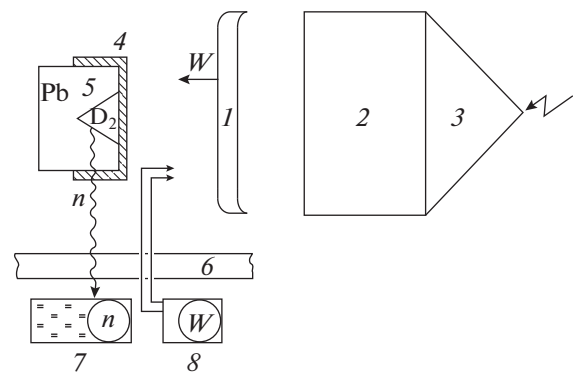


Рис. 9. Схема установки по генерации нейтронов [42].

сколько раз выше. Тем не менее эти устройства оказались чрезвычайно интересны для исследования уравнения состояния вещества в мегабарном диапазоне давлений. Существенный прогресс в реализации простыми коническими конструкциями террапассальных давлений был достигнут лишь в последнее десятилетие [46].

Каким образом можно существенно повысить скорости метания конденсированных сред? 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, где такого рода ограничений, на первый взгляд, не видно. В конце 1970-х гг. для достижения скоростей порядка 100 км/с была очень популярна идея использования так называемого рельсотрона [47], представляющего собой две параллельные металлические шины, между которыми движется замыкающий электрическую цепь пластмассовый ударник, разгоняемый магнитопржатым разрядом с импульсным током ~ 1 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 килограмм, что на несколько порядков превышает плотность запасенной энергии в конденсаторах. Разработанные к тому времени в Сарове и Лос-Аламосе различные конструкции взрывомагнитных генераторов представляли собой достаточно компактные устройства, позволяющие получать рекордные значения тока ~ 300 МА, энергии ~ 300 МДж магнитных полей ~ 28 МГс [48, 49].

В это же время В.Е. Фортов при обсуждении экспериментов с нейтронами познакомился с Л.П. Феоктистовым, и ими была предложена идея [50] создания мощного источника термоядерных нейтронов на основе обжатия с помощью цилиндрического лайнера предварительно разогретой до температур ~ 0.6 кэВ плазмы, находящейся в продольном магнитном поле. Для ускорения лайнера предлагалось использовать химическое конденсированное взрывчатое вещество, а для предварительного нагрева плазмы столкновение потоков дейтерия, разгоняемых плазменными ускорителями до скоростей ~ 300 км/с.

Для реализации таких работ необходимо было создание специального взрывного стенда, оснащенного низковольтными и высоковольтными конденсаторными батареями мегаджоульного уровня запаса энергии. Директор ОИХФ Ф.И. Дубовицкий поддержал эти идеи, было выделено место на полигоне на Павильоне А-3, и начались закупки необходимого оборудования и строительство электродинамической установки,

научное руководство которым было поручено автору. Надо честно сказать, если работа со взрывчатыми материалами в нашем институте была поставлена на высоком уровне, то специалистов по высоковольтной технике не было. Пришлось ездить по различным институтам, подбирать необходимое оборудование, консультироваться по различным вопросам. К 1986 г. установка начала работать, были проведены предварительные эксперименты.

В 1986 г. ушел Н.Н. Семенов, Ф.И. Дубовицкий постепенно отходил от управления институтом. Личности масштаба Н.Н. Семенова, способной удержать большой институт, не находилось, хотя сильных ученых в химфизике было много. Непрерывно менялись директора, на короткое время даже был назначен “варяг” из ИОНХ АН СССР. Лаборатория В.Е. Фортов переходила из сектора в сектор (из сектора макрокинетики и газодинамики экстремальных химико-технологических процессов в сектор физики горения и взрыва и наоборот). В 1986 г. Владимир Евгеньевич был избран завлабом в ИВТ АН и перешел 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 завлабом на общественных началах. Его отсутствия мы даже не замечали, 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, исключая, конечно, дни дальних командировок. Эта традиция сохранялась всегда, даже когда Фортов занимал ответственные государственные должности и до самых последних дней. Недаром в первом интервью в качестве Президента РАН на вопрос: “Ваша первая поездка?” — последовал моментальный ответ: “В Черноголовку...”.

Несмотря на все пертурбации в институте, работа на электродинамической установке стала развиваться дальше, хотя акценты сместились. Как уже было сказано, рельсотронной тематикой стали интенсивно заниматься в ИВТ АН, где в тот момент уже имелось все необходимое оборудование и опыт. К работе с нейтронными источниками мы вернулись позже, только через пятнадцать лет, благодаря активности директора ТРИНИТИ В.Е. Черковца. К 2010 г. были разработаны специальные взрывомагнитные генераторы (ВМГ) для запитки плазменных ускорителей [51] (рис. 10). Но появились новые интересные задачи. В частности — каким образом и с какой эффективностью можно преобразовать химическую энергию КВВ в энергию электромагнитной волны? В 1985 г. к нам приехал А.Б. Прищепенко со своими компактными устройствами, разработанными в ЦНИИХМ. На полигоне были проведены серии экспериментов, специально разработанной для этих эксперимен-

