

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ГЕОТЕРМИИ
ДАГЕСТАНСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН (ИПГ ДНЦ РАН)

УДК 533.9:51-73

№ госрегистрации 01201360103

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПГ ДНЦ РАН

_____ А.Б. Алхасов

«_____» _____ 2017 г

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

в рамках государственного задания: «Фундаментальные научные исследования в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы»;

направление 18: «Физико-технические и экологические проблемы энергетики; теплообмен; теплофизические и электрофизические свойства веществ; низкотемпературная плазма и технологии на ее основе»

по теме

«Моделирование экспериментов по исследованию экстремальных состояний вещества, оптимизация экспериментальных методик»
(промежуточный за 2017)

Руководитель темы

А.А. Аливердиев

подпись, дата

Махачкала 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

И.о. зав. лабораторией
доктор физ.-мат. наук,

_____ А.А.Аливердиев (введение,
заключение, разделы 1-4)
подпись, дата

Исполнители темы:
Старший научный сотрудник

_____ В.Д. Бейбалаев (раздел 4)

Исполнители темы:

Научный сотрудник

_____ Р.А. Магомедов (раздел 4)
подпись, дата

Младший научный сотрудник

_____ Э.Н. Ахмедов (раздел 4)
подпись, дата

Младший научный сотрудник

_____ Р.Р. Мейланов (раздел 4)
подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет на 46 стр., 12 рис., 105 источников

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, УДАРНЫЕ ВОЛНЫ, МОЩНЫЕ ЛАЗЕРЫ.

Объектами исследования и разработки в данной работе являются экстремальные состояния вещества, создание которых моделируется численными методами и производится сравнительный анализ с экспериментальными данными, полученными в ходе выполнения других, в том числе совместных проектов.

Целью данной работы является получение новых знаний и результатов в области физики экстремальных состояний вещества посредством моделирования комплексных процессов, реализуемых в экспериментах по ударному сжатию. В частности, поставлены задачи выявить и устранить ряд систематических ошибок, связанных с формой мишени, профилем лазерного импульса и разогревом мишени вторичным излучением, а также нахождение конфигураций слоистых мишеней для реализации труднореализуемых РТ-состояний исследуемого вещества. Кроме того рассматриваются сопутствующие задачи уточненного описания используемых при моделировании уравнения состояния вещества, а также теоретического описания особенностей тепло- и массопереноса в средах с выраженными нелокальными эффектами, формирование и распространение ударной волны в газовом разряде и др.

В ходе выполнения проекта получен ряд новых оригинальных результатов, в частности:

1. Совместно с зарубежными коллегами обнаружены скачки отражательной способности углерода при высоких давлениях и температурах, указывающие на металлизацию жидкого углерода. Продолжается работа над интерпретацией полученных в 2016 г. экспериментальных данных.

2. На основании данных моделирования обосновано получение экстремальных состояний вне ударной адиабаты Гюгонио в слоистых мишенях.

3. На основании совместных с зарубежными коллегами экспериментальных результатов проведены работы и получены новые оригинальные результаты по исследованию процессов, происходящих при лазерном ударном сжатии простой и комплексной мишени при использовании двойного или комплексного фокального пятна. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования с экспериментальными данными при разных плотностях и составах первого слоя мишени.

4. Проведен анализ пространственно-временной зависимости электронной плотности короны лазерной плазмы при размере фокального пятна, достаточном для одномерного приближения. Найдены поправочные коэффициенты для автомодельного приближения.

5. Проведено описание процессов неизотермической фильтрации на основе дробного исчисления, обеспечивающее естественный учет пространственной (эффект корреляций) и временной (эффект памяти) нелокальности. Показано, что использование различных значений параметров показателей дробного порядка позволяет найти решение, соответствующее описанию реальных процессов.

