

**КРАТКИЙ ОЧЕРК НАУЧНОЙ,
НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННОЙ,
ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ, ГОСУДАРСТВЕННОЙ
И ОБЩЕСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Академик Владимир Евгеньевич Фортов – выдающийся российский ученый-физик, внесший весомый вклад в развитие таких областей современной физической науки, как физика высоких плотностей энергии, физика неидеальной плазмы, химическая физика, теплофизика, физика и механика ударных и детонационных волн. Он автор многих фундаментальных трудов, крупный организатор науки, государственный и общественный деятель, руководитель активно работающих научных коллективов – Института теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН и Отдела экстремальных состояний вещества Института проблем химической физики РАН. Работы В.Е. Фортова известны широкому международному научному сообществу, многие из них являются пионерскими и определяют современное состояние соответствующих областей фундаментальной науки.

В.Е. Фортовым разработаны динамические методы генерации состояний вещества с экстремально высокими параметрами, создан широкий спектр генераторов ударных волн, использующих для ударного сжатия конденсированные взрывчатые вещества (КВВ), пневматические и электродинамические ускорители, мощные лазеры, электронные и ионные пучки, проведены

исследования физических свойств генерируемой ударными волнами плазмы с сильным межчастичным взаимодействием и рекордно высокой плотностью энергии, положившие начало новому научному направлению – динамической физике плазмы. Им развита общая теория построения полуэмпирических широкодиапазонных уравнений состояния (УРС) вещества, свободных от ограничивающих предположений о свойствах, характере и фазовом составе исследуемой среды, построены уравнения состояния большого числа практически важных химических элементов и соединений с учетом полиморфных фазовых превращений, плавления, испарения и ионизации. По инициативе и под руководством В.Е. Фортова предложены и разработаны новые методы преобразования химической энергии КВВ в энергию электромагнитного излучения. Проведены комплексные исследования процессов, происходящих при воздействии на материалы мощных потоков направленной энергии, разработаны научные основы противометеоритной защиты космических аппаратов, получившие свою практическую реализацию при осуществлении Международного космического проекта «Вега» и при создании ряда устройств космической техники.

Под руководством В.Е. Фортова были проведены крупномасштабные вычислительные эксперименты по моделированию уникальных космических событий – столкновения кометы Шумейкер-Леви 9 с Юпитером и ударного воздействия на комету Tempel 1, осуществленного в рамках международного проекта «Deep Impact». В последние годы В.Е. Фортов уделяет большое внимание теоретическим и экспериментальным исследованиям сильно неидеальной пылевой плазмы различного происхождения, которые проводятся как в условиях земного тяготения, так и в условиях микрогравитации.

Научная биография

В.Е. Фортов родился 23 января 1946 г. в г. Ногинске Московской области в семье военнослужащего и учительницы. Его отец, Евгений Викторович, работал главным энергетиком ЦНИИ-30 МО, а мать, Галина Ивановна, преподавала историю в средней школе. В 1962 г., окончив школу с серебряной медалью, Владимир поступил в Московский физико-технический институт на факультет аэрофизики и космических исследований.

Научной работой В.Е. Фортов начал заниматься, учась на 2-м курсе института. Исследования проводились под руководством члена-корреспондента АН СССР В.М. Иевлева в НИИ-1 (впоследствии НИИ тепловых процессов, ныне – ФГУП “Исследовательский центр им. М.В. Келдыша”).

Одной из задач, решаемых в то время в Минобщемаше, было создание мощного ядерного ракетного двигателя с плазменным ядерным реактором. Условия его ядерной критичности и общие энергобалансные соотношения приводили к очень высоким давлениям и температурам топлива и рабочего тела. В отличие от хорошо изученной к тому времени разреженной плазмы, плазма ракетного реактора оказывалась в сильно сжатом состоянии, при котором между заряженными частицами возникает сильное коллективное межчастичное взаимодействие. Проблема описания такой плотной неупорядоченной среды имела фундаментальный характер и вышла далеко за рамки конкретной задачи разработки ядерного ракетного двигателя. Вовлеченность в эту практически неизученную, но чрезвычайно перспективную область исследований, а также возможность непосредственного контакта с группой экспериментаторов, занимающихся ударным сжатием насыщенных паров металлов, во многом повлияли на формирование научных интересов и стиля работы В.Е. Фортова.

Уже на этом, начальном, этапе своей научной деятельности В.Е. Фортову удалось получить результаты, демонстрирующие его творческие способности, направленность на постановку и решение самых сложных задач современной физики. В 1968 г. им была досрочно защищена дипломная работа по исследованию термодинамических, оптических и транспортных свойств неидеальной плазмы, в которой, в частности, были намечены подходы к решению термодинамической проблемы Ферми – Зельдовича.

Окончив МФТИ с отличием, В.Е. Фортов поступил в аспирантуру этого института на кафедру физической механики. В 1971 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Теплофизика плазмы ядерных ракетных двигателей», в которой рассматривались некоторые специальные аспекты начатых им в дипломной работе исследований.

После защиты кандидатской диссертации В.Е. Фортов был распределен в Дальневосточное отделение АН СССР. Однако незадолго до предполагаемого отъезда на Симпозиуме по горению и взрыву произошла его встреча с академиком Я.Б. Зельдовичем, оказавшаяся знаковой для научной судьбы молодого ученого. Я.Б. Зельдович, прослушав доклад В.Е. Фортова, высказал ряд интересных идей в продолжение проведенных исследований. Он рекомендовал его Нобелевскому лауреату академику Н.Н. Семенову, который пригласил В.Е. Фортова на работу в Отделение Института химической физики АН СССР в г. Черноголовке (ОИХФЧ; в настоящее время – Институт проблем химической физики РАН).

В ОИХФЧ в это время интенсивно развивались работы по исследованию мощных ВВ и процессов детонации, поэтому предложенные В.Е. Фортовым исследования теплофизических свойств плотной плазмы за фронтом генерируемой взрывом ударной волны встретили большой интерес директора Отделения члена-коррес-

пондента АН СССР Ф.И. Дубовицкого и были им активно поддержаны. В лаборатории профессора А.Н. Дремина, в которой В.Е. Фортов начал работать в должности младшего научного сотрудника, ему в помощь был выделен лаборант; почти сразу же появились первые аспиранты, Ю.В. Иванов и А.А. Леонтьев, и первые студенты – В.Е. Беспалов, В.Б. Минцев и В.К. Грязнов, ставшие впоследствии ведущими сотрудниками Института.

В последующие пять лет был проведен цикл уникальных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований свойств плотной плазмы, по результатам которых в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах было опубликовано около тридцати статей. Эти результаты легли в основу докторской диссертации В.Е. Фортова «Исследования неидеальной плазмы динамическими методами», которую он успешно защитил в 1976 г. в возрасте 30 лет.

В докторской диссертации В.Е. Фортовым были разработаны методы генерации и проведено комплексное исследование физических свойств плотной вырожденной и бoльцмановской плазмы в условиях сильного межчастичного взаимодействия. Для генерации плазмы использовались два динамических метода: метод ударного сжатия, основанный на сжатии и необратимом разогреве среды во фронте мощных ударных волн, и метод изэнтропического расширения из ударно-сжатой конденсированной фазы. Первый из них позволяет создавать высокие давления и температуры в среде повышенной плотности и наиболее эффективен для получения невырожденной плазмы веществ, являющихся газами в исходном состоянии. Однако многие интересные области фазовой диаграммы, в частности кривая кипения и околокритические состояния металлов, оказались этому методу недоступны в силу термодинамических ограничений. Этого недостатка лишен метод изоэнтроп разгрузки, который

позволяет получить чрезвычайно широкий спектр состояний металлов – от сильно сжатой металлической жидкости до идеального газа, включая области вырожденной и бальцмановской неидеальной плазмы и окрестность критической точки. Удачное сочетание этих двух методов позволило измерить термодинамические, транспортные, оптические и кинетические характеристики плазмы различных элементов и соединений в широком диапазоне параметров, от сильно сжатого конденсированного вещества до идеального газа.

Для оптимальной организации эксперимента по изучению плазменных характеристик и правильной интерпретации полученных результатов была проведена большая подготовительная работа. В частности, полуэмпирическим методом были получены оценки параметров критических точек для 70 элементов, рассчитаны энерговыделения, необходимые для плавления и испарения в волне разгрузки. Были проведены комплексные исследования гидродинамических, термодинамических, электрофизических и оптических явлений, возникающих при выходе мощной детонационной волны на свободную поверхность заряда ВВ. Рассмотрены некоторые вопросы динамики и устойчивости неидеальной плазмы: явление гидродинамического взрыва в течениях низкотемпературной плазмы, устойчивость ударной волны в средах с произвольным уравнением состояния и пр. Многие из полученных в этой связи результатов имели самостоятельную ценность. Следует отметить, что до сих пор параметры критической точки экспериментально определены лишь у пяти наиболее легкокипящих металлов.