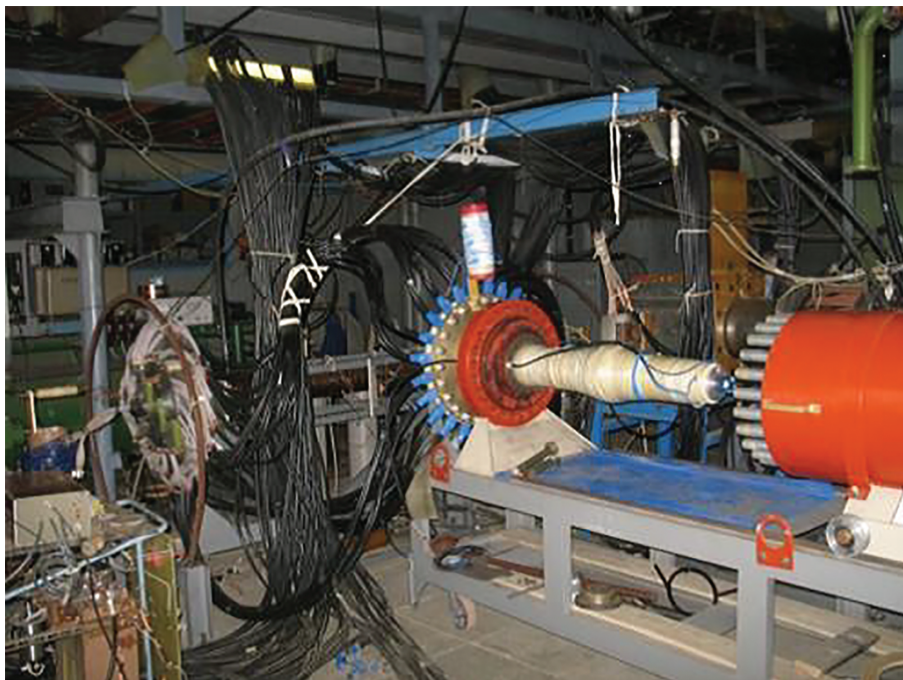


Рис. 10. Взрывомагнитный генератор для запитки плазменных ускорителей [51].

тов диагностикой были зафиксированы достаточно мощные импульсы электромагнитного излучения как в мегагерцовом, так и СВЧ-диапазоне 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 сильноточную релятивистскую электронику. Мы обратили внимание, что взрывомагнитные генераторы позволяют преобразовать химическую энергию конденсированных взрывчатых веществ 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%. При этом, однако, возникает ряд нетривиальных проблем, вызванных несоответствием масштаба характерных кинетических энергий. Дело в том, что типичный уровень энерговыделения 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 ~ 0.5 МэВ. Высокая эффективность работы взрывомагнитных генераторов имеет место лишь при их работе на низкоиндуктивные нагрузки, в то время как релятивистские источники работают

обычно при 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 взрывомагнитных генераторов 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 взрывомагнитных генераторов с перехватом магнитного потока: цилиндрический генератор с осевым инициированием заряда КВВ [52] и малогабаритный конический генератор со скользящей точкой контакта [53, 54]. Член-корреспондент РАН А.Н. Диденко и его группа из НИИЯФ Томского политехнического университета под руководством А.Г. Жерлицина в качестве источника СВЧ-излучения предложили использовать триод с виртуальным катодом (виркатор) [55]. Это устройство отличалось своей сравнительной простотой, В.Е. называл его просто – “кастрюля” с электродами. Для согласования работы устройств использовались взрывающиеся проводочки, отработанные Е. Азаркевичем из Томского ВНИИВН.

Использование высоковольтных ВМГ с перехватом магнитного потока позволило разработать бестрансформаторную схему (рис. 11) [56, 57] генерации электронного пучка и импульсов СВЧ-излучения с помощью энергии КВВ на основе “бустерного” спирального ВМГ с перехватом потока, выполняющего роль энергетического источника,

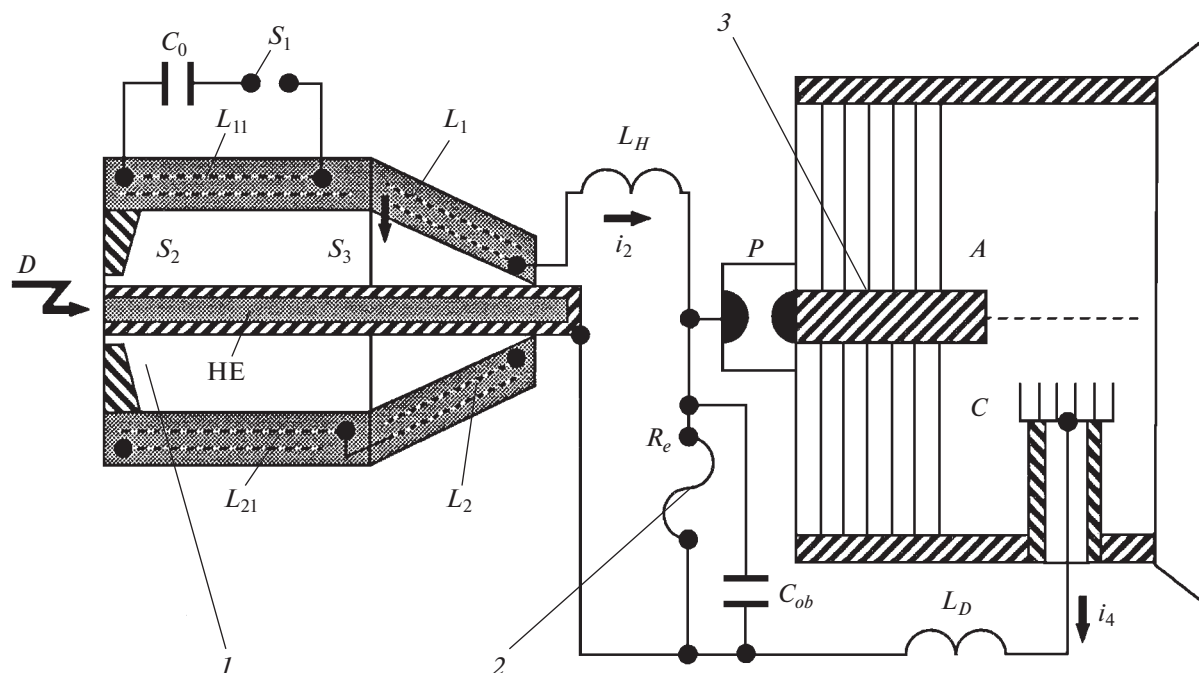


Рис. 11. Схема эксперимента: 1 – взрывамагнитный генератор, 2 – электровзрывной прерыватель, 3 – виркатор [57].

