

**Сведения**  
об официальном оппоненте

Фамилия, имя, отчество	Пикуз Сергей Александрович
Гражданство	РФ
Ученая степень	Доктор наук
Отрасль науки	Физико-математические науки
Специальность	01.04.08 Физика плазмы
Ученое звание	
Должность	Высококвалифицированный главный научный сотрудник
Место работы	Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
Организационно-правовая форма	ФГБУН
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Структурное подразделение	Отдел физики высоких плотностей энергии
Адрес электронной почты	<a href="mailto:pikuzsa@lebedev.ru">pikuzsa@lebedev.ru</a>
Телефон	+7(499) 132-66-68 вн. 66-68

**СПИСОК**

опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях официального оппонента по защите диссертации Кондратьева Арсения Михайловича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Теплофизические свойства флюидов металлов и углерода в широкой области состояний на плоскости давление - удельный объем», по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

№	Название публикации	Тип	Соавторы	Выходные данные	Перечень ВАК
1	Развитие неустойчивостей в тонких алюминиевых фольгах, взрываемых на генераторе с током до 10 кА	Научная статья	Пикуз С.А., Тиликин И.Н., Романова В.М., Мингалеев А.Р., Шелковенко Т.А	Физика плазмы, Т. 50, № 7, с. 744–752, 2024	Да
2	Электрический взрыв тонких проводников (смена парадигмы)	Научная статья	Романова В.М., Тиликин И.Н., Тер-Оганесьян А.Е., Мингалеев А.Р., Шелковенко Т.А., Пикуз С.А.	Физика плазмы, Т. 50, № 9, с. 1062–1075, 2024	Да
3	Features of the formation of hot dense plasma in x-pinchs on current generators based on low-inductive capacitors	Научная статья	Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Pikuz S.A.	Journal of applied physics, Vol. 136, p. 105903, 2024	Web of Science
4	Exploding foils with artificial structure as a source of ultraviolet radiation	Научная статья	Tilikin I.N., Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Oginov A.V., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Ter-Oganesyan A.E.	Journal of applied physics, Vol. 134, p. 033302, 2023	Web of Science

5	Methods of controlled formation of instabilities during the electrical explosion of thin foils	Научная статья	Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Oginov A.V., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Pikuz S.A.	Matter and radiation at extremes, Vol. 8, p. 055601, 2023	Web of Science
6	Исследование наносекундного взрыва тонких фольг с искусственно нанесенной на поверхность структурой	Научная статья	Шелковенко Т.А., Тиликин И.Н., Огинов А.В., Перваков К.С., Мингалеев А.Р., Романова В.М., Пикуз С.А.	Физика плазмы, Т. 48, № 11, с. 1075–1085, 2022	Да
7	Explosion dynamics of thin flat foils at high current density	Научная статья	Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Pikuz S.A., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Atoyán L., Hammer D.A.	Matter and radiation at extremes, Vol. 7, p. 055901, 2022	Web of Science

Пикуз С.А.

Помощник директора по научной работе  
д.ф.-м.н., профессор

С. Ю. Савинов



## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу КОНДРАТЬЕВА Арсения Михайловича «Теплофизические свойства флюидов металлов и углерода в широкой области состояний на плоскости давление - удельный объем», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

*Актуальность темы.* Представленная работа посвящена экспериментальному исследованию теплофизических свойств свинца и свинцово-висмутowego эвтектического сплава (СВЭС) в жидком и сверхкритическом состояниях, а также изучению свойств квазинокристаллического графита и жидкого углерода. Свинец и СВЭС используются в качестве жидкометаллического теплоносителя в перспективных отечественном реакторах, в которых реализуется концепция замкнутого ядерного топливного цикла. Для оценки поведения реакторов в критических и аварийных условиях могут понадобиться данные по теплофизическим свойствам теплоносителя в жидком и сверхкритическом состояниях. Графит, благодаря высокой температуре плавления, является широко распространенным высокотемпературным конструкционным материалом и исследование его теплофизических свойств вплоть до температуры плавления, а также в жидком состоянии необходимо для широкого круга научных и практических применений.