Одним из ключевых моментов диссертации было создание общей теории построения полуэмпирических широкодиапазонных УРС, позволяющих сквозным образом описывать термодинамику вещества в различных агрегатных состояниях с учетом происходящих фазовых

превращений. В.Е. Фортовым была математически сформулирована и решена поставленная Э. Ферми и Я.Б. Зельдовичем задача построения термодинамически полного УРС вещества по данным динамических экспериментов. Метод решения этой задачи, предложенный, обоснованный и реализованный В.Е. Фортовым в его ранних работах, основывался на численном интегрировании дифференциального уравнения, выражающего первое начало термодинамики, и был свободен от ограничивающих предположений о свойствах, характере и фазовом составе исследуемой среды. На основе разработанной теории и с использованием полученных в динамических экспериментах данных были построены уравнения состояния цезиевой неидеальной плазмы и ряда важных в практическом отношении конденсированных сред – вырожденная плазма металлов переходной и основной групп, ионный кристалл LiF, силиконовая жидкость и др.

Консультантом во время работы над диссертацией был академик Я.Б. Зельдович, представивший ее на пленарной сессии АН СССР; оппонентами выступили профессор Л.В. Альтшулер, чье имя занимает достойное место в ряду создателей советского атомного оружия, и академик Е.П. Велихов – всемирно известный специалист в области плазменных исследований. Уже тогда было отмечено, что комплекс проведенных В.Е. Фортовым исследований знаменует собой появление нового научного направления – динамической физики плазмы. Встреча В.Е. Фортова с этими выдающимися учеными положила начало их многолетнему творческому сотрудничеству и личной дружбе.

В 1976 г. В.Е. Фортов возглавил лабораторию физической газовой динамики ОИХФЧ АН СССР. По его предложению одним из направлений деятельности лаборатории становится изучение термомеханических, кинетических и прочностных характеристик конструкцион-

ных материалов в специфических условиях импульсного ударноволнового нагружения, поиск новых механизмов деформации и разрушения, возникающих в материале при высокой скорости приложения нагрузки и повышенном уровне напряжений. Достигнутый в этом направлении прогресс был в значительной мере связан с разработкой новых методов диагностики с высоким пространственным и временным разрешением. Были проведены измерения упругопластических и прочностных свойств широкого круга металлов и сплавов, в частности броневых и композитных конструкционных материалов, твердых полимеров и эластомеров, включая мощные ВВ, твердые ракетные топлива и их имитаторы.

Опыт и богатая информация, накопленные в процессе экспериментального изучения проблемы высокоскоростного удара, оказались востребованными в начале 80-х годов, когда большой коллектив ученых под руководством академика Р.З. Сагдеева включился в выполнение Международного космического проекта «Вега», направленной на изучение кометы Галлея.

Скорость зондов «Вега» относительно кометы и пылевых частиц ее комы, через которую они должны были пройти, составляла около 78 км/с, в связи с чем требования к противометеоритной защите зондов были чрезвычайно высокими. В.Е. Фортвов с сотрудниками взялся за решение этой сложной и принципиально важной для целей проекта задачи.

Поскольку в лабораторном эксперименте воссоздать столь высокие скорости соударения не представляется возможным, была проведена серия вычислительных экспериментов: разработана физическая модель разрушения защитных экранов космических аппаратов «Вега» под действием ударов микрометеоритов, построены полуэмпирические уравнения состояния, предложены реологические соотношения для описания свойств конструкционных материалов в мегабарном диапазоне дав-

лений при кратковременных импульсных нагрузках. Проведенные численные расчеты позволили определить размеры кратеров и сквозных отверстий в защитных экранах в зависимости от массы и плотности метеоритных частиц, вычислить размеры и скорости откольных элементов, оценить их воздействие на второй экран, рассчитать параметры плазменных струй и фазовый состав продуктов разрушения.

Во время полета аппаратов был проведен уникальный натуральный космический эксперимент по высокоскоростному удару микрометеоритов в пылезащитный экран. Для регистрации энергии и длительности световых вспышек, возникающих при воздействии высокоскоростных пылевых частиц на тонкую металлическую фольгу, определения размеров сквозных отверстий в экране и записи звуковых сигналов, сопровождающих ударное взаимодействие, на борту космического аппарата было установлено специально созданное оптико-электронное устройство «Фотон».

Успешному решению этой задачи в немалой степени способствовало активное сотрудничество В.Е. Фортова с Физическим институтом АН СССР и Институтом высоких температур АН СССР, возглавлявшимися, соответственно, академиками А.М. Прохоровым и А.Е. Шейндлиным. Проводимые в ФИАНе опыты по воздействию на мишени импульсных лазерных пучков позволили проверить расчетные модели при давлениях до 10 Мбар, характерных для реальных соударений с высокоскоростными космическими микрометеоритами. В ИВТАНе были созданы рельсотронные электродинамические ускорители с характерной массой метаемых тел до 1 г при скорости метания до 7,5 км/с. Разработанная в итоге этих исследований противометеоритная защита аппаратов «Вега» успешно выполнила свою задачу, а В.Е. Фортов за их выполнение был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

Другой пример использования результатов работ В.Е. Фортова по исследованию ударных явлений относится к задачам оборонной тематики. С середины 80-х годов прошлого века им и его группой совместно с томской школой механики проводились комплексные экспериментальные и расчетно-теоретические исследования защитных свойств различных материалов, преград и конструкций, подвергнутых проникающим ударам осколочных элементов, пуль и снарядов (включая и деструктурированные осколки космического “мусора”) в диапазоне скоростей 0,5–12 км/с. В экспериментах использовались пороховые и легкогазовые установки, динамика удара регистрировалась с помощью многократной импульсной рентгенографии, давления и скорости фиксировались методами дифференциальной лазерной интерферометрии, манганиновыми, емкостными, пьезо- и электретными датчиками.

Для корректной интерпретации полученных данных проводилось расчетное сопровождение эксперимента. Созданные для этого математические модели соударения разномасштабных конденсированных тел описывают их поведение в рамках сжимаемой сплошной среды с использованием широкодиапазонных полуэмпирических УРС и упруго-пластических моделей. Использовались эффективные численные схемы и алгоритмы, основанные на эйлеровом, лагранжевом и смешанном описании гидродинамики в двумерной и трехмерной постановках, было разработано специальное программное обеспечение для визуализации получаемых пространственных решений. В расчетах варьировались динамический предел текучести, модуль сдвига и константы кинетической модели разрушения, описывающей локальное зарождение и развитие микроповреждений. Были определены наиболее эффективные в своем классе экранированные и разнесенные конструкции для защиты от осколков, пуль и снарядов с различными массовыми и гео-

метрическими параметрами. В 1988 г. эта работа была отмечена Государственной премией СССР.

Тогда же В.Е. Фортов заинтересовался проблемой преобразования энергии взрыва в энергию электромагнитного излучения. Действительно, КВВ, обладая рекордной удельной энергоемкостью (до 10 МДж/кг), представляются весьма перспективными для создания компактных автономных источников энергии. Задача, тем не менее, оказалась чрезвычайно трудной. Характерная энергия химической связи составляет несколько электрон-вольт, а эффективное преобразование энергии частиц в электромагнитную энергию происходит в мегаэлектронвольтном диапазоне энергий. После ряда неудачных экспериментов и длительных консультаций родилась идея использовать в качестве СВЧ-излучателя достаточно простой и мощный источник – виркатор, предложенный членом-корреспондентом АН СССР А.Н. Диденко, а в качестве источника энергии – взрывомагнитные генераторы. В.Е. Фортов поручил своему ученику В.Б. Минцеву организовать эти работы в ОИХФ, где и была построена специальная установка. В 1987 г. были получены первые мультимегаваттные импульсы СВЧ-излучения от виркатора с помощью энергии взрыва. Далее интенсивно отработывались различные схемы согласования и конструкции специальных короткоимпульсных взрывомагнитных генераторов, и в 1989 г. виркатор заработал весьма эффективно. Впоследствии эти работы были продолжены с участием Е.Ф. Лебедева, В.Е. Осташева и Е.В. Нестерова. В 2000 г. эта работа была отмечена премией Правительства РФ.

В 1986 г. В.Е. Фортов перешел на работу в ИВТАН – головную организацию Отделения физико-технических проблем энергетики АН СССР, где он возглавил отдел теплофизических свойств веществ и высокоэнергетических воздействий. В 1991 г. на базе этого отдела был

организован входящий в состав Научного объединения «ИВТАН» Научно-исследовательский центр теплофизики импульсных воздействий, ставший в 1999 г. самостоятельным Институтом теплофизики экстремальных состояний – ИТЭС ОИВТ РАН. Все это время В.Е. Фортов оставался по совместительству заведующим лабораторией в ИХФЧ, которая в том же 1999 г. выросла в отдел экстремальных состояний вещества Института проблем химической физики РАН. Эти два родственных коллектива, объединенные общим руководством и работающие в тесной кооперации, к настоящему времени занимают лидирующие позиции в области физики высоких плотностей энергии и сильно неидеальной плазмы.