“быстрого” высоковольтного ВМГ с перехватом потока, взрывающихся проволочек, газонаполненного разрядника, обостряющей емкости и виркатора. От небольшой емкости $C_0 = 10^{-4}$ Ф напряжением 3 кВ осуществляется запитка внешней спирали бустерного ВМГ L_{11} , который усиливает электрическую энергию в нагрузку – внешнем соленоиде высоковольтного ВМГ L_1 – до 5 кДж. При расширении лайнера высоковольтного генератора магнитный поток “перехватывается” внутренним соленоидом L_2 , вызывая появление тока в цепи электровзрывного прерывателя R_e . Возникающее при размыкании тока перенапряжение приводит к пробое разрядника P и высоковольтный импульс прикладывается к аноду A виркатора, вызывая взрывную эмиссию с катода C , формирование электронного пучка и генерацию СВЧ-излучения. В ходе экспериментов на виркаторе получены импульсы напряжения до 600 кВ и токи до 16 кА, что соответствует мощности релятивистского электронного пучка 10 ГВт. Мощность выведенного в атмосферу излучения составила 100 МВт. Предложена модель работы элементов схемы и показано ее разумное согласие с экспериментом. Таким образом, проведенные эксперименты продемонстрировали возможность генерации мощного СВЧ-излучения с помощью энергии взрывчатых веществ. Дальнейшее развитие эти работы получили уже в ИВТ АН в лабораториях Е.В. Нестерова и А.В. Шурупова.

5. НЕИДЕАЛЬНАЯ ПЛАЗМА В ГЕРМАНИИ

В эти годы бурно развивается международное сотрудничество. В.Е. Фортов активно участвует в работе различных международных конференций, Черноголовку посещают делегации ученых из различных стран для ознакомления с работами в области экстремальных состояний вещества. Мне хочется отметить особенно плотное взаимодействие с немецкими учеными. В Германии в области физики неидеальной плазмы работала мощная группа теоретиков в университетах городов Берлина, Росток и Грейфсвальда под руководством профессора В. Эбелинга. Эксперименты проводились в Центральном институте электронной физики под руководством Х. Хесса. Регулярно проводились конференции по физике неидеальной плазмы. Сразу же наметились совместные работы. В 1990 г. вышла книга “Теплофизические свойства разогретой плотной плазмы” в соавторстве с В. Эбелингом, А. Форстером, В.К. Грязновым и А. Полищуком [58]. Совместно с учеными из Росток Г. Репке, Р. Редмером, Х. Рейнгольц вышел ряд совместных публикаций [39–41]. Это сотрудничество плодотворно продолжается и в настоящее время.

Другое направление совместных научных работ с немецкими учеными осуществлялось с Обществом по исследованию тяжелых ионов г. Дармштадт (GSI) в лаборатории физики плазмы, возглавляемой профессором Дитером Хоффман-

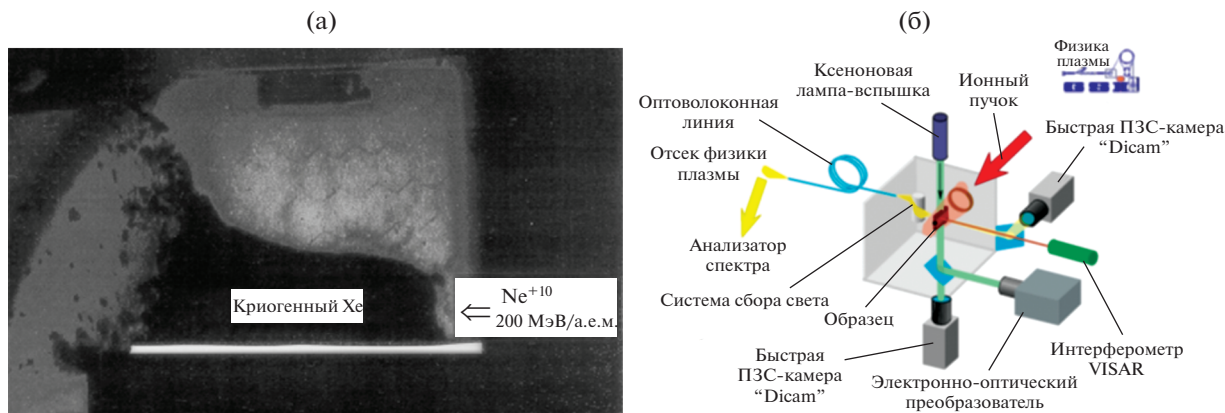


Рис. 12. Фотография воздействия пучка на кристалл ксенона – (а) и схема эксперимента HINEX – (б) [61].

