

Кондратьев Арсений Михайлович

**Экспериментальное исследование свойств жидких металлов и
углерода при высоких температурах и давлениях**

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
«Объединенный институт высоких температур Российской академии наук».

Научный руководитель:	Рахель Анатолий Дмитриевич , кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук»
Официальные оппоненты: (предполагаемые)	Оппонент 1 Оппонент 2
Ведущая организация: (предполагаемая)	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской Академии Наук»

Защита состоится ____ на заседании диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур, по адресу 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур:

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан (Дата)

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) кандидат физико-математических наук А.В.Тимофеев

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2025

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию теплофизических свойств свинца, свинцово-висмутowego эвтектического сплава (СВЭС) в жидком и сверхкритическом состояниях, а также изучению свойств квазимонокристаллического графита и жидкого углерода.

Свинец используется в качестве жидкометаллического теплоносителя в перспективном отечественном реакторе БРЕСТ-ОД-300, являющемся частью проекта «Прорыв», цель которого - реализация концепции замкнутого ядерного топливного цикла. Несмотря на то, что при нормальной работе реактора давление жидкометаллического теплоносителя не превышает нескольких бар, а температура нескольких сотен градусов, в аварийных режимах работы или при тяжелых авариях локально эти величины могут возрастать многократно. Для оценки поведения реактора в таких условиях могут понадобиться данные по теплофизическим свойствам свинца в жидком и сверхкритическом состояниях. По тем же причинам могут потребоваться высокотемпературные свойства СВЭС, так как он применяется в качестве теплоносителя в разрабатываемом в настоящее время модульном реакторе СВБР-100.

Графит, благодаря высокой температуре плавления, является широко распространенным высокотемпературным конструкционным материалом. Он используется, в частности, для строительства ядерных реакторов и сверхзвуковых самолетов. Поскольку при определенных условиях графит плавится, для оценки механической и термической устойчивости конструкций из графита необходимы данные о теплофизических свойствах графита вплоть до температуры плавления, а также в жидком состоянии. Эти данные могут потребоваться также для оптимизации таких процессов, как рост алмаза из графита, получение аморфного углерода и лазерная обработка графита. Знание теплофизических свойств жидкого углерода необходимо для построения фазовой диаграммы углерода, что имеет решающее значение для понимания различных физических явлений в геофизике и астрономии. Кроме того, свойства квазимонокристаллического графита могут быть востребованы для изучения и производства такого перспективного материала, как графен.

Степень разработанности темы исследования.

В литературе практически отсутствуют экспериментальные данные по теплофизическим свойствам свинца в жидком состоянии при давлении, отличающемся от атмосферного, и при температурах выше 1000 К. Свойства жидкого свинца в наиболее широкой области состояний (диапазон температур 1600–6000 К, давлений 0.1–0.4 ГПа) были изучены с помощью динамической методики изобарного расширения в Ливерморской [10], и Лос-Аламосской [31] национальных

лабораториях. Максимальная величина относительного объема V/V_0 (V_0 – удельный объем свинца при нормальных условиях), для которой в этих работах получены данные, не превышает 4. Максимальные температуры, при которых проводились исследования свинца стационарными методами [14,15], не превышают 1800 К, при этом плотность жидкого свинца уменьшается на величину порядка 20% по сравнению с плотностью при нормальных условиях, а давление равно давлению насыщенных паров при соответствующей температуре. Данных по свойствам СВЭС в жидком состоянии в указанной области состояний еще меньше. В частности, нет работ, в которых СВЭС изучалась бы с помощью динамических методов, а данные, полученные стационарными методами [14-18], получены для температур менее 2000 К.

В литературе имеется достаточно много экспериментальных работ, в которых измерялась (или оценивалась) температура плавления графита [32], но до сих пор отсутствуют данные прямых измерений скачков плотности и удельного электросопротивления при плавлении графита, а также отсутствуют работы, в которых плотность и удельное электросопротивление были бы измерены для жидкого углерода.

Цели работы.

- Получение экспериментальных данных по теплофизическим свойствам жидкого свинца, СВЭС в жидком состоянии, а также графита и жидкого углерода в области состояний, которая до настоящего времени не исследовалась и на плоскости плотность-давление соответствует относительно широкому интервалу давлений (0,3 – 5 ГПа) и значений удельного объема (от нормального значения и до значений в 5-20 раз больших).

- Получение экспериментальных данных по теплофизическим свойствам графита и жидкого углерода в окрестности линии плавления при давлениях 0,5 – 2 ГПа.

- Оценка систематической погрешности измерений при высоких давлениях и больших значениях удельного объема, для которых литературные экспериментальные данные отсутствуют.

Основные положения, выносимые на защиту.

- Измеренные зависимости удельной энтальпии и удельного электросопротивления свинца от давления и относительного объема для интервала давлений 0,2 – 4,5 ГПа и интервала значений относительного объема $V/V_0 = 1 – 18$ (V_0 – удельный объем свинца при нормальных условиях).

- Измеренные зависимости удельной энтальпии и удельного электросопротивления СВЭС в жидком состоянии от давления и относительного объема для интервала давлений 0,2 – 5 ГПа и интервала значений относительного объема $V/V_0 = 1 - 8$.

- По измеренным зависимостям удельного электросопротивления свинца и СВЭС от относительного объема и энтальпии определено значение относительного объема, при котором изохорический температурный коэффициент сопротивления меняет знак. Для свинца это значение оказалось близким к значению 2,7, а для СВЭС – вблизи 2,4.

- Методика измерения скорости слабых ударных волн в жидких металлах пониженной плотности в экспериментах со взрывающимися фольгами.

- Величины скачков плотности, энтальпии и удельного электросопротивления при плавлении графита для диапазона давлений 0,5 – 1,5 ГПа.

- Температурные зависимости энтальпии, плотности, и удельного электросопротивления графита и жидкого углерода при давлениях 0,4 – 3 ГПа для интервала значений относительного объема $V/V_0 = 1 - 2,5$.

Научная новизна.

- Получены уникальные экспериментальные данные по теплофизическим свойствам свинца при давлениях 0,2 – 4,5 ГПа и значениях относительного объема $V/V_0 = 1 - 18$ (V_0 – объем при нормальных условиях), для СВЭС в жидком состоянии при давлениях 0,2 – 5 ГПа и значениях относительного объема $V/V_0 = 1 - 8$, а также для графита и жидкого углерода при давлениях 0,4 – 3 ГПа и значениях относительного объема $V/V_0 = 1 - 2,5$.

- Впервые, путем прямых измерений определены скачки плотности, энтальпии и удельного электросопротивления при плавлении графита в интервале давлений 0,5 – 1,5 ГПа в условиях полного контроля за состоянием образца.

- Впервые, измерены скорости распространения слабых ударных волн в жидком свинце при давлениях 0,2 – 3,5 ГПа в интервале относительных объемов $V/V_0 = 1,2 - 7$, который охватывает как область металлических состояний, так и неметаллических ($V/V_0 > 4$).

Достоверность результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается оценками погрешностей полученных экспериментальных данных и сравнением этих данных с литературными в той области

состояний, где такие данные имеются. Для оценки достоверности полученных результатов в области, где литературные данные отсутствуют, специально была разработана оригинальная экспериментальная методика по измерению скорости слабых ударных волн в исследуемом материале, которая позволила достоверно оценить систематическую погрешность измерений в этой области состояний.

Практическое значение.

Экспериментальные данные, полученные в настоящей работе для свинца и СВЭС могут быть использованы для верификации результатов, полученных путем компьютерного моделирования. Также они могут стать основой для теоретического описания свойств металлов в сверхкритической области состояний, построения теории неидеальной плазмы и выяснения механизма перехода металл-неметалл. Кроме того, полученные данные могут быть использованы в некоторых областях промышленности, где используются эти вещества, в частности, в атомной энергетике.

Результаты измерений теплофизических свойств графита и жидкого углерода также могут найти применение. В атомной промышленности они актуальны, поскольку графит применяется в качестве конструкционного материала. В аэрокосмической сфере эти данные полезны при создании сверхзвуковых летательных аппаратов, где углерод используется для производства сопел. Кроме того, полученные результаты могут способствовать оптимизации технологических процессов, таких как синтез алмаза из графита, производство аморфного углерода и лазерная обработка.

Методология и методы исследования.

В работе применяется разработанная ранее в нашей лаборатории методика взрывающихся фольг, подробное описание которой дается в Главе 1. Для реализации этой методики автором была создана отдельная экспериментальная электроимпульсная установка для изучения свойств металлов и графита при давлениях 0,2 – 5 ГПа и плотностях в интервале 1,0 – 0,1 от нормального значения, которая позволяет проводить измерения полного набора термодинамических величин, необходимых для построения калорического и термического уравнений состояния исследуемого материала.