В ИВТАН по инициативе В.Е. Фортова широким фронтом были развернуты исследования в области высокотемпературной теплофизики, созданы крупные стенды для реализации высоких импульсных давлений и температур – взрывные камеры на массы ВВ до 1000 кг, конденсаторные батареи с током до 10 МА, взрывоманнитные генераторы мегавольтного диапазона напряжений с мощностью ~ 10 ГВт. Вместе с ударно-волновыми генераторами импульсных давлений в Институте проблем химической физики эти стенды позволили провести широкий комплекс фундаментальных и прикладных исследований свойств веществ в экстремальных состояниях. Совместно с А.В. Бушманом, И.В. Ломоносовым и К.В. Хищенко были продолжены работы по созданию широкодиапазонных УРС для практически важных веществ и материалов, – их значение В.Е. Фортов оценил еще в годы студенческой работы в НИИТП.

Действительно, теоретический анализ явлений, происходящих в быстропротекающих динамических процессах, и, тем более, их численное моделирование предъявляют высокие требования к точности описания термодинамических свойств и фазовых превращений среды во всей области изменения плотностей и удель-

ных энергий. Основная трудность проведения последовательного теоретического расчета уравнений состояния при высоких концентрациях энергии заключается в необходимости корректного учета сложного по структуре межчастичного взаимодействия. Различные теоретические модели, использующие выделение малых параметров, позволяют проводить вычисление термодинамических характеристик вещества лишь на отдельных и не на перекрывающихся участках фазовой диаграммы.

Альтернативный подход при построении уравнений состояния в широком диапазоне параметров заключается в конструировании полуэмпирических моделей, в которых общий вид функциональных зависимостей термодинамического потенциала устанавливается с привлечением теоретических представлений, а данные экспериментальных измерений используются для определения численных значений свободных коэффициентов в этих зависимостях. Подобный метод развивает идеи Л.В. Альтшулера и С.Б. Кормера, высказанные ими в процессе работы над советским атомным проектом. Он дает возможность, максимально используя имеющуюся опытную информацию, получить уравнение состояния в компактной форме, удобной для проведения численных расчетов.

В работах В.Е. Фортова и его учеников было проведено обобщение модельных термодинамических потенциалов системы твердой и жидкой фаз на область испарения и ионизации, учтены возможные физико-химические превращения вещества. К настоящему времени построены широкодиапазонные УРС для более чем 200 материалов (элементов и соединений), успешно используемых в моделировании процессов высокоскоростного соударения тел, электрического взрыва проводников мощным импульсом тока, воздействия интенсивного лазерного и рентгеновского излучения,

электронных и ионных пучков на твердотельные мишени и др.

Полученные данные сведены в электронный справочник по термодинамическим свойствам веществ при высоких плотностях энергии «Экстремтермо». Этот справочник, в равной степени обладающий характеристиками банка данных и развитого пакета прикладных программ, предназначен для решения различных задач физики высоких плотностей энергии и содержит большое количество экспериментальных данных по термодинамическим свойствам веществ, разнообразные модели среды и множество расчетных алгоритмов.

Достижения В.Е. Фортова в области теплофизики и термомеханики экстремально высоких давлений и температур были отмечены избранием его членом-корреспондентом АН СССР по Отделению физико-технических проблем энергетики (1987 г.) и по Отделению общей и технической химии (1990 г.). В 1991 г. В.Е. Фортов был избран действительным членом АН СССР.

После аварии на Чернобыльской АЭС Президиум АН СССР сформировал рабочую группу для анализа причин возникновения и последствий аварии. В нее был включен и В.Е. Фортов, который, работая в зоне аварии, участвовал в анализе взрывных явлений, динамики зоны расплава и радиоактивных выбросов. По его возвращении из Чернобыля в короткий срок была создана установка для испытания стойкости разработанных в ИВТАН жаропрочных бетонов и керамик к действию металлических расплавов, моделирующих кориум – высокотемпературную смесь расплавленных конструкционных материалов и ядерного топлива, образующихся при взрыве активной зоны реактора. Эксперименты не только показали большую эффективность этих материалов и их перспективность для изготовления ловушки расплавов активной зоны, но и инициировали аналогичные исследования в других организациях.

Не дать расплаву уйти в землю – не единственная задача при авариях на АЭС. В результате взаимодействия раскаленного циркония с водой образуется большое количество водорода и возникает опасность «водородного взрыва». «Водородный взрыв» рассматривается в качестве одной из причин разрушения контейнента АЭС. Поскольку нагрузки, действующие на стенки реактора при водородном взрыве, могут варьироваться в широком диапазоне, контейнмент проектируется с большим запасом прочности, и на его создание уходит значительная доля затрат при строительстве АЭС. Используя методы математического моделирования, ответить на вопрос о величине этих нагрузок с требуемой точностью было трудно. Был необходим физический эксперимент, причем эксперимент в большом объеме сложной геометрии, моделирующем реакторный зал АЭС. Между тем наука о горении газовых смесей и переходе горения в детонацию развивалась вокруг экспериментов в бомбах, объемом в десятки литров, и на ударных трубах до 100 мм в диаметре. Экспериментов в больших замкнутых объемах, в сотни кубических метров, с горючими газовыми смесями, близкими по составу к стехиометрическим, проводилось мало. Помимо обеспечения безопасности энергонапряженных производств, такие эксперименты были необходимы для решения некоторых фундаментальных проблем газодинамики горения, в частности проблемы ускорения сферических пламен и их перехода в детонацию. Для проведения необходимых в этой связи экспериментов в ИВТАН была доставлена сферическая взрывная камера 13Я3.

Камера 13Я3 – крупнейшее в мире и уникальное по своим параметрам сооружение, представляющее собой сферу с внутренним диаметром 12 м и толщиной стенки 100 мм. Камера весом 470 т изготовлена из броневой стали и способна выдержать взрыв до 1000 кг ТНТ.

В этой камере были проведены крупномасштабные исследования нестационарного горения водородно-воздушных смесей, взрыв которых является наиболее разрушительным и сравнительно легко возбуждаемым. При иницировании стехиометрической смеси искрой на поверхности камеры было зафиксировано давление до 190 атм, что на порядок выше давления Чепмена – Жуге во фронте плоской детонации. Дальнейшая работа была направлена на борьбу со взрывами водородно-воздушных смесей. Исследования велись совместно с Институтом структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН. В результате добавки в водородно-воздушную смесь 1,5 % ингибиторов нового поколения давление, возникающее при взрыве смеси в вершине конического элемента, снизилось в несколько раз. В настоящее время на базе этой камеры и ряда менее масштабных установок в ИТЭС ОИВТ РАН организован Московский региональный взрывной центр коллективного пользования (ЦКП) РАН.

В начале 90-х годов В.Е. Фортов совместно с профессором Л.И. Рудаковым и академиком В.П. Смирновым инициировал новое направление исследований на комплексе «Ангара-5-1», связанное с возбуждением ударных и тепловых волн в твердом теле под действием интенсивного потока мягкого рентгеновского излучения (МРИ). В отличие от подобного подхода к возбуждению УВ при конверсии лазерного излучения, при использовании МРИ область однородного облучения и толщина образцов могут быть существенно увеличены, что приближает эксперимент к натурным условиям и повышает точность измерений. В результате анализа излучательных характеристик комплекса в режиме генерации МРИ был выбран источник на основе двойного лайнера.

Под руководством В.Е. Фортова и при его творческом участии группа теоретиков и экспериментаторов ИТЭС ОИВТ РАН и ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» («ТРИНИТИ») раз-

работала диагностические средства, провела расчеты ожидаемых параметров и выполнила эксперименты. Результаты проведенных опытов дали новую интересную информацию о динамике и структуре ударных и радиационных волн в плазме различных сред. Широкое признание мировой общественностью этого цикла работ подтвердило его пионерский характер.

Существенным вкладом в теоретическое обеспечение расчетно-экспериментальных исследований на комплексе «Ангара-5-1» являются широкодиапазонные термодинамические модели, разработанные В.Е. Фортовым и его сотрудниками. Частью вычислительных программ, используемых для МГД-расчетов, стали также созданные под научным руководством ученого таблицы оптических характеристик плотной излучающей плазмы. С его участием была разработана методика учета эффектов переноса излучения при моделировании процессов взаимодействия излучения с веществом. Кроме того, он предложил ряд идей, касающихся применения электронных пучков и мягкого рентгеновского излучения для решения специальных задач. В 1997 г. эта работа была отмечена Государственной премией РФ.