По результатам исследований по теме осуществлено 70 научных публикаций (см. [27-96] из приведенного списка), из них 24 статьи в рецензируемых изданиях, 15 из которых входят в основные зарубежные реферативные базы данных (Web of Science и Scopus, см. [27-40]).

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: (1) оптимизация экспериментальных параметров по результатам модельных расчетов; (2) расчет уравнений состояний вещества; (3) решение задач тепло- и массопереноса.

Степень внедрения результатов НИР и их эффективность характеризуется их использованием в совместных проектах с ведущими мировыми центрами.

Область применения: спектр потенциальных приложений охватывает широкий круг, включающий астрофизику и планетарную физику, материаловедение и прикладную инженерию. Прогнозные предположения о развитии объекта исследования: полученные в ходе выполнения проекта результаты должны улучшить точность экспериментов по изучению экстремальных состояний вещества, а также дать основание на постановку и проведение новых экспериментальных исследований в расширенном диапазоне термодинамических параметров.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Уравнение состояния – функциональное уравнение, связывающее термодинамические параметры (давление, температура, объем, химический потенциал) в состоянии термодинамического равновесия. Различают термическое уравнения состояния (связь между термодинамическими параметрами) и калорическое уравнение состояния (связь между термодинамическим потенциалом и термодинамическими параметрами).

Ударная волна – поверхность разрыва, которая движется внутри среды, при этом давление, плотность, температура и скорость испытывают скачок.

Экстремальное состояние вещества – состояние с аномально высокой концентрацией энергии, возникающее под воздействием высоких давлений и/или температур.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЭОК – электронно-оптическая камера.

УТС – управляемый термоядерный синтез.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1. Исследование углерода при давлениях мегабарного диапазона	15
2. Автомодельное описание лазерной	19
3 Особенности лазерного ударного сжатия композитной мишени в экспериментах с двойным фокальным пятном	22
4. Особенности тепло- и массопереноса в средах с выраженными нелокальными эффектами	29
Заключение.....	34
Список использованных источников	35

ВВЕДЕНИЕ

Изучение поведения вещества при высоких давлениях и температурах представляет фундаментальный и прикладной интерес во многих областях науки, включая изучение астрофизических и планетологических явлений (в том числе генезиса и развития теплового поя земли), технологии управляемого термоядерного синтеза (УТС) с инерционным удержанием и др. [1-5]

Ударные волны в этих исследованиях имеют неоспоримое преимущество, позволяя получать давления, недоступные в статических условиях. Значительный прогресс достигнут с появлением ионных пучков и мощных лазерных систем. В настоящий момент с их помощью удается достигнуть наибольших давлений среди лабораторных устройств. [6] Однако при высоких лазерных интенсивностях, необходимых для достижения давлений в десятки и сотни Мбар, в коллективных процессах лазерного поглощения начинает преобладать генерация горячих электронов и жесткого рентгеновского излучения, что приводит к предварительному разогреву мишени и создает трудности для ее сжатия. [7,8] Этот эффект проявляется слабо пока произведение интенсивности лазерного излучения (в ваттах на квадратный сантиметр) на квадрат его длины волны (в микронах) не превышает десяти в четырнадцатой степени. При таких условиях во взаимодействии лазерного излучения с веществом продолжает преобладать режим столкновительного поглощения. В то же время с такими интенсивностями могут быть давления в десятки мегабар, что представляет интерес для многих приложений. С применением методики сглаживания пространственного профиля лазерного луча [9] и использованием высокоскоростной электронно-оптической камеры (ЭОК), метод прямой передачи может давать относительную погрешность скорости ударной волны 1-2 % и давления 3-4 % при экстремальных давлениях 10-100 Мбар.