ном. Во всех совместных экспериментах также принимали активное участие сотрудники ИТЭФ (г. Москва) под руководством Б.Ю. Шаркова 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 импульса на мишени до 100 нс за счет временной компрессии пучка высокочастотным полем [59]. В.Е. Фортов первым заметил, что такой драйвер выглядит очень интересным для 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, что достаточно для нагрева твердого вещества до температур $> 10^3$ К. Были предложены две основные концепции по изучению фундаментальных свойств состояний вещества с высокой плотностью энергии, получаемых при помощи интенсивных ионных пучков [59, 60]: HINEX (heavy ion heating and expansion) – где цилиндрическая или плоская мишень квазиизотропически нагревается пучком ионов, а затем образец изэнтропически расширяется и проходит интересные области фазовой диаграммы, включая двухфазную область; LAPLAS (laboratory planetary sciences) – где осуществляется квазиизэнтропическое обжатие цилиндрической мишени до мегабарных давлений веществом, разогретым кольцевым пучком. Схема эксперимента HINEX и фотография воздействия пучка на кристалл ксенона приведены на рис. 12. В ходе этих экспериментов [59, 61] были 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, UO₂).

Сотрудничество с немецкими учеными было взаимным. Сотрудники лаборатории физики

плазмы приезжали в Черногоровку для проведения совместных экспериментов по исследованию плазмы, генерируемой взрывом. Из наиболее интересных результатов отмечу исследование поведения спектральных линий ксенона и примесных линий алюминия в ксеноновой плазме [62]. В этих экспериментах удалось проследить уширение, сдвиг и исчезновение линий в зависимости от плотности плазмы, что позволило построить модели механизмов этих процессов в условиях сильного кулоновского взаимодействия [63].

Интенсивно развиваемые В.Е. Фортовым методы исследования плотных сильно взаимодействующих сред требовали совершенно новых и необычных подходов. В середине 1990-х гг. родилась идея использовать для диагностики неидеальной плазмы мощные пучки релятивистских ионов. Дело в том, что они обладают высокой проникающей способностью в веществе и определение изменения интенсивности пучка при этом позволило бы напрямую определить важный параметр плазмы – тормозные потери, тем более что, благодаря сильному кулоновскому межчастичному взаимодействию можно было ожидать проявление очень интересного эффекта увеличения пробега ионов в плазме – ее “просветление”. Задача оказалась достаточно трудной. Каким образом можно совместить чрезвычайно “грязную” взрывную технику, генерирующую высокие давления, ударные волны и всепроникающую пыль с высокочистой глубоковакуумной ускорительной техникой? Этот вопрос был быстро решен при слаженной работе сплоченных команд российских институтов ИПХФ РАН, ИТЭФ и ОИВТ РАН и немецких коллег из Центра физики тяжелых ионов (GSI) Дармштадта. Впервые установка была апробирована и первые эксперименты с протонными пучками были проведены в ИТЭФ в Москве в ноябре 1997 г. [64, 65]. Затем эксперименты продолжались в Дармштадте уже с пучками тяжелых ионов [66]. На рис. 13 приведено фото взрывной камеры на 150 г ТНТ, встроенной в пуч-

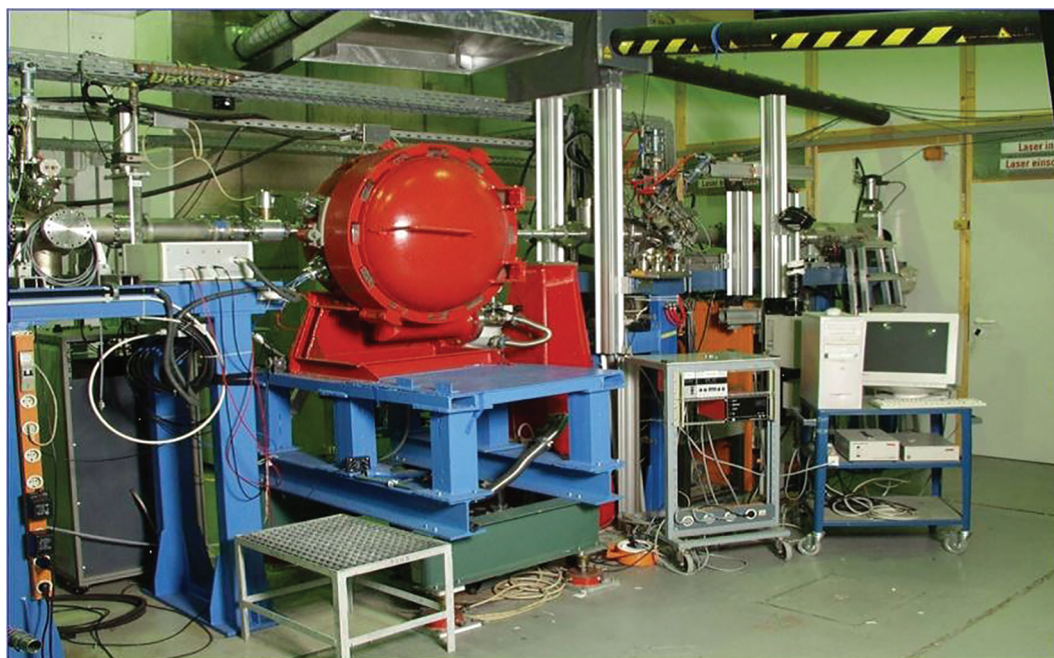


Рис. 13. Взрывная камера на ускорителе в GSI.

ковую линию в GSI. Полученный в ходе этих экспериментов обширный экспериментальный материал позволил значительно продвинуться в понимании процессов, происходящих в неидеальной плазме, и послужил базисом для построения теоретических моделей.