Параллельно с исследованиями на комплексе «Ангара-5-1» В.Е. Фортовым была развернута работа по созданию средств защиты ракетно-космической техники (РКТ) от импульсного рентгеновского излучения, возникающего при ядерном взрыве. Ударно-волновые явления, вызванные поглощением этого излучения поверхностным слоем материала, могут приводить к таким нежелательным процессам в конструкциях РКТ, как расслоения и отколы в материалах наружного теплозащитного покрытия, корпуса и смесового энергетического материала (ЭМ), разрушение элементов конструкции, инициирование детонации или горения заряда ЭМ. Для предотвращения этих явлений необходимо было создать новые материалы, эффективно демпфирующие удар-

ную волну. Решить данную задачу можно было, преодолев ряд серьезных трудностей. Натурные эксперименты в представляющей практический интерес области параметров являются чрезвычайно дорогостоящими и к тому же должны были проводиться в условиях принятого в СССР моратория на ядерные взрывы. Имевшаяся информация о термодинамических и прочностных свойствах конструкционных материалов ракет (композитов на основе полимерных и углеродных волокон с эпоксидной смолой в качестве связующего) была крайне ограниченной и не могла обеспечить необходимую точность математического моделирования процесса взаимодействия покрытия с излучением.

Эти обстоятельства диктовали следующую схему исследований: определение диапазона параметров, в котором будут происходить испытания индивидуальных материалов, и характеристик экспериментальных стендов и установок; проведение цикла относительно простых (одномерных) экспериментов, с предельной физической ясностью восполняющих дефицит информации о свойствах материалов в ранее определенном диапазоне параметров; построение на основе полученных данных полуэмпирических уравнений состояния и разработка математических моделей процесса взаимодействия материала с излучением; моделирование поведения многослойных конструкций в численном эксперименте, воспроизводящем условия натурального эксперимента, и оптимизация характеристик покрытия. Для реализации этой схемы В.Е. Фортовым была сформирована научная группа, куда вошли сотрудники ИТЭС ОИВТ РАН, ИПХФ РАН и РНЦ «Курчатовский институт». Работа, проводившаяся в тесном сотрудничестве с ФЦДТ «Союз», НПО «Композит», ЦФТИ МО РФ, ЦНИИМАШ и ГП «МИТ», завершилась успешным решением поставленной задачи, а её результаты были использованы при конструировании стратегической ракеты «Тополь-М».

Отдельного упоминания заслуживают проведенные в рамках этой работы исследования ударно-волновых и детонационных свойств используемых в РКТ смесевых ЭМ и анализ УРС продуктов детонации. К моменту проведения этого исследования данных по кинетике взрывчатого превращения за фронтом ударной волны и УРС продуктов детонации для отечественных энергосоставов практически не было. Сложность описания процесса их разложения в ударных волнах связана с тем, что он, как известно, имеет очаговый характер и не описывается кинетикой аррениусовского типа. Создание замкнутой модели процесса с последовательным расчетом развития очагов даже в случае индивидуальных ВВ затрудняется отсутствием многочисленных реологических и теплофизических характеристик в необходимом интервале температур и давлений. По этой причине более предпочтительным является эмпирическое построение формально-кинетических зависимостей интегрального характера. Для проведения данного исследования был выбран метод, основанный на сочетании измерений эволюции импульса сжатия в топливе с математическим моделированием процесса. При этом требовалось минимальное число экспериментов. Такой подход был реализован для энергетического материала типа ОПАЛ-М, а полученные экспериментальные данные были использованы при численном моделировании процессов, происходящих при работе ракет.

За проведение данной работы В.Е. Фортов и ряд его сотрудников были отмечены премией Правительства РФ в области науки и техники за 1997 год.

Наличие крупных электрофизических установок позволило В.Е. Фортову развить исследования воздействия электромагнитных волн на электронные управляющие системы и технические исполнительные элементы. В сотрудничестве с петербургской школой полупроводниковой электроники, возглавляемой лауреатом Нобелев-

ской премии академиком Ж.И. Алферовым, а также с томской и уральской школами (руководитель – академик Г.А. Месяц) были созданы гигаваттные излучатели гармонических колебаний сантиметрового диапазона на базе виркаторов и широкополосные излучатели наносекундных импульсов электромагнитного поля, получены новые данные об устойчивости электронной техники к внешним излучениям. В 2003 году работа была отмечена премией Правительства РФ.

Параллельно с этой работой развивалось и другое актуальное для современной энергетики направление. По инициативе и под руководством В.Е. Фортова взрывомагнитные генераторы были применены при физическом моделировании ударов молнии током до 30 кА в молниеприемники региональной электрической подстанции с регистрацией подъема потенциалов на ответственных участках релейной защиты и автоматики. Полученные результаты имели несомненную ценность для обеспечения грозозащиты энергонапряженных производств и хранилищ опасных веществ.

Совместно с Г.И. Канелем и другими сотрудниками ИТЭС ОИВТ РАН и ИПХФ РАН были продолжены исследования термомеханических и прочностных свойств материалов при импульсном нагружении. Важной чертой нового этапа исследований явилось привлечение лазерных и пучковых генераторов ударных волн для исследований разрушений в наносекундном и субнаносекундном диапазонах длительностей нагрузки с использованием как собственных установок, так и возможностей, предоставляемых международным сотрудничеством. В частности, по инициативе В.Е. Фортова были организованы исследования в указанном направлении с использованием импульсного генератора протонных пучков на установке KALIF Института импульсной и микроволновой техники Исследовательского центра г. Карлсруэ, Германия.

При столь быстрых воздействиях сопротивление разрушению твердых тел становится сравнимым с предельной теоретической прочностью, определяемой потенциалом межатомного взаимодействия. В связи с тем, что при высокоскоростном ударе происходит необратимый разогрев вещества, предшествующий его разрушению, были проведены измерения прочностных свойств ряда металлов и сплавов при повышенных температурах, в некоторых случаях – вплоть до температуры плавления. Эксперименты с конструкционными металлическими материалами, а также с высокочистыми металлическими монокристаллами продемонстрировали ряд специфических особенностей высокоскоростного ($>10^4$ с⁻¹) деформирования и разрушения в ударных волнах, чрезвычайно интересных с точки зрения физики прочности и пластичности. В то время как в диапазонах обычных и умеренно высоких скоростей деформирования пределы прочности и текучести твердых тел уменьшаются с нагревом, в условиях ударно-волнового нагружения субмикросекундной длительности ряд металлов демонстрирует атермичность прочностных характеристик, а в некоторых случаях наблюдался даже их рост с нагревом вплоть до температуры плавления.

Наиболее значительные результаты исследований хрупких материалов связаны с обнаружением волн разрушения при ударном сжатии стекол. Формирование волн разрушения является одним из механизмов катастрофической потери прочности высокотвердых хрупких материалов и представляет собой пример нелокальной реакции материала на нагрузку. В результате проведенных исследований были развиты реологические модели и получены определяющие соотношения для расчета сопротивления деформированию и разрушению и кинетики накопления повреждений при пробивании и взрыве.

Продолжая тему сотрудничества с немецкими учеными, следует отметить, что в связи с появлением в

Германии в конце 80-х – начале 90-х годов крупных физических стендов и установок В.Е. Фортов инициировал проведение совместных исследований на этих установках. В частности, в рамках сотрудничества ИТЭС ОИВТ РАН, ИПХФ и ИТЭФ, возглавляемого профессором Б.Ю. Шарковым, с Обществом исследования тяжелых ионов (Gesellschaft für Schwerionenforschung, г. Дармштадт) был разработан метод диагностики взаимодействия пучков тяжелых ионов с конденсированными средами. Метод обеспечивает прямые измерения внутри объема взаимодействия пучка и твердого тела с помощью регистрации характеристического рентгеновского излучения, возникающего при возбуждении атомов пучка и мишени в области трека. Применение спектрографов со сферически изогнутыми диспергирующими кристаллическими элементами обеспечивает необходимое спектральное и пространственное разрешение.

Были проведены эксперименты по взаимодействию ионов Mg, Ag, Ca, Ni в диапазоне исходных энергий от 11.4 до 4.7 МэВ/нуклон со сплошными кварцевыми, алюминиевыми средами и кварцевыми аэрогелями различной плотности. Впервые одновременно получены данные об энергии и зарядовом состоянии ионов пучка и об отклике вещества мишени с пространственным разрешением вдоль направления проникновения ионов в среде. Использование аэрогелей позволило, с одной стороны, смоделировать конденсированную среду с экстремально низкой средней плотностью, а с другой – проанализировать характер взаимодействия ионного пучка со средой, обладающей внутренней структурой нанометровых масштабов. Результаты экспериментов послужили основой для численного моделирования кинетики излучательных процессов в наблюдаемых многозарядных ионах.