Таким образом, несмотря на существенный прогресс, достигнутый в последние годы с появлением тераваттных и петаваттных лазерных систем [10,11], исследования в очерченном диапазоне не теряют актуальности. Тем не менее, очевидно, что и в этом диапазоне необходимо максимальная предосторожность в учете предварительного разогрева, сведения к минимуму и учета его эффекта (чему и посвящена одна из основных задач настоящего проекта), так же как необходима уверенность в планарности и пространственной однородности ударной волны и учета возможных 2D и 3D эффектов. В этой связи ставились задачи выявления и устранения систематических экспериментальных ошибок в экспериментах по определению уравнения состояния, связанных с разогревом мишени вторичным излучением, формой мишени и профилем лазерного импульса. Метод

преград использовался для определения уравнения состояния различных материалов [12-23]. Этот метод состоит в одновременном измерении скорости ударной волны в двух материалах. Это дает возможность определение точки уравнения состояния одного вещества, беря другое в качестве опорного. Особенностью этого метода, помимо простых средств измерения уравнения состояния тестируемого материала, данный метод также дает простую возможность увеличить ударное давление на границе двух материалов, обусловленное тем, что волновое сопротивление у тестируемого материала больше, чем у опорного.

В свете сказанного предполагалось:

1) Выявление и устранение систематических экспериментальных ошибок в экспериментах по определению уравнения состояния, связанных с разогревом мишени вторичным излучением, формой мишени и профилем лазерного импульса. Это должно позволить как существенно улучшить точность экспериментов, так и устранить возможные качественные ошибки в анализе экспериментальных данных.

2) Комплексное исследование, составление уравнений состояния и выявление особенностей поведения различных веществ при высоких температурах и давлениях.

3) Нахождение зависимостей основных термодинамических параметров (давления, удельного объема и удельной энергии) вещества в слоистой структуре при прохождении ударной волны при различных исходных параметрах мишени и инициирующего волну лазерного импульса. Это позволит предсказать поведение вещества в пока недостижимых диапазонах РТ-параметрах и спроектировать новые эксперименты. Таким образом, роль численных экспериментов становится ведущей и предсказательной для реального эксперимента.

Кроме того рассматриваются сопутствующие задачи, включающие выявление особенностей тепло- и массопереноса в средах с выраженными нелокальными эффектами, описание поведения короны лазерной плазмы, изучение формирования и распространение ударной волны в газовом разряде и др.

Взятый за основу гидрокод MULTI [24] является одним из открытых кодов, используемым сегодня [25], и хорошо подходит под поставленные задачи. В частности, недавно он был уже успешно использован нами в задачах изучения динамики лазерной плазмы [26 и др.].

Основные результаты, полученные в ходе выполнения проекта, опубликованы в работах [27-96], в том числе в изданиях, входящих основные реферативные базы данных (Web of Science и Scopus, см. [27-40]). на основании которых и составлен настоящий отчет.

В 2017 году в рамках выполнения темы было опубликовано и представлено к публикации 30 работ, на основании результатов которых составлен настоящий отчет:

в зарубежной печати:

1. Aliverdiev A., Batani D., Benocci R., Dezulian R., Amirova A., Ragimkhanov G., Krousky E., Ullschmied J., Skala J., Dudzak R., Jakubowska K. About laser shocks dynamics for complex focal spots and structured targets // J. Phys.: Conf. Ser., 2018, **946**, 012013, doi :10.1088/1742-6596/946/1/012013 (**Scopus, WoS, impact RG 0.45**) (<http://www.ihed.ras.ru/elbrus17/proc/accepted/>)
2. Meilanov R.R, Akhmedov E.N., Beybalaev V.D., Magomedov R.A., Ragimkhanov G.B., Aliverdiev A.A., To the theory of non-local non-isothermal filtration in porous medium // J. Phys.: Conf. Ser., 2018, **946**, 012076, doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012076 (**Scopus, WoS, impact RG 0.45**) (<http://www.ihed.ras.ru/elbrus17/proc/accepted/>)
3. Magomedov R.A., Meilanov R.R., Akhmedov E.N., Beybalaev V.D., Aliverdiev, A.A. Generalization of Thermodynamics in Fractional Order Derivatives and Calculation of Heat-Transfer Properties of Noble Gases // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018 (**accepted**) doi: 10.1007/s10973-018-7024-2 (**WoS, impact 2.042**)
4. Emirov S.N., Beybalaev V.D., Gadzhiev G.G., Ramazanova A.E., Amirova A.A., and Aliverdiev A.A., To the description of the temperature and pressure dependences of the thermal conductivity of sandstone and ceramics // 2017, **891**, 012335 doi :10.1088/1742-6596/891/1/012335 (**Scopus, WoS, impact RG 0.45**)
5. Magomedov R.A., Meilanov R.R., Meilanov R.P., Akhmedov E.N., Beybalaev V.D., Aliverdiev A.A., To the fractal equation of state // Journal of Physics: Conference Series, 2017, **891**, 012331 doi:10.1088/1742-6596/891/1/012331 (**Scopus, WoS, impact RG 0.45**)