Автором проведено более ста экспериментов со свинцом, СВЭС и графитом. Для контроля разброса экспериментальных данных проводилось как минимум по два эксперимента с одинаковыми параметрами.

Поскольку практически для всей области состояний, исследованной в настоящей работе (для указанных веществ), литературные экспериментальные данные отсутствуют, то невозможно было

достоверно оценить систематическую погрешность настоящих измерений, т. к. эта погрешность оценивается только путем сравнения с результатами измерений другим методом. Для решения этой задачи автором была создана оригинальная экспериментальная методика по измерению скорости слабых ударных волн в исследуемом материале в интересующей нас области состояний и были проведены измерения скорости ударных волн для жидкого свинца пониженной плотности. Также на базе имевшегося в лаборатории интерферометра был создан двухканальный интерферометр, позволивший оценить степень однородности теплового расширения образцов в этих экспериментах. Полученные в результате экспериментальные данные позволили оценить систематическую погрешность измерений при высоких давлениях и относительно низкой плотности образца.

Апробация работы.

Основные результаты по теме диссертации докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях:

I Всероссийская школа для студентов и молодых учёных по газодинамике и физике взрыва (Саров, Россия, 2023 г.), Scientific–Coordination Workshop on Non-Ideal Plasma Physics (Moscow, Russia, 2022), XXXVII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, 2022), Теплофизика реакторов нового поколения (Обнинск, Россия, 2022), XXXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, 2021), Scientific-Coordination Session on Non-Ideal Plasma Physics (Moscow, Russia, 2020), XXXV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, 2020), Теплофизика реакторов нового поколения (Обнинск, Россия, 2020), XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, 2019), Joint Meeting of High Energy Density Science at FAIR Collaboration and 10th International Workshop on Plasma Physics with Intense Laser and Heavy Ion Beams (Moscow, Russia, 2018), Научно-координационная Сессия "Исследования неидеальной плазмы" (Москва, Россия, 2018), XV Российская конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (Москва, Россия 2018)

Соответствие паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (отрасль науки – физико-математические) по п.1 «Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах».

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в семи статьях в научных журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора.

Диссертация написана автором лично. Положения, выносимые на защиту, сформулированы лично автором. Экспериментальная установка создана лично автором. Экспериментальные результаты получены лично автором. Публикация полученных результатов производилась совместно с соавторами, при этом диссертант принимал непосредственное участие в обсуждении и интерпретации полученных результатов.

Объем и структура работы.

Объем диссертации составляет 107 страниц, содержит 46 рисунков и 5 таблиц и включает в себя 106 ссылок на литературные источники. Диссертационная работа состоит из пяти глав.

Содержание работы.

В первой главе проведен обзор экспериментальных методик, применяемых для изучения свойств металлов и графита при высоких давлениях и температурах. Также в этой главе проведен обзор основных работ, в которых были получены экспериментальные данные по свойствам свинца, свинцово-висмутовой эвтектики, графита и жидкого углерода при высоких давлениях и температурах.

Во второй главе подробно рассмотрены основы методики взрывающихся фольг, которая используется в настоящей работе, и дается краткое описание этапов развития этой методики. Подробно рассматривается конструкция и принцип работы экспериментальной установки «У-2», созданной автором для решения задач, поставленных в настоящей работе, а также приводится описание процесса изготовления образцов. Также рассмотрена конструкция двухканального лазерного интерферометра, использование которого позволило убедиться в однородности расширения образцов в экспериментах, результаты которых представлены в настоящей работе. Приводится расчет погрешностей основных измеряемых величин.

Нашей научной группой был разработан экспериментальный метод с помощью которого может быть исследована широкая область состояний на фазовой диаграмме веществ, которая недоступна для других экспериментальных методик, и которая на плоскости P - V (P – давление, V –

удельный объем) заключена в диапазоне давлений $P = 0,2 - 10$ ГПа и диапазоне значений удельного объема $V = (1 - 20)V_0$, где V_0 есть удельный объем материала образца при нормальных условиях. Метод основан на нагреве образца, помещенного между двумя толстыми пластинами оконного материала импульсом электрического тока плотностью $\sim 10^7$ А/см² и временем нарастания порядка 1 мкс. Исходный образец для такого эксперимента — это прямоугольный отрезок фольги, пленки или тонкая пластинка из материала с относительно высокой электропроводностью, который может быть нагрет импульсом электрического тока. Таким материалом может быть металл, графит, а также некоторые карбиды и нитриды металлов. Образец имеет длину около 10 мм, ширину 5–10 мм и толщину в диапазоне 10 – 40 мкм и вклеивается между двумя плоскими полированными пластинами оконного материала. Мы используем два вида оконного материала: монокристаллы сапфира и пластины кварцевого стекла. Длина и ширина таких пластин оконного материала (блоков) составляет по 10 мм, а толщина варьируется в пределах 2 – 10 мм. На Рис. 1 представлена фотография такой экспериментальной сборки. Термин «оконный материал» является общепринятым и обозначает оптически прозрачный материал с известными механическими и оптическими свойствами, знание которых необходимо для использования интерферометрических методов диагностики [1].

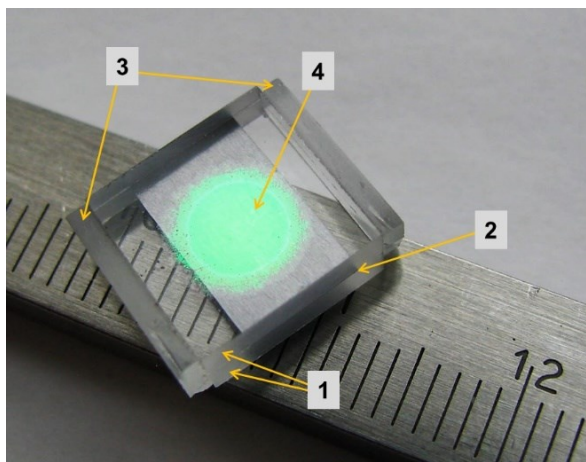


Рис. 1. Фотография экспериментальной сборки, состоящей из двух пластин кварцевого стекла толщиной 2 мм (5) и помещенного между ними образца свинца в форме отрезка фольги толщиной 19 мкм и шириной 6 мм (6), 4 — диэлектрическое зеркало, нанесенное на внутреннюю поверхность верхней пластины, 3 — боковые пластины из технического стекла приклеены для упрочнения сборки. Сборка лежит на штангенциркуле, расстояние между штрихами - 1 мм.

В процессе протекания по образцу импульса тока в нем выделяется джоулево тепло, за счет чего образец нагревается и испытывает тепловое расширение. В результате нагреваемый образец начинает оказывать давление на пластины оконного материала, между которыми он заключен, что приводит к возникновению в исследуемом образце динамического давления. Фактически величина этого давления определяется инерцией оконного материала и тем больше, чем больше его акустический импеданс, т.е. произведение плотности оконного материала на величину продольной скорости звука. В [2,3] было показано, что при указанных выше геометрических размерах образца, пластин оконного материала, и при мощности джоулевого нагрева 0,1 – 0,5 ГВт можно осуществить достаточно однородный нагрев и практически одномерное тепловое расширение образца вплоть до 20 кратного увеличения его толщины. В результате такой нагрев представляет собой

квазистатический процесс, при котором образец переходит из нормального состояния в состояния с высокой температурой и давлением.

В каждом эксперименте регистрируются временные зависимости тока, протекающего через образец $I(t)$, падения напряжения на образце $U(t)$ и смещения поверхности образца $X(t)$. Кроме того, перед экспериментом измеряется масса образца m , а также его размеры (длина l , ширина w и толщина h_0), а, следовательно, оказывается известен и начальный удельный объем V_0 . При этом длина и ширина образца из-за одномерности теплового расширения, за время проведения измерений практически не изменяются, и при обработке результатов измерений считаются постоянными. Постоянной также остается и масса образца. Измеренные величины позволяют рассчитать удельное джоулево тепло $q(t)$ рассеянное в образце $q(t) = \frac{1}{m} \int_0^t I(t) U_R(t) dt$. Здесь $U_R(t) = U(t) - L_S \frac{dI(t)}{dt}$, где $U_R(t)$ – активное падение напряжение на образце, а L_S – индуктивность контура, образованного образцом и делителем напряжения, с помощью которого измеряется падение напряжения $U(t)$. Метод определения индуктивности L_S подробно рассмотрен в работе [4]. Также, непосредственно из измеренной зависимости $X(t)$ определяются толщина образца $h(t) = h_0 + 2X(t)$, объем образца $V(t) = V_0 + lwh(t)/m$ и его плотность $\rho(t) = \rho_0 \frac{V(t)}{V_0}$, где ρ_0 – плотность материала образца при нормальных условиях. В формуле для $h(t)$ множитель 2 отражает тот факт, что зависимость $X(t)$ относится к смещению только одной поверхности образца. Давление в образце $P(t)$ определяется по измеренной зависимости $X(t)$ и уравнению состояния материала пластин. Полученные величины позволяют определить удельную работу $A(t)$, которую совершает образец против сил внешнего давления, и далее можно определить удельную внутреннюю энергию $e(t)$ и удельную энтальпию $i(t)$ образца. Также полученный набор данных позволяет определить сопротивление образца $R(t)$ и удельное сопротивление исследуемого материала $\sigma^{-1}(t)$ ($\sigma(t)$ – электропроводность).