Третьим направлением работ, развиваемым в кооперации GSI, ИПХФ РАН и ИТЭФ, явилась протонная радиография [67]. Существующие радиографические установки на ускорителях протонов в США [68] и России [67, 69] наглядно показали преимущества метода протонной радиографии по сравнению с традиционными рентгенографическими методами диагностики при исследовании

плотных объектов в динамических экспериментах. На ускорительном комплексе ТВН-ИТЭФ (тераваттном накопителе ИТЭФ) создана протонно-радиографическая установка с применением магнитной оптики (протонный микроскоп ПУМА), которая позволяет проводить измерения распределения плотности вещества внутри статических и динамических объектов с помощью пучка протонов с энергией 800 МэВ [67]. Специально для проведения экспериментов со взрывчатыми материалами в состав установки была включена взрывная камера на 150 г тротилового эквивалента. Внешний вид протонного микроскопа ПУМА приведен на рис. 14. К сожалению, эта установка была разруше-

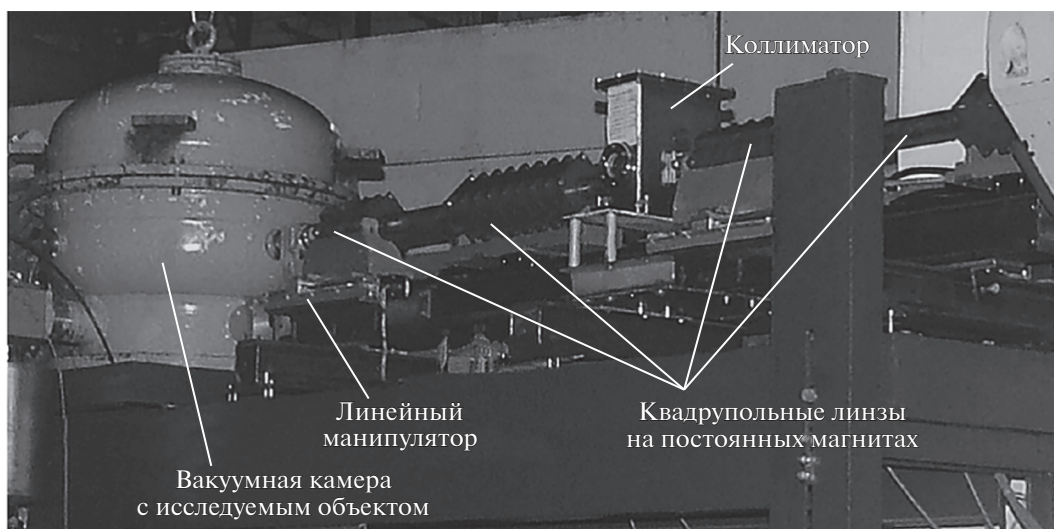


Рис. 14. Протонный микроскоп на ускорительном комплексе ТВН-ИТЭФ [67].

на в 2012 г. в результате пожара. Однако на ней удалось провести эксперименты по регистрации химического пика в ТНТ [70] и измерения плотности ударно-сжатой неидеальной плазмы аргона и ксенона [71]. Более мощный протонный микроскоп PRIOR на энергию 3.5–4.5 ГэВ был разработан и апробирован в динамических экспериментах на взрывающихся проводниках в GSI [72]. В.Е. Фортов всегда говорил о необходимости включения в состав этой установки взрывной камеры для получения важной информации о плотности ударно-сжатого вещества и ее пространственном распределении. Большое внимание он уделял разработке компактных взрывных генераторов, специально предназначенных для экспериментов с протонным микроскопом. Надеемся, что при вводе в эксплуатацию проекта FAIR в 2025 г. можно будет проводить такие эксперименты.

В начале 2000-х гг. в GSI-Дармштадт началась подготовка к созданию научного центра на базе многоцелевого ускорителя антипротонов и тяжелых ионов – проекта FAIR. Физическая программа нового международного научного центра охватывает не только физику экстремального состояния материи [73, 74], но и исследования фазового перехода ядерного вещества в кварк-глюонную плазму при высокой плотности ядерного вещества, исследования адронной физики с помощью аннигиляции антипротонов, а также ряд инновационных приложений. В.Е. Фортов вносил весомый вклад в работу Наблюдательного совета ФАИР, являясь представителем от Российской Федерации и защищая интересы российских физиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так начинались и развивались научные исследования В.Е. Фортова в Черногловке. Хотелось бы подчеркнуть, что работа в Институте проблем химической физики, даже после перехода Владимира Евгеньевича в ИВТ АН, не прекращалась, велась на протяжении всей его жизни и стала одной из генеральных линий в его судьбе. Он руководил лабораторией, а затем отделом экстремальных состояний вещества на общественных началах, был членом Ученого совета, каждую пятницу проводил семинары, даже когда был Председателем Госкомитета по науке и технологиям, Министром науки и технологий, вице-премьером, Президентом РАН. Видимо, невозможно описать весь круг задач, которые решались этим по-настоящему с большой буквы ученым. Но остались его книги, статьи, труды.

Мой последний разговор с Владимиром Евгеньевичем состоялся по телефону в начале ноября 2020 г. Он находился уже в больнице. Его волновал вопрос пленарного доклада на Всероссийской конференции по физике низкотемпературной плазмы в Казани. Уже было понятно, что он сам выступить не сможет, поэтому В.Е. поручил выступить

мне. Ему уже трудно было 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 рекордных давлений ~20 ТПа в водороде и гелии, квантовый предел вязкости в сильно взаимодействующих средах.

Проведенные в конце 1990-х гг. 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 [75]. Этот процесс “металлизации” плазмы нашел свое объяснение в рамках процесса ионизации давлением. А определение сжимаемости водорода в совместных экспериментах с ВНИИЭФ впервые позволило говорить об открытии особого фазового перехода первого рода при давлении ~140 ГПа – плазменного фазового перехода [76, 77] (рис. 15). Особый интерес В.Е. Фортов и его сотрудники проявляли к обработке последних экспериментов ВНИИЭФ по достижению рекордных давлений ~20 ТПа в плазме дейтерия и гелия и созданию новых уравнений состояния в этой экзотической области параметров [78].