Еще в конце 80-х годов В.Е. Фортов высказал идею о существовании быстрых «детонационных» режимов

распространения фронта химических или фазовых превращений в твердых телах, когда исходные и конечные продукты находятся в конденсированной фазе. Энергия, обеспечивающая распространение фронта, может быть внутренней (химической) или внешней энергией поля. Поиск этих режимов в ряде конденсированных систем привел к интересным результатам. В частности, под руководством В.Е. Фортова группой сотрудников Научного центра волоконной оптики при ИОФ им. А.М. Прохорова РАН (академик Е.М. Дианов) и ИТЭС ОИВТ РАН (В.П. Ефремов) был зарегистрирован «быстрый» режим распространения фронта плазмы оптического разряда по волоконному кварцевому световоду со скоростью около 3 км/с при интенсивности лазерного излучения в сердцевине ≈ 40 Вт/мкм².

Значительное место в работах В.Е. Фортова, начиная с упомянутого выше участия в проекте «Вега», занимают вопросы космоса. К концу 80-х годов была накоплена большая статистика о популяции астероидов и комет в Солнечной системе и о частоте их столкновений с Землей. Была определена вероятность падения крупного космического тела на Землю, оказавшаяся достаточной, чтобы в научном мире стала обсуждаться проблема астероидной опасности. Коды, разработанные ранее для моделирования высокоскоростного удара, под руководством В.Е. Фортова были адаптированы для проблем астероидной опасности. С этой целью были проведены расчеты, моделирующие падение крупных космических тел на Землю – на поверхность суши и океана; воспроизведены процессы генерации ударных волн в земной коре и мантии, процессы кратерообразования, выбросов в атмосферу и динамики цунами; описаны распространение мощной ударной волны в воздухе по поверхности Земли, а также кумулятивные выбросы водяных паров в случае падения астероида в океан. Был поставлен цикл вычислительных экспериментов по ударному воз-

действию на астероид с целью его разрушения или изменения его траектории. Были промоделированы последовательные удары космических аппаратов, несущих ядерные заряды, по астероиду и взрыв заглубленного в тело астероида заряда.

В июле 1994 г. ученые впервые могли наблюдать столкновение кометы с планетой Солнечной системы. Комета Шумейкер-Леви 9 (SL9) столкнулась с Юпитером, предварительно разделившись на серию крупных (до 4 км в диаметре) фрагментов. Комета была открыта в марте 1993 г., и расчеты траектории ее движения определили с высокой точностью время и место падения на Юпитер. В научном сообществе мгновенно возник колоссальный интерес к предстоящему событию, позволяющему оценить правильность современных представлений об основных физических эффектах, происходящих при столь мощных энергетических воздействиях.

В РАН была принята программа работ по прогнозу физических явлений, вызванных столкновением, и подготовке к их наблюдениям на имеющейся в стране астрофизической и радиофизической базе. Выполнение этой работы, учитывая предыдущий опыт, было поручено В.Е. Фортову. Для условий столкновения были сформулированы задачи по определению сценария гибели осколков кометы в атмосфере и отклика атмосферы и магнитосферы Юпитера на сверхмощные взрывы осколков. В.Е. Фортовым была сформирована научная группа в составе В.И. Кондаурова, М.Ф. Иванова, Б.А. Клумова, А.В. Ивлева и других сотрудников ряда институтов РАН. Этой группой с помощью математического моделирования были определены: траектория движения, разрушение и взрыв осколка, распространение взрывной ударной волны в неоднородной атмосфере и всплытие термика – продуктов взрыва и увлекаемых масс атмосферы. Были получены важные данные о том, что взрыв произойдет под облачным слоем Юпите-

ра, а термик при всплытии пробьет этот слой. Всплытие термика в поле кориолисовой силы сопровождается генерацией мощного долгоживущего вихря. Данные последующих наблюдений, проведенных во многих обсерваториях мира, подтвердили эти результаты: временные зависимости блеска Юпитера соответствовали мощности излучения в системе ударных волн, генерируемых при торможении крупных осколков, и во взрывной ударной волне; размеры термика и долгоживущего вихря, а также время жизни последнего оказались близки к наблюдаемым структурам в атмосфере Юпитера. Были описаны аномалии в радиоизлучении радиационных поясов, в свечении ионосферы и верхней атмосферы в оптическом диапазоне, ИК- и радиодиапазонах, также зафиксированные в наблюдениях с Земли.

В 2005 году в рамках международного космического эксперимента «Deer Impact» было осуществлено высокоскоростное столкновение металлического ударника с ядром кометы Tempel 1. Под руководством В.Е. Фортова были выполнены обширные эксперименты по генерации мощных ударных волн и изучению физических свойств веществ при высоких давлениях и температурах, моделирующих условия эксперимента «Deer Impact». Проведенное на основе этих данных численное моделирование космического эксперимента с привлечением современной высокопроизводительной вычислительной техники позволило оценить возможные размеры кратера, образующегося в момент удара, в зависимости от начальной плотности ядра кометы, определить параметры вспышки и ее спектральный состав в различных оптических диапазонах. Результаты этих исследований позволили провести более содержательное наблюдение за процессом удара и правильным образом интерпретировать полученные данные.

В конце 90-х годов В.Е. Фортов принимает решение о создании в Институте нового научного направления, по-

лучившего название «генерация экстремального состояния вещества и его изучение с помощью мощных фемто- и пикосекундных лазерных импульсов». Фемтосекундная лазерная физика за последнее десятилетие превратилась в один из наиболее быстро развивающихся разделов современной науки, а физика сверхсильных полей и порождаемых ими экстремальных состояний вещества стала стратегически важной областью. Прогресс в этой области обусловлен созданием тераваттных (10^{12} Вт) фемтосекундных (10^{-15} с) лазерных систем. Оптические поля с интенсивностями более 10^{18} Вт/см², образующиеся при фокусировке таких лазерных импульсов, позволяют создавать состояния вещества с экстремальными свойствами. Помимо значительного влияния на развитие новых научно-технических направлений и разработки лазерных технологий, создание таких комплексов является демонстрацией национального престижа и служит свидетельством передового уровня развития оборонных технологий в стране.

Перед сотрудниками Института была поставлена задача в кратчайшие сроки создать экспериментальный комплекс с фемтосекундной тераваттной лазерной системой, разработать методы фемтосекундной диагностики экстремальных состояний вещества, развить и освоить новейшие фемтосекундные технологии. Основная трудность в решении поставленной задачи заключалась в том, что в России не производились комплектующие узлы для тераваттных систем, а закупить такое оборудование за рубежом не позволяли финансовые возможности Института.

Тем не менее В.Е. Фортову совместно с М.Б. Агранатом и рядом других сотрудников ИТЭС ОИВТ РАН удалось преодолеть все трудности на пути решения данной задачи. В 2002 году в Институте была создана уникальная фемтосекундная тераваттная лазерная система инфракрасного диапазона спектра излучения на основе ак-

тивного элемента хром-форстерит. Система изготовлена на базе российских комплектующих изделий и не имеет аналогов в России и за рубежом. В настоящее время в состав ЦКП «Лазерный фемтосекундный комплекс» входит также «технологическая» (с частотой повторения лазерных импульсов $100 \div 1000$ Гц) фемтосекундная лазерная система на хром-форстерите, изготовленная из российских комплектующих, и фемтосекундная мультитераваттная титан-сапфировая лазерная система. Комплекс оснащен современным диагностическим оборудованием и активно используется для изучения термодинамических и кинетических свойств материи в экстремальных условиях.

В.Е. Фортов играет активную, иницирующую роль в постановке задач, планировании и проведении экспериментальных и теоретических исследований. Фундаментальным исследованиям процессов в сверхсильных оптических полях посвящены его работы по экспериментальному моделированию экстремальных состояний вещества, созданию источников интенсивного рентгеновского излучения и ускоренных частиц на основе фемтосекундной лазерной плазмы, разработке методов зондирования атмосферы. Высокий контраст мощности тераваттной лазерной системы позволил экспериментально исследовать новый механизм образования сверхкороткого рентгеновского излучения при воздействии фемтосекундной лазерной плазмы на твердотельные металлические мишени. Впервые проведены измерения спектров рентгеновского излучения, возникающего при воздействии тераваттных фемтосекундных лазерных импульсов на кластеры железа. Проводятся исследования по сжатию вещества до сверхвысоких давлений (до 10–1000 Мбар) и диагностике короткоживущих экстремальных состояний вещества с помощью фемтосекундных лазерных импульсов.