Исключая в полученном наборе данных время как параметр, получим зависимости удельной внутренней энергии, энтальпии и удельного сопротивления от давления и удельного объема $e(P, V)$, $i(P, V)$, $\sigma^{-1}(P, V)$ вдоль определенной линии на плоскости P - V . Эта линия представляет собой процесс квазистатического нагрева образца в отдельно взятом эксперименте. Проведя достаточно большое количество экспериментов с отличающимися начальными параметрами (а, следовательно, с отличающимися путями нагрева на плоскости P - V) получим семейство зависимостей $e(P, V)$, $i(P, V)$, $\sigma^{-1}(P, V)$ для исследуемого вещества в некоторой области состояний на плоскости P - V . Это дает возможность определять для этой области зависимости термодинамических и теплофизических величин на изохорах, изобарах и изэнтропах, и определять их частные производные. Таким образом могут быть определены, например, скорость звука, коэффициент Грюнайзена и коэффициент теплового расширения.

Для реализации методики автором была сконструирована и построена экспериментальная электроимпульсная установка «У-2». Эта установка предназначена для генерации импульса тока через исследуемый образец, и измерения в процессе нагрева образца величин, на основе которых определяются термодинамические и теплофизические свойства исследуемого материала. Схема установки представлена на Рис. 2. Принцип ее работы заключается в следующем. Готовый образец монтируется в установку и производятся все необходимые настройки. Конденсатор C (КПИМ-35-10 производства ООО "Русская Технологическая Группа 2") заряжается до напряжения 6 – 30 кВ, после чего через исследуемый образец, подключенный последовательно к конденсатору, формируется импульс тока путем апериодического разряда конденсатора C . Разряд осуществляется с помощью тиратрона T (ТДИ4-100к/45П производства ООО «Импульсные технологии»), замыкающего разрядную цепь. Балластное сопротивление R равно 0,4 Ом, и представляет собой три одинаковых самодельных малоиндуктивных резистора из нихромовой ленты, соединенных параллельно. Индуктивность L есть эффективное значение для всей цепи, и равно 140 нГн. Временная зависимость тока $I(t)$, протекающего по образцу, регистрируется с помощью трансформатора тока TT (Stangenes Inc., модель СТЗ–0.01/R), падение напряжения на образце $U(t)$ регистрируется с помощью резистивного делителя напряжения $ДН$, созданного в нашей лаборатории автором настоящей работы специально для использования на установке «У-2». Сигналы с трансформатора тока и делителя напряжения, а также с фотоприемника, регистрирующего сигнал интерферометра $X(t)$, записываются на цифровые осциллографы.

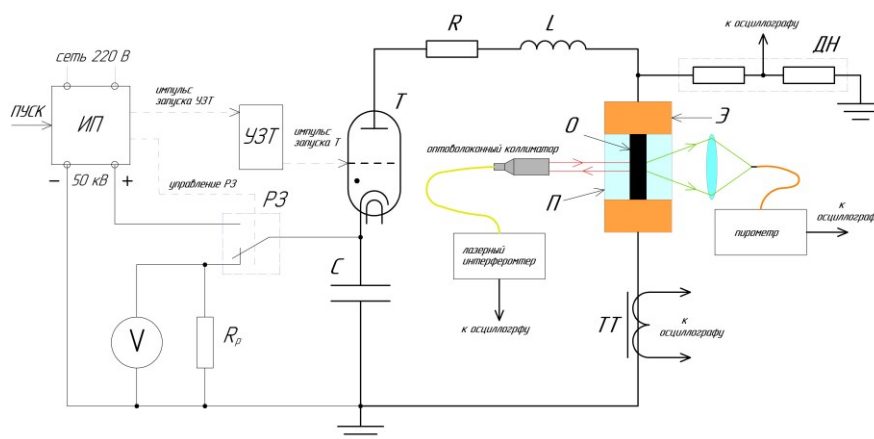


Рис. 2. Принципиальная схема электроимпульсной установки «У-2». T – тиратрон, R – балластное сопротивление, L – индуктивность разрядной цепи, O – образец, $Э$ – латунные электроды, $П$ – пластины оконного материала, TT – трансформатор тока, $ДН$ – делитель напряжения, $ИП$ – высоковольтный источник питания, $УЗТ$ – блок управления тиратроном, $PЗ$ – реле заряда, V – высоковольтный электростатический вольтметр, R_p – резистор разряда.

Важным элементом экспериментальной установки является волоконный лазерный интерферометр, с помощью которого измеряется смещение поверхности образца $X(t)$ в процессе нагрева. Интерферометр был создан в нашей лаборатории к.ф.-м.н. В.Н. Коробенко и был значительно модернизирован автором настоящей работы. В результате модернизации был получен двухканальный интерферометр, работающий по схеме интерферометра Майкельсона. В основе интерферометра лежит оптоволоконный одномодовый лазер Koheras Basik производства фирмы NKT Photonics с длиной волны 1550 нм и шириной полосы 40 кГц. В каждом из каналов опорный луч формируется отражением от неподвижного оптоволоконного зеркала, а объектный луч формируется отражением лазерного луча от движущегося диэлектрического зеркала, нанесенного на поверхность пластины оконного материала, контактирующую с поверхностью расширяющегося образца. Интерференция этих лучей наблюдается на фотоприемниках (модель OD-007BFC производства ООО «Авеста-Проект»), сигнал с которых записывается на цифровой осциллограф Rohde&Schwarz RTM2104 с полосой пропускания 1 ГГц. Двухканальный интерферометр позволяет наблюдать за расширением образца в двух точках (двух пятнах с размером, равным диаметру луча интерферометра $\sim 0,3$ мм) на его поверхности, которые могут быть выбраны произвольным образом. На Рис. 3 представлен результат таких измерений для одного из экспериментов со свинцом. Один из каналов интерферометра был наведен на центр масс образца, а другой на образец со смещением 2,5 мм от центра (перпендикулярно направлению протекания тока). Из Рис. 3 видно, что оба интерферометра дают совпадающие результаты вплоть до величины смещения поверхности образца около 140 мкм. С учетом того, что начальная толщина образца в этом эксперименте была 15,6 мкм, а также что поверхность образца, противоположная той, на которую наведены интерферометры, движется симметрично, можно убедиться, что образец расширяется однородно вплоть до практически двадцатикратного увеличения объема. При этом энтальпия образца достигает величины 7 кДж/г, что приблизительно в семь раз превосходит теплоту сублимации свинца.

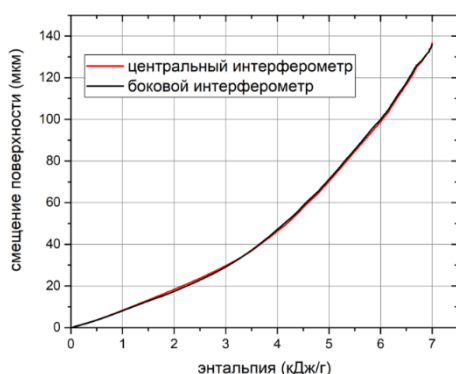


Рис. 3. Зависимости смещения поверхности образца от энтальпии для одного из экспериментов со свинцом, полученные с помощью двухканального интерферометра.

Оценка погрешностей измеряемых в наших экспериментах величин производилась в соответствии с Руководством по выражению неопределенности измерений [5] по методу Б. В результате было получено, что относительные суммарные неопределенности измерения тока и падения напряжения равны 2%, давления 4 – 6 %, плотности не более 1%, энтальпии 3 – 6 %.

В третьей главе представлены результаты измерений для изучения свойств жидкого свинца в широкой области состояний. Представлена методика измерения скорости слабых ударных волн в металлах пониженной плотности в экспериментах со взрывающимися фольгами, разработанная в рамках настоящей работы, и приведены результаты, полученные с помощью этой методики для свинца.

С помощью методики, рассмотренной в Главе 2 были проведены измерения термодинамических функций и удельного сопротивления жидкого свинца. Полученные результаты опубликованы в трех статьях [6-8]. Всего было проведено 65 экспериментов, большая часть которых была проведена автором. На Рис. 4 показана область состояний на плоскости P - V для которой были проведены измерения термодинамических функций и удельного сопротивления жидкого свинца. На рисунке показана критическая точка перехода жидкость-газ, которая была определена с помощью уравнения состояния (УрС), построенного на основе полученных экспериментальных данных по методике [9].