В последние годы В.Е. Фортов много занимался физикой астрофизических объектов и кварк-глюонной плазмой, где особенно ярко проявляются эффекты сильного взаимодействия. В частности, анализ предельного выражения для отно-

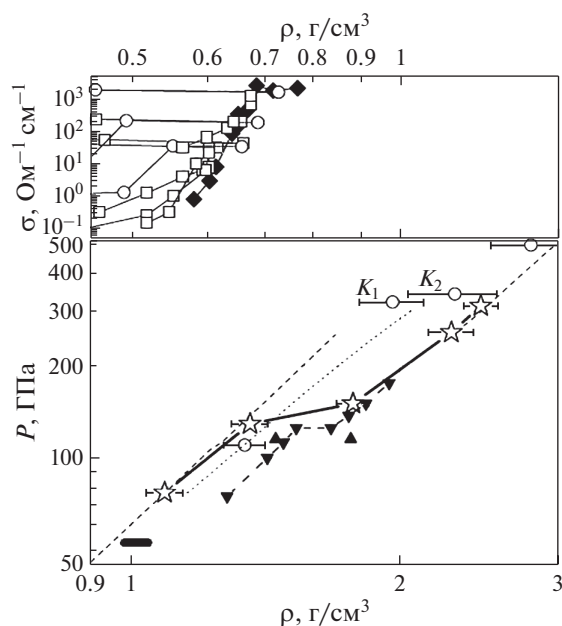


Рис. 15. Электропроводность и давление при квази-изэнтропическом сжатии дейтерия в зависимости от плотности [76].

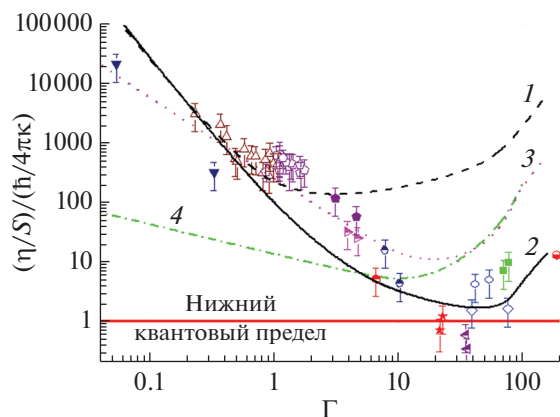


Рис. 16. Отношение сдвиговой вязкости к удельной энтропии в зависимости от параметра неидеальности [78].

шения сдвиговой вязкости к удельной энтропии, выведенного в рамках современной теории струн, показал (рис. 16), что неидеальная плазма с сильным кулоновским взаимодействием является примером такой среды, так что в этом смысле ее можно называть совершенной жидкостью [79].

Наследие, которое оставил нам В.Е. Фортов, это почти 30 книг: монографий и учебных пособий. В.Е. Фортов реализовал еще один уникальный проект – 26-томная “Энциклопедия по низкотемпературной плазме”, к реализации которого были привлечены ведущие специалисты России в этой области.

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

Настоящий обзор выполнен в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ, научным руководителем которого являлся В.Е. Фортов (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785).

В подготовке обзора автор пользовался помощью, стимулирующими дискуссиями и советами В.К. Грязнова и И.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Траектория. Владимир Фортов / Автор проекта С.В. Фортова. М.: Международный объединенный биографический центр, 2015. 256 с.
2. Фортов В.Е. Построение уравнения состояния конденсированных сред с ударными волнами. В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972. С. 561.
3. Фортов В.Е. Уравнение состояния конденсированных сред // ПМТФ. 1972. № 6. С. 156.
4. Фортов В.Е. Калорическое уравнение состояния окиси кремния и силиконовой жидкости // ФГВ. 1972. Вып. 3. С. 428.

5. Фортов В.Е., Дремин А.Н. Определение температуры ударно-сжатой меди по измерению параметров волн разгрузки // ФГВ. 1973. № 5. С. 743.
6. Фортов В.Е., Леонтьев А.А. О плавлении и испарении металлов в волне разгрузки // ПМТФ. 1974. № 3. С. 162.
7. Фортов В.Е., Дремин А.Н., Леонтьев А.А., Першин С.В. Изэнтропическое расширение ударно-сжатого свинца // Письма в ЖЭТФ. Т. 20. 1974. Вып. 1. С. 30.
8. Фортов В.Е., Дремин А.Н., Леонтьев А.А. Оценки параметров критической точки // ТВТ. 1975. Т. 13. Вып. 5. С. 1072.
9. Фортов В.Е. Гидродинамические эффекты в неидеальной плазме // ТВТ. 1972. Т. 10. № 1. С. 168.
10. Фортов В.Е., Ломакин Б.Н., Красников Ю.Г. Термодинамические свойства цезиевой плазмы // ТВТ. 1971. № 3. Т. 9. С. 869.
11. Ломакин Б.Н., Фортов В.Е. Уравнение состояния неидеальной цезиевой плазмы // ЖЭТФ. 1972. Вып. 1(7). С. 93.
12. Грязнов В.К., Иосилевский И.Л., Кузнецова Н.И., Кучеренко В.И., Лапто Г.Б., Павлов Г.А., Сон Э.Е. Теплофизические свойства рабочих сред газозонового ядерного реактора. М.: Атомиздат, 1980. 302 с.
13. Грязнов В.К., Иосилевский И.Л., Фортов В.Е. Расчет ударных адиабат аргона и ксенона // ПМТФ. 1973. Вып. 3. С. 70.
14. Фортов В.Е., Дремин А.Н., Мусьянков С.И., Якушев В.В. Об “аномальных” эффектах при выходе детонационной волны на свободную поверхность // ТВТ. 1974. Т. 12. № 5. С. 957.
15. Кириллин В.А., Альтов В.А., Шейдлин А.Е. и др. Импульсный магнетогидродинамический генератор со сверхпроводящей магнитной системой // Докл. АН СССР. 1969. Т. 185. № 2. С. 316.
16. Зельдович Я.Б., Ландау Л.Д. Корреляция между жидкими и газообразными состояниями металлов // ЖЭТФ. 1945. Т. 14. С. 32.
17. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
18. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1968. 288 с.
19. Фортов В.Е. Мощные ударные волны на Земле и в космосе. М.: Физматлит, 2019. 416 с.
20. Минцев В.Б., Фортов В.Е. Взрывные ударные трубы // ТВТ. 1982. Т. 20. № 4. С. 745.
21. Альтишюлер Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // УФН. 1965. Т. 85. № 2. С. 199.
22. Фортов В.Е., Иванов Ю.В., Дремин А.Н., Грязнов В.К., Беспалов В.Е. Взрывной генератор неидеальной плазмы // Докл. АН СССР. 1975. Т. 221. № 6. С. 1307.
23. Беспалов В.Е., Грязнов В.К., Дремин А.Н., Фортов В.Е. Динамическое сжатие неидеальной плазмы аргона // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. Вып. 6(12). С. 2059.
24. Леонтьев А.А., Дремин А.Н., Грязнов В.К. Генерация неидеальной плазмы мощными ударными волнами // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. Вып. 1. С. 225.
25. Бушман А.В., Фортов В.Е. Модели уравнения состояния вещества // УФН. 1983. Т. 140. Вып. 2. С. 177.
26. Эбелинг В., Крефт В., Кремп Д. Теория связанных состояний и ионизационного равновесия в плазме и твердом теле. М.: Мир, 1979. 263 с.
27. Беспалов В.Е., Грязнов В.К., Фортов В.Е. Излучение ударносжатой плазмы аргона высокого давления // ЖЭТФ. 1979. Т. 76. Вып. 1. С. 140.