в рецензируемых журналах:

6. Эмиров С.Н., Бейбалаев В.Д., Рамазанова А.Э., Гаджиев Г.Г., Амирова А.А., Аливердиев А.А. О температурных и барических закономерностях изменения теплопроводности горных пород // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого, №5(103) , 2017, 52-66. (**список ВАК**)
7. Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э.Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А. Фрактальное уравнение состояния и расчет теплофизических характеристик аргона

// Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки, 32, No. 1, 2017, 6-11, doi: 10.21779/2542-0321-2017-32-1-6-11

8. Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э.Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А. Фрактальное уравнение состояния и расчет теплофизических характеристик воды // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки, 32, No. 4, 2017, 63-69 doi: 10.21779/2542-0321-2017-32-4-63-69

материалы конференций:

9. Аливердиев А.А., Взаимодействие мощного лазерного излучение с веществом: эксперимент, обработка данных и моделирование // Материалы XII Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики», приуроченная к 85-летию профессора М.Г. Алишаева, стр. 155-156
10. Бейбалаев В.Д., Назаралиев М.А., Аливердиев А.А., Малиева Ф.Ф., О численном исследовании краевой задачи для нелинейного уравнения теплопроводности с дробными производными // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" 23-26 октября 2017 г., Т.1, стр. 263-265.
11. Арсланбекова Р.Б., Омаров И.О., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А., Об особенностях в фазовой плоскости обобщенной нелинейной системы Дуффинга // Материалы Международного симпозиума «Неравновесные процессы в сплошных средах», Том 1, Пермь 2017, стр. 38-41 (<https://elis.psu.ru/node/424302>)
12. Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э.Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А., К расчету термодинамических характеристик на основе фрактального уравнения состояния на примере водяного пара Материалы Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и физики», Кабардино-Балкарская Республика, Терскол, 17 – 21 мая 2017 г., стр. 136-137.
13. Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э.Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А., Расчет теплофизических характеристик воды в дробном исчислении // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" 23-26 октября 2017 г., Т.1, стр. 305-307.
14. Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э. Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А., К расчету термодинамических характеристик воды на основе фрактального уравнения состояния // Материалы XII Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики», приуроченная к 85-летию профессора М.Г. Алишаева, стр. 155-156.

15. Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э.Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А., К фрактальному уравнению состояния, Материалы Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, 9-11 октября 2017 г., ISBN 978-5-383-01233-8 (Том 2), стр. 316-318.
16. Эмиров С.Н., Бейбалаев В.Д., Гаджиев Г.Г., Амирова А.А., Аливердиев А.А., Температурные и барические закономерности изменения теплопроводности песчаника и керамики // Сборник докладов Седьмой Международной научной конференции “Химическая термодинамика и кинетика” 29 мая –2 июня 2017, Великий Новгород, стр. 364-365.
17. Эмиров С.Н., Бейбалаев В.Д., Рамазанова А.Э., Давудов И.А., Амирова А.А., Аливердиев А.А., О температурных и барических закономерностях изменения теплопроводности композитных материалов // Материалы XX Междисциплинарный, Международный Симпозиум “Упорядочение в минералах и сплавах”, ОМА-20, 10-15 сентября 2017г., Ростов-на-Дону – п. Южный, с. 276-279.
18. Бейбалаев В.Д., Эмиров С.Н., Аливердиев А.А., Амирова А.А., Гаджиев Г.Г., К описанию температурной и барической зависимости теплопроводности мергеля // Материалы Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и физики», Кабардино-Балкарская Республика, Терск, 17 – 21 мая 2017 г., стр. 46-47.
19. Эмиров С.Н., Бейбалаев В.Д., Рамазанова А.Э., Амирова А.А., Ибрагимов О.И., Аливердиев А.А., Тепловые свойства минерального вещества в термобарических условиях литосферы // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" 23-26 октября 2017 г., Т. 2, стр. 152-155.
20. Эмиров С.Н., Бейбалаев В.Д., Гаджиев Г.Г., Рамазанова А.Э., Амирова А.А., Аливердиев А.А., К описанию температурной и барической зависимости теплопроводности керамики и песчаника, Материалы Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, 9-11 октября 2017 г., ISBN 978-5-383-01233-8 (Том 2), с. 334-335.
21. Эмиров С.Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А., Амирова А.А., Гаджиев Г.Г., Рамазанова А.Э., Малиева Ф.Ф., Расчет теплопроводности песчаника в зависимости от давления// Материалы XII Международной научной конференции

«Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики», приуроченная к 85-летию профессора М.Г. Алишаева, стр. 230-232.

22. Аливердиев А.А., Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э. Н., Расчет термодинамических характеристик на основе фрактального уравнения состояния на примере воды // Сборник докладов Седьмой Международной научной конференции “Химическая термодинамика и кинетика” 29 мая –2 июня 2017, Великий Новгород, стр. 7-10.
23. Мейланов Р.Р., Мейланов Р.П., Ахмедов Э.Н., Бейбалаев В.Д., Назаралиев М.Ш., Магомедов Р.А., Аливердиев А.А., О применении дробного исчисления к нелокальной неизотермической фильтрации // Материалы Международной Геотермальной Конференции ГЕОНЕАТ 05–08 сентября, 2017 Петропавловск-Камчатский **(принято к публикации)**

тезисы конференций:

24. Aliverdiev A.A., Batani D., Amirova A.A., Benocci R., Dezulian R., Krousky E., Pfeifer M., Ullschmied J., Skala J., Jakubowska K., About laser shocks dynamics for complex spot and structured targets // Abstracts of XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter March 1-6, 2017, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Section 1. Power Interaction with Matter, 36
25. Kurbanismailov V., Omarov O., Ragimhanov G., Khachalov M., Abdusalamov R.A., and Aliverdiev A., Study of kinetics of air photoplasma // VEIT 2017 International Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies, 25 - 29 September 2017, Sozopol, Bulgaria, PA–8.
26. Magomedov R.A., Meilanov R.R., Akhmedov E.N., Beybalaev V.D., Aliverdiev A.A., EOS calculation for Ar and water with the application of fractional order derivatives // Abstracts of XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter March 1-6, 2017, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Section 3. Equations of State for Matter, P. 83.
27. Magomedov R.A., Meilanov R.R., Akhmedov E.N., Beybalaev V.D., and Aliverdiev A.A., About the generalization of thermodynamics in fractional order derivatives // Abstracts of XXI International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia (RCCT 2017) and School Conference on Chemical Thermodynamics for Young Scientists, June 26-30, 2017, Akademgorodok, Novosibirsk, Russia (2017) P.85.
28. Meilanov R.R., Akhmedov E.N., Beybalaev V.D., Ragimkhanov G.B., Magomedov R.A., Meilanov R.P., Aliverdiev A.A., Application of fractional calculus for

local non-isothermal filtration // Abstracts of XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter March 1-6, 2017, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Section 2. Shock Waves, Detonation and Combustion, 127.