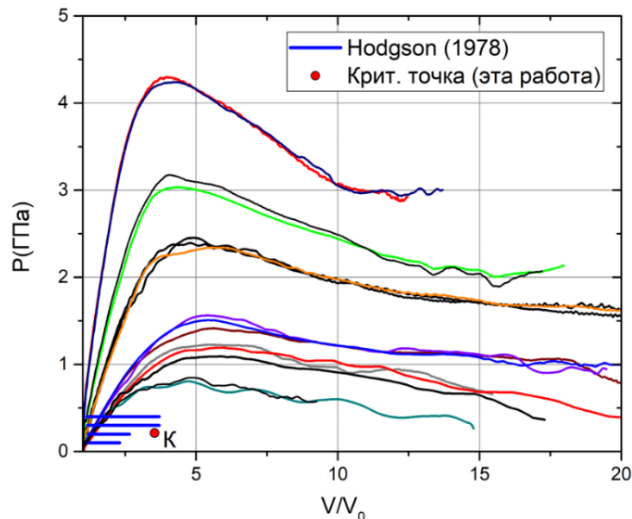


Рис. 4. Область состояний на плоскости P - V/V_0 , для которой были проведены измерения термодинамических функций и удельного сопротивления свинца. Линии, которые выходят из нормального состояния – квазистатические процессы нагрева образцов, реализованные в экспериментах этой работы, К – критическая точка, которая была определена с помощью калорического УрС, построенного согласно методике [9]. Синие линии – данные [10]

На Рис. 5 показаны зависимости плотности от энтальпии для экспериментов этой работы. Видно хорошее согласие с имеющимися литературными данными.

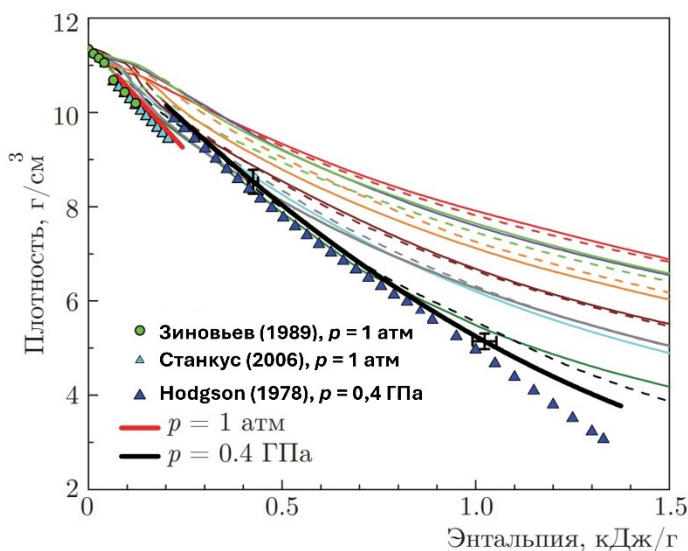


Рис. 5. Семейство зависимостей плотности свинца от удельной энтальпии, полученных в [6] (тонкие линии), а также зависимости на двух изобарах $p = 1$ атм, $p = 0.4$ ГПа (жирные линии), которые определены из настоящих данных, в сравнении со справочными данными [11] (зеленые кружки), данными статических экспериментов [12] (голубые треугольники) и результатами динамических экспериментов [10] (синие треугольники).

На Рис. 6 показаны зависимости удельного электросопротивления свинца от относительного объема для некоторых экспериментов этой работы. Видно, что все представленные зависимости пересекаются в одной точке при значении относительного объема $V/V_0 \approx 2,7$. Если рассмотреть изохоры при относительном объеме $V/V_0 < 2,7$, то окажется, что чем выше давление, тем выше удельное сопротивление для соответствующего эксперимента. При относительном объеме $V/V_0 > 2,7$ эта ситуация меняется на противоположную. Изохорический температурный коэффициент сопротивления (ТКС) определяется как

$$\eta = \left(\frac{\partial \sigma^{-1}}{\partial T} \right)_V = \left(\frac{\partial \sigma^{-1}}{\partial P} \right)_V \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$$

где температурный коэффициент давления $(\partial P / \partial T)_V$, как показывают наши результаты по значениям коэффициента Грюнайзена, положителен. Отсюда следует, что при увеличении объема ТКС меняет знак с положительного на отрицательный при определенном значении относительного объема, причем это значение в пределах точности эксперимента не зависит от температуры и давления.

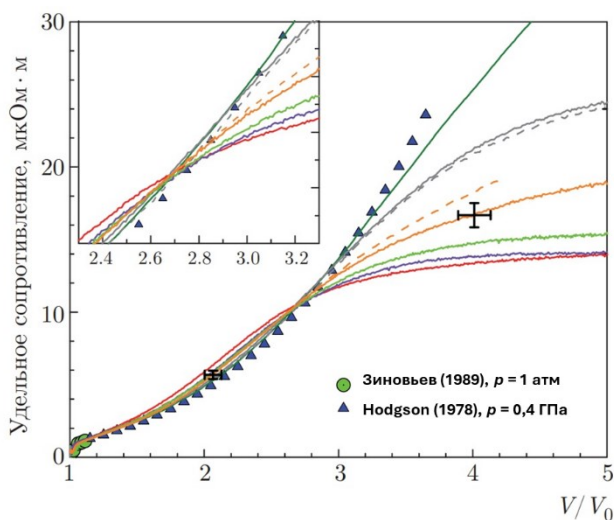


Рис. 6. Удельное сопротивление флюида свинца как функция приведенного объема: линии — зависимости, полученные в экспериментах этой работы, синие треугольники — данные [10], зеленые кружки — справочные данные [11], два черных крестика — наши погрешности.

Для широкой области состояний на плоскости P - V , в которой нами были получены экспериментальные данные [6,8], и которая соответствует диапазону значений относительного объема $V/V_0 = 1,3$ – 20 и диапазону давлений $P = 0,5$ – $4,5$ ГПа, отсутствуют другие экспериментальные данные. Это затрудняет проведение надежной (независимой) оценки систематической погрешности наших измерений, которая осуществляется сравнением с данными, полученными другими методами. Для решения этой задачи был разработан метод генерации и прямого измерения скорости распространения слабых ударных волн (с числами Маха в интервале $1,1$ – $1,5$), в наших экспериментах. Также с помощью УрС [9], построенного по полученным в наших экспериментах данным для синца, строились ударные адиабаты в интересующей нас области состояний. Точность такого УрС, как показано в [9] определяется только точностью экспериментальных данных, поэтому сравнение значений скорости ударных волн, непосредственно измеренных в эксперименте со значениями, рассчитанными с помощью УрС, позволило оценить систематическую погрешность наших измерений.

Метод генерации и прямого измерения скорости распространения слабых ударных волн [7] заключается в следующем (Рис. 7). В процессе нагрева образца в определенный момент времени t_1 (регистрируемый интерферометром IF), когда образец F находился в интересующем нас термодинамическом состоянии на плоскости P - V , одна из его поверхностей, которую мы будем называть передней, облучалась коротким лазерным импульсом, который создавал хорошо выраженное возмущение давления (слабую ударную волну). Это возмущение распространялось по толщине образца, и момент его прихода на тыльную поверхность t_2 регистрировался вторым интерферометром (интерферометр IB на Рис. 7). Скорость распространения возмущений давления в образце определялась по формуле

$$D = \frac{h_1 + h_2}{2(t_2 - t_1)}$$

где h_1 и h_2 – толщина образца в моменты времени t_1 и t_2 соответственно. Для создания возмущения использовался импульсный лазер New Wave Research (модель Orion) с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса около 7 нс и энергией около 29 мДж. Давление за фронтом такой ударной волны измерялось с помощью тыльного интерферометра IB.

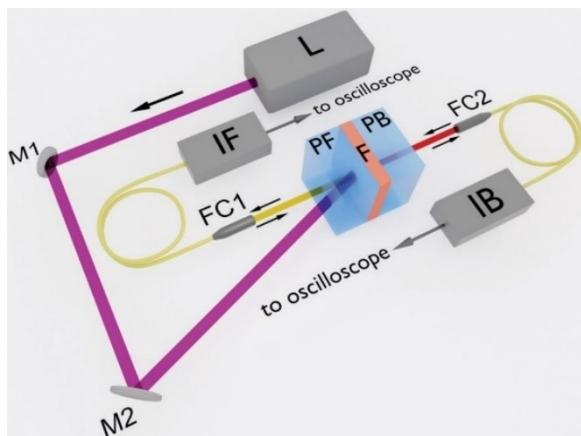


Рис. 7. Схема измерения скорости распространения ударной волны в динамическом эксперименте со взрывающимися фольгами. F – образец (отрезок фольги), PF и PB – передняя и задняя пластины оконного материала, L – импульсный лазер, IF и IB – передний и задний интерферометры, M1 и M2 – диэлектрические зеркала, FC1 и FC2 – волоконные коллиматоры.