28. Грязнов В.К., Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н., Иосилевский И.Л., Фортвов В.Е. Термодинамические свойства неидеальной плазмы аргона и ксенона // ЖЭТФ. 1980. Т. 78. Вып. 2. С. 573.
29. Иванов Ю.В., Минцев В.Б., Фортвов В.Е., Дремин А.Н. Электропроводность неидеальной плазмы // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. Вып. 1. С. 216.
30. Грязнов В.К., Иванов Ю.В., Старостин А.Н., Фортвов В.Е. Теплофизические свойства ударно-сжатого аргона и ксенона // ТВТ. 1976. № 3. С. 643.
31. Фортвов В.Е. Динамические методы в физике плазмы // УФН. 1982. Т. 138. Вып. 3. С. 361.
32. Алексеев В.А., Фортвов В.Е., Якубов И.Т. Физические свойства плазмы высокого давления // УФН. 1983. Т. 139. Вып. 2. С. 193.
33. Анисимов С.И., Прохоров А.М., Фортвов В.Е. Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях // УФН. 1984. Т. 142. Вып. 3. С. 395.
34. Фортвов В.Е., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. Черноголовка: РИСО АН СССР, 1984. 412 с.
35. Минцев В.Б., Фортвов В.Е., Грязнов В.К. Электропроводность высокотемпературной неидеальной плазмы // ЖЭТФ. 1980. Т. 79. С. 116.
36. Запорожец Ю.Б., Минцев В.Б., Фортвов В.Е. Отражение лазерного излучения от ударносжатой неидеальной плазмы // Письма в ЖТФ. 1984. № 21. С. 1321.
37. Mintsev V.B., Zaporozhets Y.B. Reflectivity of Dense Plasma // Contrib. Plasma Phys. 1989. V. 29. № 4–5. P. 493.
38. Махлайчук В.Н., Ортнер Й., Рылюк В.М., Ткаченко И.М., Минцев В.Б., Фортвов В.Е. Структурные характеристики и отражение лазерного излучения от ударно-сжатой плазмы ксенона. Препринт ИХФЧ. Черноголовка, 1991. 21 с.
39. Reinholz H., Zaporozhets Y., Mintsev V., Fortov V., Morozov I., Röpke G. Frequency-Dependent Reflectivity of Shock-compressed Xenon Plasmas // Phys. Rev. E. 2003. V. 68. 036403.
40. Zaporozhets Yu., Mintsev V., Gryaznov V., Fortov V., Reinholz H., Raitza T., Röpke G. Reflectivity of Nonideal Plasmas // J. Phys. A: Math. Gen. 2006. V. 39. P. 4329.
41. 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. 2019. V. 99. № 4. P. 043202.
42. Шилкин Н.С., Дудин С.В., Грязнов В.К., Минцев В.Б., Фортвов В.Е. Измерение электронной концентрации и проводимости частично ионизованной плазмы инертных газов // ЖЭТФ. 2003. Т. 124. Вып. 5(11). С. 1030.
43. 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., Фортвов В.Е., Щур Л.Н. Генерация термоядерных нейтронов при взрывном сжатии дейтериевой плазмы в конических мишенях // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 32. Вып. 1. С. 1.
44. 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. 1991. Т. 53. № 7. С. 338.
45. 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. 1989. Т. 96. № 4(10). С. 1301.
46. 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. 2014. V. 500. Pt. 14. P. 142026.
47. Кондратенко М.М., Лебедев Е.Ф., Фортвов В.Е. и др. Экспериментальное исследование магнитоплазменного ускорения диэлектрических ударников в рельсотроне // ТВТ. 1988. Т. 26. № 1. С. 159.
48. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Под ред. Фортвова В.Е. М.: Наука, 2002. 398 с.
49. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии / Под ред. Демидова В.А., Пляшкевича Л.Н., Селимира В.Д. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2012. 439 с.
50. Андреев В.Ф., Кареев Ю.А., Умрихин Н.М., Феоктистов Л.П., Фортвов В.Е. Условия генерации импульсного нейтронного излучения при взрывном обжатии термоядерной плазмы. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова. М., 1992. 39 с.
51. Дудин С.В., Житлухин А.М., Козлов А.В., Леонтьев А.А., Минцев В.Б., Уинурицев А.Е., Фортвов В.Е., Черковец В.Е., Шурупов А.В., Шурупова Н.П. Взрывомагнитный генератор как источник электропитания импульсного плазменного ускорителя // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1. С. 3.
52. 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 инициированием // ТВТ. 1990. Т. 28. № 5. С. 370.
53. Минцев В.Б., Уинурицев А.Е., Фортвов В.Е. Модели работы ВМГ с перехватом магнитного потока // ТВТ. 1993. Т. 31. № 3. С. 469.
54. Карпушин Ю.В., Леонтьев А.А., Минцев В.Б., Уинурицев А.Е., Фортвов В.Е. Экспериментальные исследования компактных ВМГ с перехватом магнитного потока // ТВТ. 1993. Т. 31. № 4. С. 662.
55. Диденко А.Н., Арзин А.П., Жерлицын А.Г. и др. Релятивистские триодные СВЧ-генераторы. В сб.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: Ин-т прикл. физики АН СССР, 1984. Вып. 4. С. 104.
56. Азаркевич Е.И., Диденко А.Н., Долгополов П.В., Жерлицын А.Г., Исаков В.П., Леонтьев А.А., Лопатин М.В., Минцев В.Б., Уинурицев 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. 1991. Т. 319. № 2. С. 352.
57. Азаркевич Е.И., Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Карпушин Ю.В., Леонтьев А.А., Мельников Г.В., Минцев В.Б., Уинурицев 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 // ТВТ. 1994. Т. 32. № 1. С. 127.
58. Ebeling W., Forster A., Fortov V.E., Gryaznov V.K., Polishchuk A.Y. Thermophysical Properties of Hot Dense Plasmas. Leipzig: BSB V.G. Teubner Verlags-Gesellschaft, 1990. 320 p.