Значительная часть работ в области лазерной плазмы связана с исследованиями фазовых превращений при

неравновесном нагреве электронной, спиновой и фонной подсистем поверхности металлов, ферромагнетиков, полупроводников и графита лазерными импульсами фемто- и пикосекундной длительности. Исследовалась динамика фазовых превращений первого и второго рода в тонких ферромагнитных пленках, измерены характерные времена этих процессов, предсказана возможность существования жидкого ферромагнетика. Разработан и экспериментально обоснован новый оптический метод исследований динамики кристаллической структуры сильнопоглощающих анизотропных кристаллов. Впервые получены однозначно интерпретируемые данные о том, что кристаллическая структура полупроводников и графита разрушается быстрее, чем горячие электроны передадут энергию решетке, т.е. происходит нетермическое плавление. Впервые экспериментально обнаружено явление образования периодических поверхностных структур на поверхности графита под действием сверхкоротких лазерных импульсов и предложена его новая теоретическая модель.

С помощью инфракрасных фемтосекундных лазерных импульсов впервые были проведены исследования образования и релаксации электрон-дырочной плазмы и сверхбыстрых фазовых превращений в широкозонных полупроводниках (Si и GaAs), прозрачных для данного излучения, и разработана технология объемной обработки этих материалов. Разработана технология резки и профилирования прозрачных диэлектриков с нанометрической точностью фемтосекундными лазерными импульсами.

Общепризнанными являются результаты теоретических исследований ученых ИТЭС ОИВТ РАН по разработке новых концепций лазерно-плазменных ускорителей ультрарелятивистских электронов. При активной поддержке В.Е. Фортова и при его неослабевающем внимании к этой работе Н.Е. Андреевым с сотрудниками

ми впервые построена теория, позволившая изучить вклад ионизационных эффектов в генерацию сверхсильных кильватерных плазменных полей интенсивным ультракоротким лазерным импульсом. Изучены механизмы каналированного распространения ультракоротких лазерных импульсов в плазменных каналах и в капиллярах и разработаны новые методы оптической диагностики нелинейного лазерно-плазменного взаимодействия, что открывает возможности для повышения эффективности рентгеновских лазеров и плазменных ускорителей, создаваемых на основе воздействия интенсивных лазерных импульсов на вещество. Предложены и исследованы новые схемы инжекции и формирования субфемтосекундных моноэнергетических сгустков ультрарелятивистских электронов с рекордными темпами ускорения ~ 10 ГэВ/м для физики высоких энергий и диагностики сверхбыстрых процессов. Разрабатываются новые методы генерации терагерцового излучения с помощью мощных фемтосекундных лазерных импульсов.

Еще в начале работы В.Е. Фортова в области физики неидеальной плазмы интенсивно обсуждался вопрос: что будет происходить с веществом по мере его сжатия? Если произойдет металлизация вещества, будет ли это фазовым переходом? А если будет, то какого рода? Как это проявится на фазовой диаграмме вещества? Как поведут себя ударные адиабаты и изэнтропы разгрузки? Эта проблема всегда интересовала В.Е. Фортова, поэтому, когда техника динамического эксперимента достигла соответствующего уровня, он с энтузиазмом занялся ею.

В группе В.Я. Тернового в ИПХФ РАН уже в 1996 г. была разработана взрывная методика многоступенчатого сжатия водорода до мегабарных давлений, которая потом была использована для экспериментов с инертными газами и смесью водорода с гелием в условиях имитирующих атмосферу Юпитера. В сотрудничестве с академиком Ю.А. Осипьяном в группе В.И. Постнова

были проведены эксперименты по «металлизации» фуллеренов. Были получены интересные данные о появлении в этих средах в мегабарном диапазоне давлений при определенных критических плотностях высокого уровня электропроводности, близкого к металлическому, что свидетельствует о реализации механизма «ионизации давлением».

Группой Р.Ф. Трунина совместно с ВНИИЭФ были проведены экспериментальные измерения ударной сжимаемости конденсированного дейтерия в самых мощных взрывных системах – полусферических, а в лабораториях М.В. Жерноклетова и М.А. Мочалова – эксперименты по ударной сжимаемости предварительно сжатого газообразного дейтерия, а также по квазиизэнтропическому сжатию дейтерия и инертных газов в цилиндрической и сферической геометрии. Полученные данные свидетельствуют о возможности плазменного фазового перехода в дейтерии при мегабарном давлении.

Не менее интересны исследования возможности проявления при ударном сжатии вещества обратного эффекта – «диэлектризации». Такие эксперименты были поставлены в группе В.В. Якушева в ИПХФ РАН, где и были впервые получены экспериментальные доказательства «диэлектризации» лития в ударных волнах. Аналогичные проявления были обнаружены в других металлах при более высоких давлениях, и связываются они перестройкой структуры металлов при сжатии, где при определенных условиях оказывается “выгодной” диэлектрическая структура.

Подходы, разработанные В.Е. Фортовым в области физики неидеальной плазмы, находят применение и в таких задачах, как физика глубинных областей Солнца. Построенное им и его коллегами В.К. Грязновым и И.Л. Иосилевским уравнение состояния солнечной плазмы достигает точности порядка одной десятой процента, и это для плазмы, содержащей более 90 различных сор-

тов частиц. Кроме того, анализ, проведенный в последних работах этой группы ученых, имеет целью выяснить причины и этой почти неощутимой погрешности, а также выяснить глубинные причины поведения термодинамических параметров, определяющих солнечную эволюцию.

Эксперименты с ударным сжатием неидеальной плазмы, выполненные В.Е. Фортовым и его соратниками еще в начале 70-х, продемонстрировали ряд аномальных эффектов, над пониманием которых долго бились теоретики. Термодинамическая модель, построенная на основе квантовомеханических расчетов электронной структуры атомов и ионов, позволила найти ключ к решению этой задачи. Оказалось, что в неидеальной плазме давление искажает энергетический спектр атомов и ионов, а это, в свою очередь, приводит к столь необычному поведению плазмы при ее сжатии интенсивными ударными волнами.

Еще во время работы над докторской диссертацией В.Е. Фортов заинтересовался проблемой устойчивости ударных волн (УВ) в средах с произвольными термодинамическими свойствами. Проблема имела принципиальное значение для правильного прогноза результатов ударного сжатия. В середине 80-х годов В.Е. Фортовым вместе с А.Л. Ни и С.Г. Сугаком был выполнен квазиодномерный анализ этой проблемы для УВ, перемещающейся в длинном канале со слабо изменяющимся сечением. Кроме того, в этой работе было предложено модельное уравнение состояния, позволяющее построить ударные адиабаты со всеми предсказанными линейной теорией видами неустойчивости УВ, и предпринята первая попытка численного моделирования этой неустойчивости. Этот результат вошел в курс теоретической физики Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица.

По инициативе В.Е. Фортова эта работа была продолжена сотрудниками ИТЭС ОИВТ РАН А.П. Лихачевым и А.В. Конюховым в сотрудничестве с А.М. Опари-

ным (ИАП РАН) и членом-корреспондентом РАН С.И. Анисимовым (ИТФ РАН). Исследования показали, что при выполнении критериев развития абсолютной неустойчивости УВ исходная ударная волна распадается с образованием волновой конфигурации, вид которой полностью определяется принадлежностью УВ тому или иному участку ударной адиабаты. Рассмотрена проблема акустической неустойчивости УВ в реальных газах. Выявлены ограничения, которым должны отвечать уравнения состояния Ван дер Ваальса и Дитеричи для выполнения критерия акустической неустойчивости УВ, проведен анализ влияния различных факторов неидеальности на возможность развития акустической неустойчивости. Показано, что ударные волны, образовавшиеся после распада исходной УВ, могут быть акустически неустойчивыми, обнаружена тенденция к затуханию акустической неустойчивости УВ под влиянием вязких эффектов.

Одним из новых объектов внимания В.Е. Фортова является ультрахолодная сильнонеидеальная ридберговская плазма, экспериментально полученная лишь в 1999 году. Температура ионов в момент образования этой плазмы составляет 1 мК, а температура электронов варьируется от 1 до 100 К. Совместно с Б.В. Зеленом, Э.А. Манькиным, В.С. Филиновым и др. им была предложена модель для описания термодинамики и корреляционных функций такой плазмы. Методом Монте-Карло получены значения для энергии, давления и парных корреляционных функций в области температур 0,1–10 К и концентраций заряженных частиц 10^2 – 10^{16} см⁻³. В области сильной неидеальности обнаружено возникновение многочастичных кластеров, а также пространственная упорядоченность в расположении электронов и ионов плазмы.