Было проведено 20 экспериментов со свинцом, в которых проводились такие измерения. Для каждого эксперимента с помощью УРС [9] строилась ударная адиабата, выходящая из состояния, в котором проводилось измерение скорости ударной волны. В Таблице 1 представлены полученные результаты. Как видно из этой таблицы, для подавляющего большинства экспериментов разница между измеренными значениями скорости распространения ударных волн в свинце и рассчитанными по УРС значениями не превышает 10 %, а средняя величина абсолютного значения этой разницы составляет 6,5%. Если учесть, что наши экспериментальные погрешности не превышают 6% для большей части исследованной области состояний, указывает на то, что в пределах наших погрешностей измеренные значения скорости ударных волн согласуются со значениями, полученными с помощью УРС. Это, в свою очередь, указывает на отсутствие в наших экспериментах [6,8] неучтенных систематических ошибок.

Таблица 1. Сравнение измеренных значений скорости распространения ударных волн D_{exp} с рассчитанными с помощью УРС значениями D_{eos} , P_1 и P_2 – значения давления перед ударной волной и за ней соответственно, V_0/V_1 – относительная плотность свинца в исходном состоянии, h_0 – начальная толщина фольги (образца), δD – модуль относительной разности между измеренным и рассчитанным значением скорости ударной волны.

Exp. No.	V_0/V_1	P_1 GPa	P_2 GPa	$t_2 - t_1$ ns	h_0 mm	D_{exp} km/s	D_{eos} km/s	δD %
21	0.546	0.5	1.2	46	29.7	1.18	1.11	5.9
24	0.364	1.6	2.0	87	36.6	1.16	1.12	3.4
25	0.474	1.1	1.6	68	37.2	1.15	1.12	2.6
32	0.375	1.4	1.7	118	38.0	0.86	0.98	15.3
35	0.617	0.4	1.2	28	19.8	1.15	1.21	5.2
36	0.813	0.2	1.5	24	31.9	1.63	1.7	4.3
37	0.714	0.2	1.5	30	31.1	1.45	1.41	2.8
41	0.441	1.5	2.5	59	31.9	1.23	1.19	3.3
42	0.791	0.1	1.0	25	29.4	1.49	1.53	2.7
44	0.452	0.5	1.1	65	29.7	1.01	0.99	2.0
53	0.431	0.6	1.4	64	29.3	1.06	1.04	1.9
54	0.256	3.4	4.0	38	14.2	1.46	1.62	11.0
57	0.145	2.2	3.0	65	15.3	1.62	1.65	1.9
58	0.317	2.3	3.3	34	15.3	1.42	1.41	0.7
59	0.306	0.8	2.0	27	9.8	1.19	1.10	7.6
60	0.158	1.8	2.6	35	9.0	1.63	1.49	8.6
64	0.271	3.4	5.0	34	14.7	1.6	1.77	10.6
65	0.356	3.2	4.6	26	13.5	1.46	1.65	13.0
66	0.637	1.7	2.8	17	14.0	1.29	1.5	16.3
67	0.427	3.3	5.0	22	14.5	1.54	1.69	9.7

В четвертой главе представлены результаты измерения свойств СВЭС в широкой области состояний.

Всего было проведено 24 эксперимента с образцами из СВЭС [13]. На Рис. 8 показана область состояний на плоскости P - V , для которой были проведены измерения термодинамических функций и удельного сопротивления СВЭС (показана часть экспериментов). На Рис. 8 для демонстрации разброса измеренных значений давления и относительного объема показаны зависимости, полученные для трех пар экспериментов с идентичными параметрами.

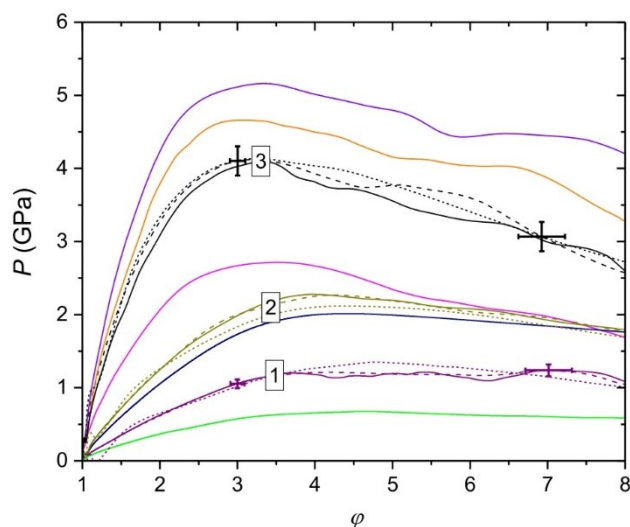


Рис. 8. Область состояний на плоскости P - V ($\phi = V/V_0$), для которой были проведены измерения термодинамических функций и удельного сопротивления СВЭС. Пары экспериментов 1–3, изображенные сплошными и штриховыми линиями одного цвета, имели одинаковые параметры. Пунктирные линии того же цвета представляют соответствующие зависимости, вычисленные с использованием УРС, построенного по методике [9].

На Рис. 9 показаны измеренные зависимости плотности СВЭС от удельной энтальпии для некоторых экспериментов этой работы. Показан интервал относительно небольших значений энтальпии, для которого имеются литературные данные. На основании полученных нами экспериментальных данных, была определена зависимость плотности на изобаре $P = 1$ атм, которая сравнивается с литературными данными [14–16]. Из этого рисунка видно, что имеется хорошее согласие наших результатов с данными стационарных экспериментов [14–16].

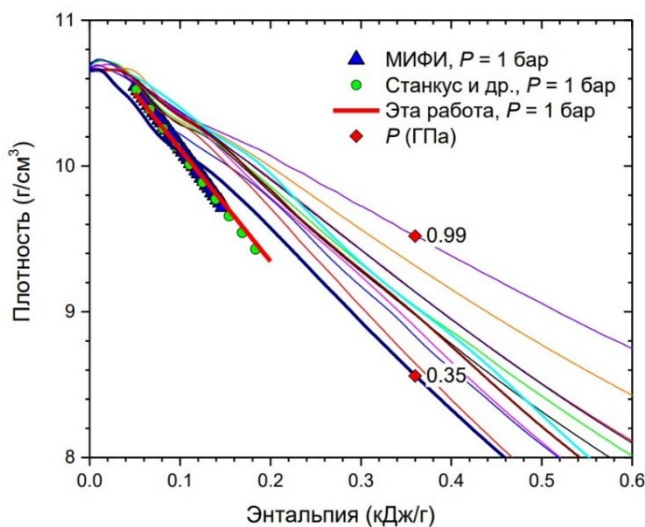


Рис. 9. Семейство зависимостей плотности СВЭС от удельной энтальпии, измеренных в динамических экспериментах (тонкие линии). Изобара $P = 1$ бар, полученная в этой работе (красная толстая линия) сравнивается со справочными данными [14] (зеленые кружки) и [16] (синие треугольники). Зависимости, измеренные в 13 динамических экспериментах этой работы (тепловое расширение образца происходило при растущем давлении), показаны тонкими линиями. Два красных ромба отмечают состояния, для которых приведено значения давления (в ГПа).

На Рис. 9 показаны измеренные зависимости удельного электросопротивления от удельной энтальпии, а также зависимость на изобаре $P = 1$ атм, полученная по этим данным. Как видно из этого рисунка, данная изобара согласуется со справочными данными [17,18]. Из Рис. 4.5 видно, что на зависимости сопротивления от удельной энтальпии имеется максимум вблизи области плавления в диапазоне $i < 0,13$ кДж/г. Анализ показал, что этот максимум является эффектом давления, которое в наших экспериментах монотонно увеличивалось с увеличением энтальпии.