59. *Фортвов В.Е., Хоффманн Д., Шарков Б.Ю.* Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества // УФН. 2008. Т. 178. № 2. С. 113.
60. *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. 2005. V. 95. 035001.
61. *Varentsov D., Ternovoi V.Ya., Kulish M.D., 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.B., Sharkov B. Yu., Shutov A., Spiller P., Tahir N.A., Wahl H.* High-energy-density Physics Experiments with Intense Heavy Ion Beams // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A. 2007. V. 577. P. 262.
62. *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 // ТВТ. 1995. Т. 33. № 6. С. 967.
63. *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. 2004. Т. 30. № 10. С. 944.
64. *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., Stoelc S., Gardes D.* On Measurements of Stopping Power in Explosively Driven Plasma Targets // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A. 1998. V. 415. P. 715.
65. *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. 1999. V. 37. P. 101.
66. *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: Math. Gen. 2006. V. 39. P. 4749.
67. *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., Худомясов 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 // ПТЭ. 2014. № 1. С. 5.
68. *King N.P.S., Ables E., Adams K. et al.* An 800-MeV Proton Radiography Facility for Dynamic Experiments // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A. 1999. V. 424. № 1. P. 84.
69. *Антипов Ю.М., Афонин А.Г., Василевский А.В., Гусев И.А., Демянчук В.И., Зятыков 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 // ПТЭ. 2010. № 3. С. 5.
70. *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., Shestov L.M., Smirnov G.N., Turtikov V.I., Sharkov B. Yu., Burtsev V.V., Zavalov N.V., Kartanov S.A., Mikhailov A.L., Rudnev A.V., Tatsenko M.V., Zheronokletov M.V.* Shockwave and Detonation Studies at ITER-TWAC Proton Radiography Facility // Shock Compr. Condens. Matter. 2011. Pts. 1–2. V. 1426.
71. *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. 2018. V. 58. № 2–3. P. 93.
72. *Varentsov D., Ionita B., Rodionova M., Shestov L., Vasylyev O., Weyrich K., Antonov O., Efimov S., Krasik Y.E., Bakhmutova A., Bogdanov A., Fertman A., Golubev A.A., Kantsyrev A., 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. 2016. V. 87. № 2. P. 023303.
73. *Фортвов В.Е., Шарков Б.Ю., Штокер Х.* Научная программа в новом международном центре фундаментальной физики – Европейском центре антипротонных и ионных исследований FAIR // УФН. 2012. Т. 182. № 6. С. 621.
74. *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. 2020. V. 27. № 4. P. 043103.
75. *Фортвов 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. 2003. Т. 124. Вып. 2. С. 288.
76. *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. 2007. V. 99. № 18. 185001.
77. *Мочалов М.А., Илькаев Р.И., Фортвов В.Е., Ерунов С.В., Аринин В.А., Блюков 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.* Квазиизэнтропическое сжатие неидеальной плазмы дейтерия и его смеси с гелием в области давлений до 250 ГПа // ЖЭТФ. 2021. Т. 159. № 6. С. 1118.
78. *Мочалов М.А., Илькаев Р.И., Фортвов В.Е., Ерунов С.В., Аринин В.А., Блюков 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., Шутков А.В.* Сжимаемость неидеальной плазмы дейтерия и гелия до 20 ТПа // ЖЭТФ. 2021. Т. 160. № 5(11). С. 735.
79. *Fortov V., Mintsev V.* Quantum Bound of the Shear Viscosity of a Strongly Coupled Plasma // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 125004.