Диссертация объемом 122 страницы включает в себя введение, пять глав, заключение и два приложения, и содержит 42 рисунка, 5 таблиц и список из 97 ссылок на литературные источники.

Во введении рассмотрена актуальность темы диссертации, описаны цели исследований, решенные в них задачи и другие характеристики работы, необходимые для её представления.

*Глава первая* – обзорная. В ней рассмотрены имеющиеся в настоящее время экспериментальные методики для изучения свойств металлов при высоких давлениях и температурах. Подробно изложены литературные данные по свойствам свинца по свойствам свинцово-висмутовой эвтектики, по свойствам графита и жидкого углерода. Показано, что в литературе отсутствуют экспериментальные данные по теплофизическим свойствам флюида свинца для давлений выше 0,4 ГПа и для значений относительного объема больше, чем 3,6. Для свинцово-висмутowego эвтектического сплава экспериментальные данные имеются только при давлениях около 1 атм, при этом величина относительного объема не превышает значение 1,25. Несмотря на то, что имеется сравнительно много работ, посвященных изучению теплофизических свойств графита и жидкого углерода, в большинстве из них, за редким исключением, не измерялся полный набор величин, позволивших бы однозначно определить термодинамическое состояние образца, при котором проводились измерения тех или иных теплофизических свойств.

*Глава вторая* представляет собой описание экспериментальной методики, которая является развитием широко известной методики взрывающихся проволочек. Ключевым отличием использованной в работе методики является то, что в качестве образца используется не проволока, а фольга (или тонкая пленка) исследуемого материала, помещенная между пластинами сапфира или кварцевого стекла. Самым важным при использовании тонкого плоского проводника является переход от двумерной геометрии проволоочки, в которой как получение экспериментальных данных, так и их интерпретация является сложной, а иногда и нерешаемой, задачей, к геометрии одномерной. В одномерной геометрии, при правильно выбранной конфигурации электродов и нагрузки решение многих задач критически упрощается. Более того, становится возможным построение строгой теории процесса и надежное извлечение значений термодинамических констант вещества из экспериментальных данных. С помощью описанного метода 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 в плотную диэлектрическую среду, импульсом электрического тока плотностью  $\sim 10^7$  А/см<sup>2</sup> и временем нарастания порядка 1 мкс. Для реализации методики автором была сконструирована и построена экспериментальная электроимпульсная установка «У-2», которая использовалась для получения большей части экспериментальных результатов, представленных в настоящей работе. Установка была создана в 2015 году, и в процессе эксплуатации многократно модернизировалась. В диссертации дается её подробное описание. Важным элементом экспериментальной установки является лазерный интерферометр, с помощью которого измеряется смещение поверхности образца в процессе нагрева. Интерферометр представляет собой оптоволоконный прибор, работающий по принципу Майкельсона. Показано, как из первичных экспериментальных данных определяются плотность (или относительный объем), давление, энтальпия, удельное электросопротивление и другие величины. Приведены оценки, позволяющие определить область применимости методики.

В *третьей главе* представлены результаты измерений термодинамических величин и удельного электросопротивления свинца. Впервые получены экспериментальные данные то теплофизическим свойствам флюида свинца в широком интервале давлений  $0,4$ – $4,5$  ГПа и значений относительного объема  $V/V_0 = 1$ – $18$ . В этой области получены зависимости энтальпии и удельного электросопротивления от давления и плотности. Для решения задачи надежной (независимой) оценки систематической погрешности измерений при относительно больших значениях удельного объема и давления был разработан времяпролетный метод прямого измерения скорости распространения слабых ударных волн, генерируемых в динамических экспериментах.