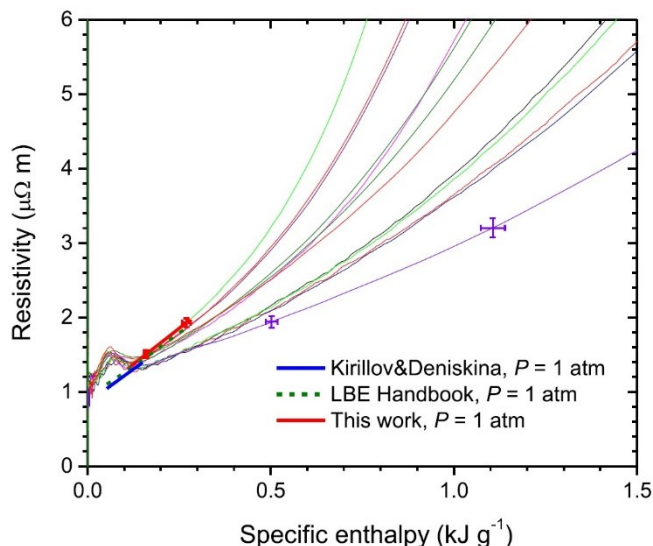


Рис. 9. Удельное сопротивление СВЭС как функция удельной энтальпии. Тонкие линии — зависимости, измеренные в наших экспериментах, толстая красная линия — зависимость от изобары $P = 1$ атм, определенная по экспериментальным данным, толстая пунктирная зеленая и сплошная синяя линии — литературные данные [17, 18]. Показаны погрешности значений удельного сопротивления и энтальпии для изобары $P = 1$ атм и эксперимента с максимальным давлением.

На Рис. 10 приводятся измеренные зависимости удельного сопротивления СВЭС от относительного объема. Как для свинца, все измеренные зависимости пересекаются практически в одной точке, при значении относительного объема $V/V_0 = 2.4 \pm 0.1$. При значениях $V/V_0 < 2.4$ удельное сопротивление СВЭС на изохорах растет с увеличением давления, т.е. производная $(\partial\sigma^{-1}/\partial P)_V > 0$, и, следовательно, ТКС положителен, а при значениях $V/V_0 > 2.4$ этот коэффициент становится отрицательным и быстро возрастает по абсолютной величине при увеличении объема.

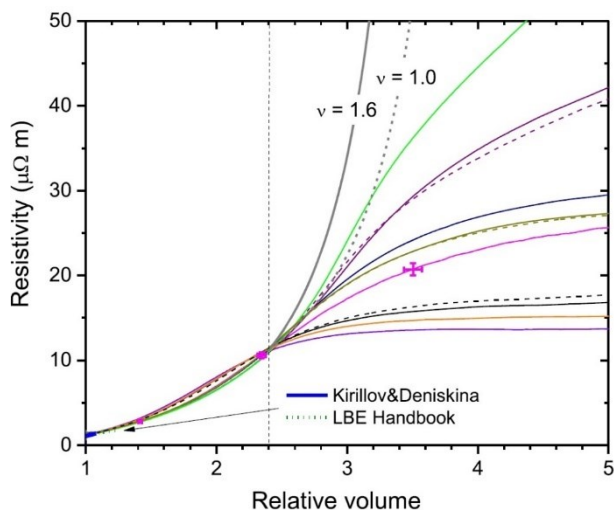


Рис. 10. Удельное сопротивление СВЭС как функция относительного объема: тонкие линии — зависимости, измеренные в наших экспериментах, короткие отрезки толстой синей и пунктирной оливковой линий — справочные данные [17, 18]. Показаны погрешности наших измерений.

В пятой главе представлены результаты измерений с целью изучения свойств графита и жидкого углерода в широкой области состояний, а также измеренные скачки термодинамических величин при плавлении графита. Дается описание пирометра, созданного автором настоящей работы для проведения температурных измерений в экспериментах с графитом.

Для графита в рамках настоящей работы впервые измерены значения удельного объема, энтальпии, давления и удельного электросопротивления графита и жидкого углерода на кривой плавления. Кроме того, в экспериментах с графитом были проведены измерения температуры, в результате чего удалось экспериментально получить полный набор термодинамических величин, необходимых для определения свободной энергии Гиббса, положения кривой плавления, а также данные по удельному электросопротивлению для графита и жидкого углерода в широкой области состояний в интервале давления $P = 0,4 - 3$ ГПа, и в интервале относительного объема от нормального значения, до значения $V/V_0 \approx 2,5$.

Образцы изготавливались из тонких графитовых пластин (толщина 20 – 40 мкм) высокоориентированного пиролитического графита марки HOPG (чистота 99,999% масс., нормальная плотность $2,26 \text{ г/см}^{-3}$, нормальное удельное электросопротивление вдоль базисных плоскостей $44 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$).

В работах [19, 20] были проведены прямые измерения зависимостей электросопротивления и относительного объема от энтальпии и давления для графита и жидкого углерода. В этих работах получены данные для двух групп экспериментов – в первой образцы помещались между двумя пластинами из кварцевого стекла, а во второй между сапфировыми пластинами. Процессы нагрева образцов в этих экспериментах на плоскости P - V показаны на Рис. 11.

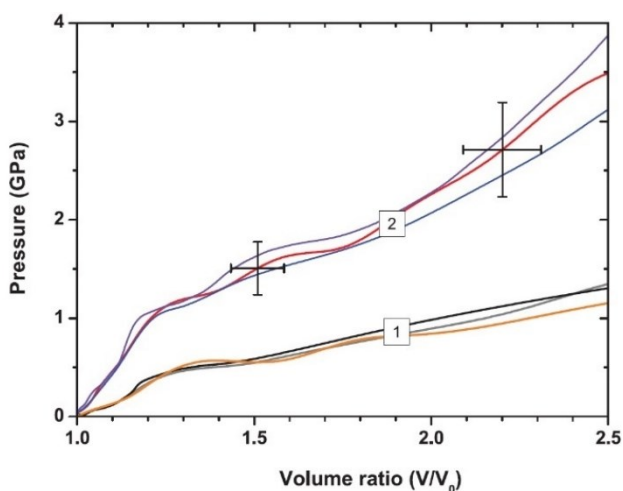


Рис. 11. Давление как функция относительного объема, измеренного в двух группах (1,2) экспериментов этой работы. Для каждой группы параметры экспериментов были почти идентичны. Показаны максимальные систематические погрешности измерений.

Зависимости удельного сопротивления графита и жидкого углерода от относительного объема показаны на Рис. 12 [19, 20]. На этом рисунке также показаны значения удельного сопротивления и относительного объема в начале и конце плавления. Эти значения определялись по особенностям на зависимости падения напряжения на образце от удельного джоулевого тепла, рассеянного в нем, с помощью способа, аналогичного способу, использовавшемуся в [21].

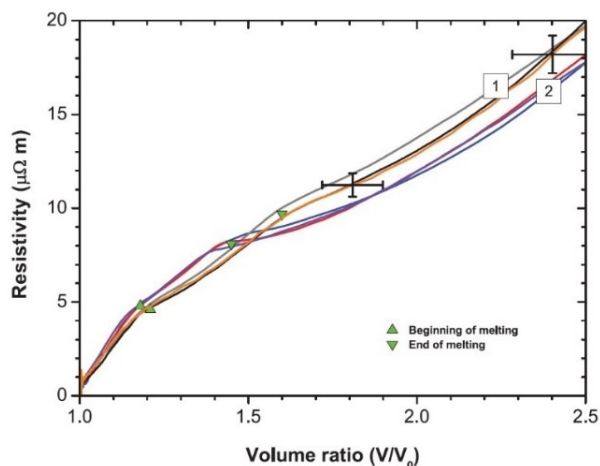


Рис. 12. Удельное сопротивление как функция относительного объема, измеренное в двух группах экспериментов этой работы. Значения величин в начале и конце плавления показаны зелеными треугольниками. Показаны погрешности измерений.

Зависимости, показанные на Рис. 11 и 12 позволяют определить знак изохорического ТКС для графита и жидкого углерода. Делается это так же, как для свинца и свинцово-висмутовой эвтектики. Оказалось, что в указанном диапазоне давлений ТКС графита положителен, а ТКС жидкого углерода отрицателен.

На Рис. 13 показаны зависимости плотности графита и жидкого углерода от удельной энтальпии для рассматриваемых экспериментов. В Таблице 2 приведены значения удельного объема, энтальпии, давления и удельного сопротивления графита и жидкого углерода на кривой плавления, полученные в результате проведенных измерений. Каждое значение представляет собой среднее значение для двух групп экспериментов, представленных на Рис. 5.2, 5.3, 5.5.

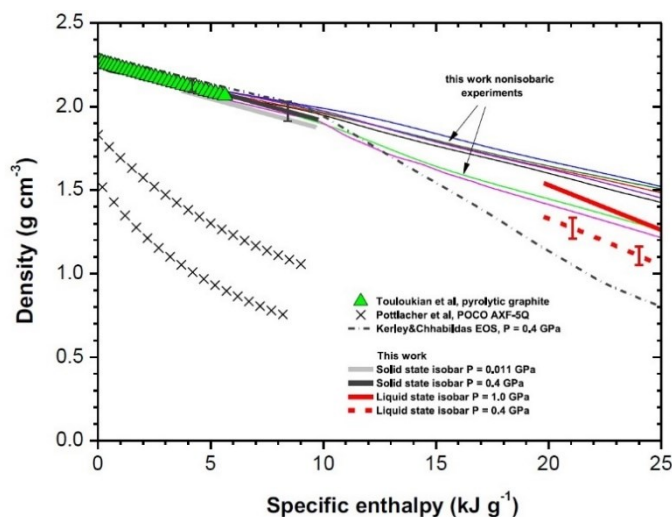


Рис. 13. Зависимости плотности пиролитического графита и жидкого углерода от удельной энтальпии, измеренные в данной работе (тонкие линии) и определенные по этим результатам четыре изобары (толстые сплошные линии). Показаны литературные данные [22] (треугольники), [23] (кресты) и [24] (черная штрихпунктирная линия).