29. Aliverdiev A.A, Meilanov R.P., Meilanov R.R., Beybalaev V.D., Magomedov R.A., Nazaraliev M.-Sh.A., Akhmedov E.N., About the application of fractional calculus to the nonequilibrium process dynamics // Proc. of TMB-2017 (Turbulent Mixing and Beyond, Sixth International Conferenceб Tenth Anniversary Program), Abstracts, 14 - 18 August, 2017, the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Strada Costiera 11, Trieste, Italy, p. 77

Часть результатов находится в работе и будет представлена в последующих отчетах.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕРОДА ПРИ ДАВЛЕНИЯХ МЕГАБАРНОГО ДИАПАЗОНА

Экстремальные состояния углерода представляют интерес для многих областей физики и техники, включая астрофизику, планетологию, материаловедение, прикладную инженерию (в первую очередь в вопросах энергетики и УТС) и др. Важное явление металлизации жидкого углерода при высоких давлениях теоретически предсказывалось давно, но до сегодняшнего дня все еще существуют трудности с его экспериментальной проверкой. При высоких температурах было предсказано существование жидких фаз: от неметаллической при низких давлениях к полуметаллической и металлической при более высоких. Наиболее принятая на сегодняшний день фазовая диаграмма углерода Грюмбаха и Мартина [97] устанавливает структурное превращение в жидком углероде в металлическую фазу при давлениях порядка 4–10 мегабар.

Краткий отчет по этой части составлен по материалам ключевых публикаций [29, 30, 38], выполненных в рамках выполнения текущей темы, а также ряда совместных проектов с коллегами из университета Милана-Бикокка (Италия), CELIA (Франция), лаборатории LGM Миланского университета (Италия), ИТА (Трапани, Италия) и ILE (Осака, Япония). Эксперименты проводились с использованием лазерных установок LULI, PALS и GEKKO/HiPER. Совместная работа, в частности по недавним экспериментам, проведенным на установке PHELIX (Дармштадт) продолжается [95]. По мере опубликования результаты предполагается включить в дальнейшие отчеты.

Экспериментальные исследования, выполненные на установках PALS и LULI, проводились с использованием трехступенчатой мишени (см. рис. 1.1 б), в которой лазерный импульс суммарной интенсивности около 10^{14} Вт/см² создавал ударную волну, сжимающую материал мишени. Показанная на рисунке подложка из пенного пластика применялась в ряде мишеней для увеличения ударного давления при переходе ударной волны из менее плотной в более плотную среду.

Регистрация разрешенной по времени картины излучения посредством ЭОК осуществлялась с тыльной стороны. Далее, из полученных таким образом скоростей ударной волны для эталонного (алюминий) и исследуемого (углерод) веществ, пользуясь соотношениями Гюгонио-Ранкина, вычислялись все остальные величины: удельная внутренняя энергия E , плотность ρ , давление P и массовая скорость u [22].

В экспериментах, проведенных на установках LULI и впоследствии PHELIX, помимо фиксирования посредством ЭОП собственного излучения использовалась интерферометрическая фотохронографическая техника VISAR, позволяющая

непосредственно измерить массовую скорость для обоих веществ и одновременно «поймать» всплеск отражательной способности при металлизации. В экспериментах, проведенных в PALS, проводилась только регистрация собственного излучения с тыльной стороны мишени.