Следует отметить, что квантовый метод Монте-Карло и метод молекулярной динамики активно использу-

ются в осуществляемом сотрудниками ИТЭС ОИВТ РАН вычислительном эксперименте. В частности, по инициативе В.Е. Фортова В.С. Филиновым и П.Р. Левашовым проводится работа по численному исследованию равновесных и переносных свойств сильно взаимодействующих квантовых систем частиц и плотной плазмы. Для решения поставленной задачи были разработаны новые модификации квантового метода Монте-Карло, использующие фейнмановскую формулировку квантовой механики; в вигнеровской формулировке квантовой механики проведено квантовое обобщение классического метода молекулярной динамики. Развитый подход позволил проверить границы применимости существующих аналитических теорий, в основном основанных на методах теории возмущений. Удалось предсказать новые физические явления в сильно взаимодействующих кулоновских системах. Например, в водородной и гелиевой плазме смоделирован фазовый переход из атомарного состояния в металлическое, причем этот переход был недавно подтвержден в ударно-волновых экспериментах. Аналогичный фазовый переход для экситонов был получен в электрон-дырочной плазме; обнаружено хорошее согласие с экспериментальной фазовой диаграммой германия. При определенных плотностях и температурах обнаружено возникновение упорядоченных антиферромагнитных дырочных структур в плотной электрон-дырочной плазме в условиях, когда обменное взаимодействие дырок становится ведущим.

Еще одна область научных интересов В.Е. Фортова – исследование термодинамических свойств и фазовых превращений новых углеродных материалов. Так, под его руководством В.В. Милявским впервые было осуществлено прямое твердотельное фазовое превращение графит–карбин, выполнено измерение ударной сжимаемости и скорости звука в ударно-сжатом фуллерене C_{60} в диапазоне давлений до 0.5 Мбар.

В последнее десятилетие резко возрос интерес к пылевой плазме. В такой плазме удается получить рекордно высокие величины зарядов (до 10^5 – 10^6 зарядов электрона) пылевых частиц. Тем самым обеспечивается чрезвычайно высокая интенсивность межчастичного взаимодействия, при которой происходит кулоновское «замерзание» плазмы. ИТЭС ОИВТ РАН оказался среди пионеров в этом новом направлении физики плазмы. По инициативе и под руководством В.Е. Фортова был проведен цикл взаимосвязанных экспериментальных работ, имеющих приоритетный характер, по изучению плазменных кристаллов и жидкостей в пылевой плазме. Опыты выполнялись как в лабораторных условиях, так и в условиях микрогравитации на борту орбитального комплекса «Мир» и Международной космической станции, в широком диапазоне температур и давлений: в плазме тлеющего разряда постоянного тока и высокочастотного разряда низкого давления при комнатных и криогенных температурах (при температурах 4–77 К), в ядерно-возбуждаемой плазме и плазме, индуцированной ультрафиолетовым излучением, в пучковой плазме, в термической плазме при атмосферном давлении. Подавляющее число этих экспериментов выполнено впервые в мире. Благодаря инициативе В.Е. Фортова в совместные с ИТЭС ОИВТ РАН исследования пылевой плазмы был вовлечен ряд крупнейших российских исследовательских центров: ГНЦ РФ «Физико-энергетический институт» (г. Обнинск), Российский научный центр «Курчатовский институт», ГНЦ РФ «ТРИНИТИ».

Хронология основных результатов исследований пылевой плазмы в ИТЭС ОИВТ РАН такова.

В 1995 г. в экспериментах с термической плазмой впервые наблюдались макроскопические упорядоченные (жидкостные) структуры для положительно заря-

женных частиц микронных размеров при атмосферном давлении и температуре около 1700 К. Хорошо развитая диагностика плазмы и сравнительно большой ее объем позволили провести измерения газа и частиц различными методами, а также получить данные о параметрах плазмы, характеризующих ее состояние, и провести сопоставление с результатами численного моделирования.

В 1996 г. впервые были получены уже кристаллические структуры макрочастиц в положительном столбе тлеющего разряда постоянного тока. Анализ изображений частиц показал, что они образуют такую структуру в горизонтальной плоскости, в то же время выстраиваясь в цепочки в вертикальной плоскости. Варьированием параметров плазмы можно было изменить форму облака частиц в вертикальной плоскости от эллиптической до цилиндрической, с характерными размерами структур в несколько сантиметров. В пылевой плазме тлеющего разряда постоянного тока впервые были получены нелинейные самовозбуждающиеся волны (1998 г.). Позже (в 2003 г.), также впервые, было обнаружено возникновение одиночной нелинейной волны плотности пылевой компоненты (солитона) при газодинамическом воздействии на упорядоченную структуру.

В 1998 г. была впервые экспериментально показана возможность левитации макрочастиц и формирования из них упорядоченных структур в плазме высокочастотного разряда индукционного типа. Экспериментально и теоретически были изучены пыле-акустическая неустойчивость в плазме индукционного газового разряда, пространственное распределение пылевых частиц по размерам в плазме индукционного газового разряда и временная эволюция этого распределения.

Начиная с 1997 г. ИТЭС ОИВТ РАН совместно с ГНЦ РФ «Физико-энергетический институт» ведет интенсив-

ные исследования плазмы, индуцированной радиоактивным излучением, и пылевой плазмы, генерируемой протонным пучком, а совместно с ГНЦ РФ «ТРИНИТИ» (А.Н. Старостин) – осуществляются эксперименты с пылевой плазмой при воздействии электронного пучка и ультрафиолетового излучения. В этих экспериментах впервые были получены упорядоченные структуры макрочастиц в ядерно-возбуждаемой пылевой плазме, проведены экспериментальные и теоретические исследования физических механизмов левитации макрочастиц и формирования из них упорядоченных структур в такой плазме.

В другой совместной работе ИТЭС ОИВТ РАН и ГНЦ РФ «Физико-энергетический институт» экспериментально исследовано поведение пылевых частиц в трековой плазме, создаваемой пучком ускоренных протонов. Результаты этих исследований впервые позволили обнаружить новые эффекты, связанные с коллективными явлениями в плазменно-пылевых структурах. Экспериментальные исследования образования пылевых структур в плазме инертных газов, образованной пучком ускоренных протонов, проводились на ускорителе КГ-2.5 ГНЦ РФ «ФЭИ», дающем пучок протонов с энергией до 2 МэВ и током до 3 мкА.

Частицы могут приобретать положительный заряд и образовывать упорядоченные структуры при облучении интенсивным ультрафиолетовым излучением. В условиях микрогравитации эксперименты с пылевой плазмой, индуцированной ультрафиолетовым излучением, открывают область изучения естественного образования плазменных кристаллов в космосе, так как одним из механизмов зарядки пылевых частиц в условиях космического пространства при наличии интенсивных потоков ультрафиолетового излучения является фотоэмиссия. В условиях микрогравитации может образовываться трехмерный кристалл, не деформированный силой тя-

жести. Такие исследования способствуют пониманию механизма взаимодействия макрочастиц, включая возможность их притяжения, и выяснению условий существования плазменного кристалла со свободными границами.

Все это послужило основанием для постановки космического эксперимента «Плазменный кристалл» на российском орбитальном комплексе «Мир», в рамках которого предполагалось изучить образование упорядоченных плазменно-пылевых структур при фотоэмиссионной зарядке частиц солнечным излучением. В 1998 году на борту комплекса «Мир» по инициативе В.Е. Фортова ИТЭС ОИТВ РАН совместно с РКК «Энергия» были поставлены первые эксперименты по изучению плазменно-пылевых структур в условиях микрогравитации с использованием установок «Плазменный кристалл-1» и «Плазменный кристалл-2». Было обнаружено, что в условиях эксперимента при воздействии интенсивного солнечного излучения исследуемые частицы (бронзы) заряжались путем фотоэмиссии и приобретали положительные заряды порядка 10^4 элементарных зарядов. Экспериментальные данные также позволили сделать вывод о формировании частицами в условиях микрогравитации жидкостных структур. В эксперименте «Плазменный кристалл-2» были также изучены динамика макрочастиц и образование упорядоченных структур в тлеющем разряде постоянного тока в условиях микрогравитации.

В начале 1998 г. было принято решение о проведении совместного российско-германского эксперимента «Плазменный кристалл-3» («ПК-Нефедов») на борту Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), в соответствии с Программой научных исследований Росавиакосмоса. Этот эксперимент является также показательным примером эффективно-го международного сотрудничества. Научными руково-

дителями эксперимента «Плазменный кристалл-3» стали академик В.Е. Фортвов и профессор Г. Морфилл, директор Института внеземной физики Общества имени Макса Планка (Германия). Постановка и подготовка эксперимента осуществлялась ИТЭС ОИВТ РАН с участием Института внеземной физики и РКК «Энергия». Эксперимент финансировался Германским космическим агентством (DLR) и Министерством промышленности, науки и технологий Российской Федерации. Подготовка космонавтов к работе с экспериментальным оборудованием осуществлялась постановщиками эксперимента при участии Центра подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина. В 2001 г. на базе ИТЭС ОИВТ РАН и Института внеземной физики был организован Международный научно-исследовательский центр по физике низкотемпературной плазмы, содиректором которого стал В.Е. Фортвов.