Таблица 2. Измеренные значения относительного объема V/V_0 , удельной энтальпии i , давления P и удельного сопротивления σ^I графита и жидкого углерода на кривой плавления [19]

V/V_0	P , ГПа	i , кДж/г	σ^I , мкОм·м
Графит			
$1,18 \pm 0,01$	$0,9 \pm 0,2$	$11,3 \pm 0,2$	$4,8 \pm 0,2$
$1,21 \pm 0,01$	$0,4 \pm 0,1$	$11,0 \pm 0,2$	$4,6 \pm 0,2$
Жидкий углерод			
$1,45 \pm 0,02$	$1,4 \pm 0,2$	$22,0 \pm 0,3$	$8,1 \pm 0,3$
$1,60 \pm 0,02$	$0,7 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	$9,7 \pm 0,3$

Для измерения температуры в экспериментах [25] мы использовали пирометрический метод, для реализации которого в нашей лаборатории автором настоящей работы был создан быстродействующий пирометр, оптическая схема которого представлена на Рис. 14. В экспериментах использовались два интерференционных фильтра на 656 и 850 нм (оба с FWHM = 10 нм). Линейность фотоприемника проверялась во всем диапазоне выходного сигнала. Сигнал фотоприемника записывался на один из осциллографов: RTM2054 либо RTM2104 (оба производства Rohde&Schwarz). Чтобы по сигналу фотоприемника, который пропорционален интенсивности излучения образца, получить температуру, производилась привязка этого сигнала при значении энтальпии 96 кДж/моль^{-1} к температуре $T = 4,16 \text{ кК}$ по литературным данным [26,27]. При этом предполагалось, что излучательная способность образца в процессе нагрева не меняется. Такая процедура привязки проводилась в каждом эксперименте.

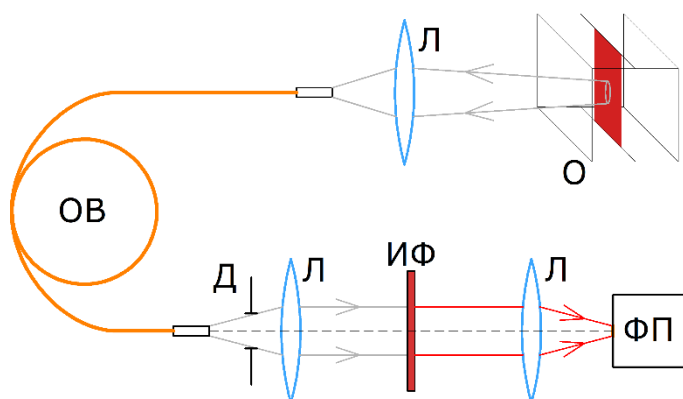


Рис. 14. Оптическая схема пирометра, использованного в настоящей работе. О – образец графита, помещенный между пластинами оконного материала; Л – линзы; ОВ – оптоволокно; Д – диафрагма; ИФ – интерференционный фильтр; ФП – фотоприемник.

Было проведено 20 экспериментов с графитом, в которых измерялась температура. На Рис. 15 показаны экспериментальные зависимости давления от плотности для некоторых из этих экспериментов.

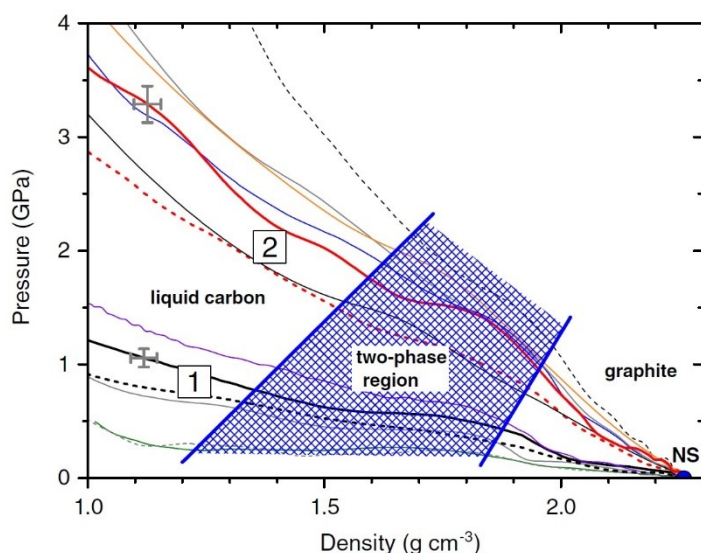


Рис. 15. Экспериментальные пути нагрева образцов графита в плоскости давление-плотность. Нагрев начинается при нормальных условиях (точка NS). Заштрихованная область обозначает двухфазную область плавления; две пары экспериментов, обозначенные толстыми красными и черными линиями (сплошными и пунктирными), представляют эксперименты с относительно низкими (1) и высокими давлениями (2). Показаны погрешности измерений.

На Рис. 16 показаны измеренные величины плотности, удельного электросопротивления и энтальпии представлены как функции температуры для четырех экспериментов, отмеченных на Рис. 15. В двух экспериментах, которые показаны красной сплошной и черной пунктирной линиями, использовался фильтр на 850 нм, а в двух других экспериментах фильтр на 656 нм. В экспериментах, которые показаны черными линиями, образцы были зажаты между пластинами из кварцевого стекла, а в двух других между сапфировых пластин.

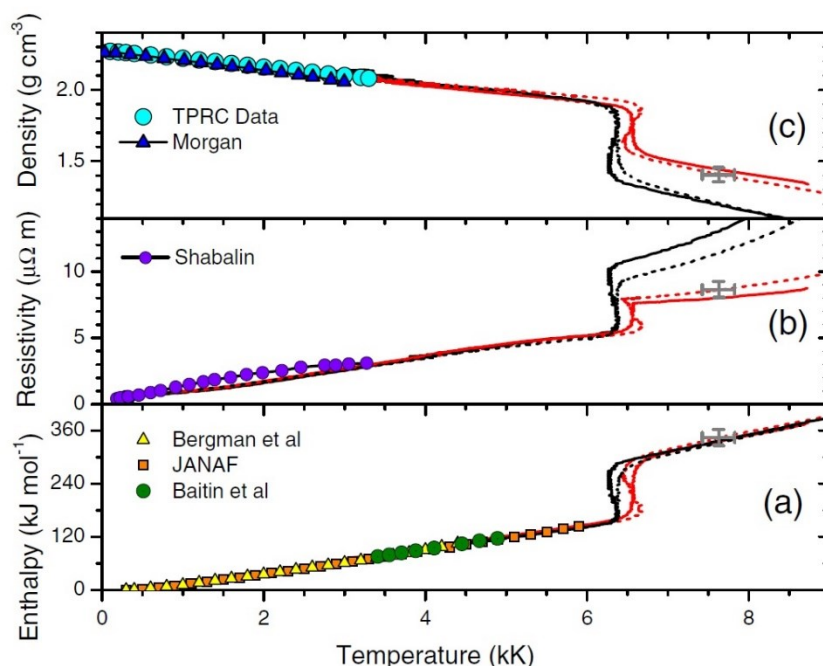


Рис. 16. Температурные зависимости энтальпии (а), удельного сопротивления (б) и плотности (с), измеренные в четырех экспериментах этой работы (черные и красные линии), сравниваются с литературными данными [22, 26 - 30]. Показаны неопределенности наших измерений. Обозначения линий такие же, как на Рис. 15.

Из Рис. 16(а) следует, что наши результаты хорошо согласуются с данными [26 – 28]. Точность наших измерений температуры демонстрируется также измеренными зависимостями плотности графита от температуры. Как видно из Рис. 16(с), эти зависимости хорошо согласуются со справочными данными [22, 29], и свидетельствуют об отсутствии скачков или изломов вблизи точки привязки температуры. Рис. 16(б) показывает, что то же самое справедливо и для зависимостей удельного сопротивления. На Рис. 16(б)(с) значения температуры ниже точки привязки получены из измеренных значений энтальпии с использованием значений теплоемкости из работы [27].