В *четвертой главе* приведены результаты исследований свинцово-висмутового эвтектического сплава. Впервые получены экспериментальные данные то теплофизическим свойствам жидкого СВЭС, а также СВЭС в сверхкритической области состояний в интервале давлений  $0,4$ – $5$  ГПа и значений относительного объема  $V/V_0 = 1$ – $8$ . В этой области получены зависимости энтальпии и удельного электросопротивления от давления и плотности. Полученные данные хорошо согласуются с литературными данными, которые имеются только при давлении 1 атм. Как и для свинца, для СВЭС обнаружен эффект смены знака изохорического температурного коэффициента сопротивления при определенном значении относительного объема. Для доказательства квазистатичности процессов, реализуемых в экспериментах, реализовано несколько процессов нагрева, идущих на плоскости  $P$ - $V$  разными путями, пересекающимися на этой плоскости в одной точке при определенных значениях давления и относительного объема. Было показано, что в этой точке другие параметры состояния, а именно удельная энтальпия и удельное электросопротивление, также совпадают, что является свидетельством квазистатичности этих процессов.

В *пятой главе* приведены результаты измерений термодинамических свойств и удельного электросопротивления графита и жидкого углерода. При этом впервые удалось измерить значения энтальпии и удельного электросопротивления графита и жидкого углерода на кривой плавления.

В *Заключении* формулируются основные результаты диссертационной работы.

Автореферат включает необходимые сведения о диссертации Кондратьева А.М. и соответствует её содержанию.

Диссертация написана ясным, грамотным русским языком. Сама диссертационная работа структурирована по правилам ВАК, содержит требуемые формальные разделы, в достаточной степени иллюстрирована и дает полное представление о проведенных исследованиях и их результатах.

Все полученные автором научные результаты обладают несомненной научной новизной и безусловной практической ценностью, что особенно относится к измерениям абсолютных физических констант вещества в экстремальном состоянии.

Полученные результаты могут быть полезны для научных институтов и организаций, которые изучают теплофизические свойства веществ или работают в сфере атомной энергетики и смежных областях. В список таких организаций входят: РФЯЦ-ВНИИТФ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Физико-энергетический институт им. Лейпунского, НИИГрафит, ОКБ «Гидропресс», НИКИЭТ имени Н.А. Доллежала, Институт теплофизики СО РАН и УрО РАН, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Московский инженерно-физический институт.

Достоверность полученных результатов хорошо обоснована тщательностью выбора технических параметров проводимых экспериментов, скрупулезным анализом полученных результатов и возможных источников ошибок, а также их сравнением с уже имеющимся немногочисленными данными.

Личный вклад автора диссертации в проделанную работу не вызывает сомнения.

*Апробация работы.* Материалы диссертации полно представлены на ведущих российских и международных научных конференциях. Соответствующий список, представленный в диссертации, содержит 12 наименований

*Публикации.* По теме работы автор имеет 6 публикаций в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базе данных Web of science.

По диссертации Кондратьева А.И. можно сделать некоторые замечания:

- обзорная глава занимает почти треть текста диссертации, что явно излишне, особенно если принять во внимание мини-обзоры в каждой главе,

- в описании экспериментальной установки отсутствуют ключевые осциллограммы разрядных токов и напряжений, что затрудняет понимание места проводимых экспериментов среди множества исследований взрыва проводников,

- кроме главы второй, посвященной методике измерений, описания экспериментов разбросаны по другим главам, в частности рисунок 3.5 то же, что рисунок 2.8, но с добавлением воздействующего лазера,

- на рисунках 3.2, 3.3 величины давления указаны в разных единицах.

Отмеченные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе Кондратьева А.И. и имеют характер пожеланий более тщательно относиться к представлению полученных результатов.

Представленная к защите диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Кондратьев Арсений Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент, д.ф.-м.н., высококвалифицированный главный научный сотрудник Отдела физики высоких давлений и энергии, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53, +7(499)132-66-68, pikuzsa@lebedev.ru

С. А. Пикуз

Помощник директора по научной работе, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53, +7(499)132-66-68, savinov@lebedev.ru  
д.ф.-м.н., профессор

С. Ю. Савинов