Эксперимент «Плазменный кристалл-3» выполнялся космонавтами в соответствии с программой работ, корректируемой Центром управления полетами в ходе радиоконтактов ученых и космонавтов. В этом эксперименте впервые наблюдалось формирование протяженных трехмерных упорядоченных структур, впервые обнаружено возникновение самопроизвольных низкочастотных колебаний пылевой компоненты, появление областей с конвективным движением заряженных макрочастиц («плазменно-пылевые вихри»), получены новые данные о поведении плазменно-пылевых структур из заряженных частиц различного размера (сепарация частиц, пограничные зоны и др.), впервые наблюдалось формирование нелинейных волн плотности пылевой компоненты при внешнем воздействии, получены новые данные о зарядке и коагуляции пылевых частиц.

С конца 90-х годов ИТЭС ОИВТ РАН совместно с МФТИ осуществляет исследования воздействия элект-

тронного пучка на плазменно-пылевые структуры из частиц различных материалов в высокочастотном разряде низкого давления. В результате этих исследований были выполнены экспериментальные исследования по воздействию электронного пучка с энергией 25 кэВ и током 1–20 мА на пылевые частицы и на плазменно-пылевые структуры из микронных частиц различных материалов в высокочастотном разряде. С помощью электронного пучка можно было управлять пылевой структурой, сдвигать ее или разрушать. Непосредственное воздействие электронного пучка на пылевые частицы в плазме сопровождается увеличением их заряда, происходит передача импульса электронами пучка при столкновении, что приводит к динамическому сдвигу и разрушению пылевой структуры.

В 2000–2004 гг. в пионерских работах, поставленных в ИТЭС ОИВТ РАН, впервые экспериментально проведен структурный и динамический анализ плазменно-пылевых образований в тлеющем разряде постоянного тока при температурах жидкого азота (77 К) и жидкого гелия (4.2 К). Рассчитаны парные корреляционные функции пылевых структур, температуры и коэффициенты диффузии микрочастиц. Впервые обнаружено развитие плазменно-пылевой неустойчивости (нелинейных автоколебаний) в плазменно-пылевой структуре при температуре 77 К. При температуре 4.2 К впервые обнаружены плазменно-пылевые протяженные структуры со свободной поверхностью, движущиеся в плазменном столбе.

Из приоритетных достижений ИТЭС ОИВТ РАН последних лет можно выделить экспериментальное исследование трехчастичной корреляции для макрочастиц в пылевой плазме, выполненное впервые, а также восстановление потенциала взаимодействия между пылевыми частицами в плазме по форме измеренных парных корреляционных функций методами, основанными на ги-

перцепном приближении и уравнениях Перкуса – Йеви-ка с использованием решения уравнения Орнштейна – Цернике для различных параметров экранированного кулоновского потенциала. В последние годы в ИТЭС ОИВТ РАН также начаты экспериментальные исследования и получены первые результаты для процессов теплопереноса и вязких свойств плазменно-пылевых жидкостных структур.

Таким образом, в последнее десятилетие изучение свойств пылевой плазмы приобрело особый размах после экспериментального обнаружения плазменно-пылевых кристаллов. Благодаря своим уникальным свойствам пылевая плазма успешно используется для решения как фундаментальных, так и прикладных задач. Простота визуализации позволяет производить измерения пылевой компоненты на «кинетическом уровне», при этом возможен детальный анализ структурных и кинетических свойств дислокаций и других дефектов пылевой кристаллической решетки, имеющей много общего с обычной кристаллической решеткой твердых тел. Большой интерес вызывает изучение легко возбуждаемых линейных и нелинейных низкочастотных колебаний и их неустойчивостей. Изучение фазовых переходов в системах симметричных и асимметричных пылевых частиц дает полезную информацию о критических явлениях и процессах самоорганизации, в частности о возможности естественного образования плазменно-пылевых упорядоченных структур во Вселенной. Проведены первые космические эксперименты в условиях микрогравитации на станциях «Мир» и МКС, где получен ряд важных, иногда неожиданных результатов.

Среди прикладных задач одной из основных является проблема удаления пылевых частиц при производстве компьютерных микросхем методами плазменных технологий, для решения которой необходимо глубокое пони-

мание физических процессов в газоразрядной пылевой плазме. Кроме того, уникальная возможность удержания и контроля физико-химических свойств пылевых частиц делает плазму прекрасной средой для создания порошков с заданными свойствами и их модификации. Недавно было предложено преобразование ядерной энергии в электрическую осуществлять за счет фото-вольтаического эффекта в широкозонных полупроводниках на основе алмаза и нитрида бора. Создание таких источников тока стало возможным, в первую очередь, в результате исследований по физике ядерно-возбуждаемой пылевой плазмы.

В настоящее время пылевая плазма является одной из наиболее интенсивно развивающихся областей физики (в последние годы на эту тему публикуется по нескольку статей в день), а возглавляемый В.Е. Фортовым коллектив ее исследователей является признанным мировым лидером этого перспективного направления.

В целом по результатам своей научной деятельности В.Е. Фортовым опубликовано около 20 монографий и более 400 оригинальных статей в ведущих зарубежных и отечественных журналах. Выдающийся вклад академика В.Е. Фортова в развитие фундаментальной и прикладной науки высоко оценен как на государственном, так и на мировом уровне. Он лауреат Государственной премии СССР, Государственной премии РФ, трех премий Правительства РФ в области науки и техники, награжден орденом Трудового Красного Знамени, орденами «За заслуги перед Отечеством» IV и III степеней, многими медалями СССР и Российской Федерации. В.Е. Фортов является лауреатом международных премий имени А.П. Карпинского, П. Бриджмена, М. Планка, Х. Альфвена и Дж. Дюваля. Он награжден Международной золотой медалью имени А. Эйнштейна, избран членом многих иностранных и международных академий и университетов.

Государственная, научно-организационная, педагогическая и общественная деятельность

Напряженную и разностороннюю научную деятельность В.Е. Фортов сочетает с большой государственной и научно-организационной работой, которую он выполняет с присущим ему динамизмом, ярко выраженной активной позицией и бескомпромиссностью.

В разные годы В.Е. Фортов занимал посты председателя Российского фонда фундаментальных исследований, заместителя председателя Правительства РФ – председателя Государственного комитета по науке, научно-технической политике и технологиям РФ, министра науки и технологий РФ, вице-президента РАН, являлся членом Совета по науке и высоким технологиям при Президенте РФ.

Выдвижение В.Е. Фортова на ответственные академические и государственные должности пришлось на трудные, драматические для российской науки годы, когда последовавшие за развалом СССР события практически разрушили систему финансирования фундаментальной науки, вызвали «утечку умов» за границу, отток талантливой молодежи в другие, более престижные и оплачиваемые отрасли. На всех своих постах В.Е. Фортов делал все возможное для спасения российской науки, и во многом благодаря его усилиям этот негативный процесс был приостановлен. Под его руководством Российский фонд фундаментальных исследований превратился в настоящий конкурсный фонд – первое российское учреждение, в котором родилась новая для отечественной науки форма независимой экспертизы.

Находясь на посту вице-премьера, В.Е. Фортов доказал, что даже в безнадежной ситуации он умеет биться за «деньги для науки». До сих пор не превзойден «пик Фортова» – рекордный за последние полтора десятилетия объем годового финансирования науки государст-

вом. Несмотря на все трудности переходного времени, ему удалось реализовать несколько крупномасштабных проектов, касающихся науки в целом. В частности, по инициативе В.Е. Фортова и под его руководством был создан Межведомственный суперкомпьютерный центр с ЭВМ МВС 1000М производительностью 1 триллион операций в секунду, занимавший в то время по этому показателю третье место в мире.

В настоящее время В.Е. Фортов является академиком-секретарем Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, членом Президиума РАН и Пленума ВАК РФ, председателем ряда межведомственных координационных советов, советов РАН по научным проблемам, диссертационного совета по специальностям «физика плазмы» и «теплофизика и теоретическая теплотехника», главным редактором журнала «Теплофизика высоких температур» и членом редколлегий ряда международных и отечественных научных изданий. Он ведет большую педагогическую работу, заведя кафедрой физики высокотемпературных процессов МФТИ и являясь профессором кафедры физики высоких плотностей энергии того же института. В.Е. Фортов – руководитель крупной научной школы, среди его учеников – 11 докторов и более 30 кандидатов наук, он является заслуженным работником образования РФ.

Присущие В.Е. Фортову уникальная работоспособность, творческая активность, умение организовывать и вести за собой научные коллективы, наверное, были бы невозможны, если бы он с таким же азартом не занимался спортом: академик – мастер спорта по баскетболу и парусному спорту, недавно обошел на яхте мыс Горн и мыс Доброй Надежды.

Академик Г.А. Месяц