Заключение

Впервые получены экспериментальные зависимости энтальпии и удельного электросопротивления от давления и плотности для жидкого свинца, а также свинца в сверхкритической области состояний в широком интервале давлений 0,2 – 4,5 ГПа и значений относительного объема $V/V_0 = 1 - 18$. Показано, что в той части области состояний, где для свинца имеются надежные литературные данные, результаты наших измерений хорошо с ними согласуются. Для удельного электросопротивления свинца обнаружен эффект, заключающийся в смене знака изохорического температурного коэффициента сопротивления при значении относительного объема $V/V_0 \approx 2,7$. Для оценки систематической погрешности проведенных измерений в той области состояний, где отсутствуют другие экспериментальные данные, была разработана и реализована экспериментальная методика измерения скорости слабых ударных волн, которая позволила убедиться в отсутствии неучтенных систематических погрешностей в этой области состояний.

Впервые получены экспериментальные зависимости энтальпии и удельного электросопротивления от давления и плотности для жидкого СВЭС, а также СВЭС в сверхкритической области состояний в интервале давлений 0,2 – 5 ГПа и значений относительного объема $V/V_0 = 1 - 8$. Полученные данные хорошо согласуются с литературными данными, которые имеются только при давлении 1 атм. Как и для свинца, для СВЭС обнаружен эффект, заключающийся в смене знака изохорического температурного коэффициента сопротивления при определенном значении относительного объема, но для СВЭС это значение равно $V/V_0 = 2.4 \pm 0.1$.

Для графита и жидкого углерода впервые были проведены эксперименты, в которых измерялся набор величин, полностью характеризующий термодинамическое состояние образца. В результате были получены уникальные экспериментальные данные для относительно широкого интервала плотностей (от нормальной плотности, до плотности в 2,5 раз ниже) и давлений (0,4–3

ГПа). Впервые получены значения плотности, давления, энтальпии и удельного электросопротивления графита и жидкого углерода на кривой плавления. Такие измерения дают возможность однозначно судить о скачках величин при плавлении, о знаке ТКС и положении кривой плавления.

Список литературы

- [1] L. M. Barker and R. E. Hollenbach J. Appl. Phys. 41, 4208 (1970)
- [2] V. N. Korobenko and A. D. Rakhel, Phys. Rev. B **75**, 064208, 2007
- [3] Korobenko V. N., Rakhel A. D., Savvatimski A. I. et al., Phys. Rev. B 71, 014208 (2005)
- [4] Кондратьев А.М., Рахель А.Д., Вестник ОИВТ, Том 1, стр. 126-129, 2018
- [5] ГОСТ 34100.3–2017/ ISO/ IEC Guide 98–3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Москва. Стандартинформ. (2017)
- [6] А. М. Кондратьев, В. Н. Коробенко, А. Д. Рахель, Термодинамические функции и удельное сопротивление флюида свинца в области перехода металл-неметалл, ЖЭТФ 154, 1168 (2018).
- [7] A. M. Kondratyev and A. D. Rakhel, Phys. Rev. B 107, 195134 (2023)
- [8] Е. М. Апфельбаум, А. М. Кондратьев, А. Д. Рахель, Изучение плотной плазмы свинца, ЖЭТФ, том 165, вып. 6, стр. 876–888, (2024)
- [9] A. D. Rakhel, J. Phys.: Condens. Matter 20, 295602 (2018)
- [10] W. M. Hodgson, Ph. D. Thesis, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-52493 (1978)
- [11] В.Е. Зиновьев, Теплофизические свойства металлов при высоких температурах, Металлургия, Москва (1989)
- [12] С. В. Станкус, Р. А. Хайрулин, ТВТ 44, 393 (2006)
- [13] A. M. Kondratyev, V. N. Korobenko, A. D. Rakhel, J. Phys.: Condens. Matter 34, 195601 (2022)
- [14] Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 229-07. Плотность свинца, висмута и их эвтектического сплава в конденсированном состоянии в диапазоне температур 273.15...1500 К / С.В. Станкус, Р.А. Хайрулин, А.Г. Мозговой, В.В. Рошупкин, М.А. Покрасин. Росс. научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. М., 2007. Деп. в ФГУП «Стандартинформ» 13.12.2007, № 833 – 07 кк.
- [15] Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 229-07. Коэффициент объемного термического расширения свинца, висмута и их эвтектического сплава в диапазоне температур 273,15...1500 К / С.В. Станкус, Р.А. Хайрулин, А.Г. Мозговой, В.В. Рошупкин, М.А. Покрасин. 27 Росс. научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. М., 2008. Деп. в ФГУП «Стандартинформ» 25.12 2008 г., № 838-2008 кк.

- [16] Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ". Служба стандартных справочных данных в области использования атомной энергии. База данных по теплофизическим свойствам жидкометаллических теплоносителей перспективных ядерных реакторов.
- [17] П.Л. Кириллов, Н.Б. Денискина Теплофизические свойства жидкометаллических теплоносителей. 2000 ФЭИ-0291 М.: ЦНИИАтоминформ
- [18] Sobolev V P and Gessi A (ed), 2015, Handbook on Lead–Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties Materials Compatibility, Thermal-Hydraulics and Technologies (Paris:NEA OECD) ch 2
- [19] A. M. Kondratyev, V. N. Korobenko, and A. D. Rakhel, Carbon 100, 537 (2016).
- [20] A. M. Kondratyev, V. N. Korobenko, and A. D. Rakhel, J. Phys. Condens. Matter 28, 265501 (2016).
- [21] V.N. Korobenko, A.I. Savvatimski, R. Cheret, Graphite melting and properties of liquid carbon, Int. J. Thermophys. 20 (1999) 1247e1256.
- [22] Y.S. Touloukian, R.K. Kirby, R.E. Taylor, T.Y.R. Lee, Thermal expansion, Nonmetallic solids, in: Thermophysical Properties of Matter, vol. 13, 1977. IFI/Plenum New York
- [23] G. Pottlacher, R.S. Hixson, S. Melnitzky, E. Kaschnitz, M.A. Winkler, H. Jager, Thermophysical properties of POCO AXF-5Q graphite up to melting, Thermochim. Acta 218 (1993) 183e193.
- [24] G.I. Kerley, L. Chhabildas, Multicomponent-multiphase Equation of State for Carbon, Report of the Sandia National Laboratories SAND2001-2619, 2001.
- [25] A.M. Kondratyev and A.D. Rakhel, Phys. Rev. Lett., 2019, v 122, 175702
- [26] G. A. Bergman et al., Tables of Standard Reference Data, GSSSD 25-90 (Izdatel'stvo Standartov, Moscow, 1991)
- [27] M.W. Chase, Jr., J. L. Curnutt, J. R. Downey, Jr., R. A. McDonald, A. N. Syverud, and E. A. Valenzuela, J. Phys. Chem. Ref. Data 11, 695 (1982).
- [28] A. V. Baitin, A. A. Lebedev, S. V. Romanenko, V. N. Senchenko, and M. A. Scheindlin, High Temp. High Press. 22, 157 (1990).
- [29] W. C. Morgan, Carbon 10, 73 (1972)
- [30] I. L. Shabalin, Ultra-High Temperature Materials I (Springer, Science+Business Media Dordrecht, 2014).
- [31] Hixson R.S., Winkler M.A., Shaner J.W. Sound speed in liquid lead at high temperatures // Int. J. Thermophys. – 1986. – Vol. 7. – P. 161–165.
- [32] A.I. Savvatimskiy / Carbon 43 (2005) 1115–1142

Публикации автора по теме диссертации

- 1) Е. М. Апфельбаум, А. М. Кондратьев, А. Д. Рахель, Изучение плотной плазмы свинца, ЖЭТФ, том 165, вып. 6, стр. 876–888, (2024);

- 2) A. M. Kondratyev and A. D. Rakhel, Measurements of shock-propagation velocities in liquid lead across the metal-nonmetal transition range Phys. Rev. B 107, 195134 (2023);
- 3) A. M. Kondratyev, V. N. Korobenko, A. D. Rakhel, Metal-non-metal transition in lead-bismuth eutectic J. Phys.: Condens. Matter 34, 195601 (2022);
- 4) Kondratyev A.M., Rakhel A.D. Melting Line of Graphite // Phys. Rev. Lett.– 2019. – Vol. 122.–175702;
- 5) А. М. Кондратьев, В. Н. Коробенко, А. Д. Рахель, Термодинамические функции и удельное сопротивление флюида свинца в области перехода металл-неметалл, ЖЭТФ 154, 1168 (2018);
- 6) A. M. Kondratyev, V. N. Korobenko, and A. D. Rakhel, Direct measurements of thermal expansion and the volume change upon melting for graphite Carbon 100, 537 (2016);
- 7) A. M. Kondratyev, V. N. Korobenko, and A. D. Rakhel, Experimental study of liquid carbon J. Phys. Condens. Matter 28, 265501 (2016).