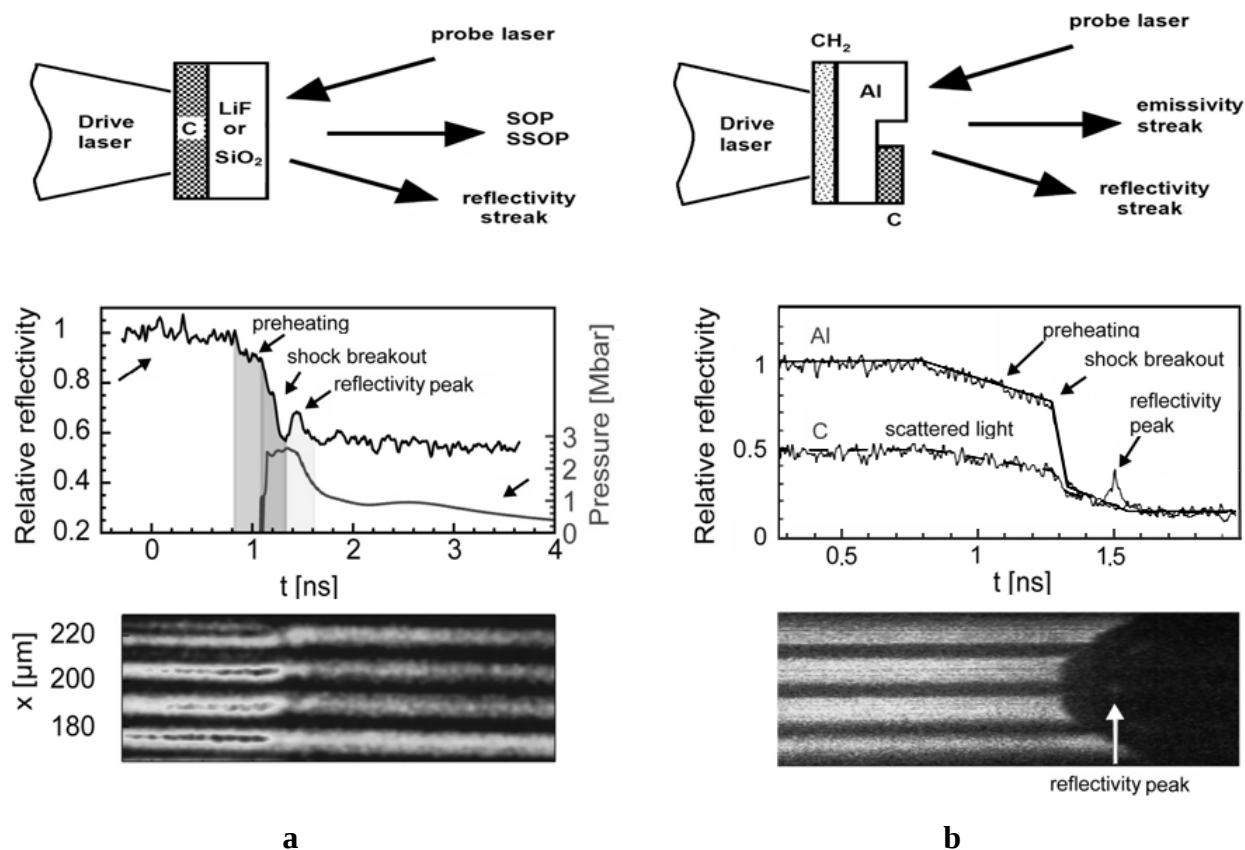


Рис. 1.1. Схемы экспериментов и основные результаты [29]

В экспериментах, проведенных на установке GEKKO/HiPER (Институт лазерной инженерии Университета Осаки, Япония), был опробован другой дизайн мишени (рис. 1.1., слева). Прозрачная подложка из более тяжелого (плотного) вещества позволила предотвратить возбуждение обратной волны разряжения при выходе ударной волны с тыльной стороны. Для диагностики также использовалась техника VISAR. Кроме того для измерения температуры использовались фотохронографический оптический пирометр и фотохронографический спектральный оптический пирометр. Подробное описание всей контрольно-измерительной техники и анализ основных экспериментальных результатов приводится в [30].

Следует особо отметить, что техническая реализация подобных экспериментов представляет собой достаточно непростую задачу, и практически всегда имеют место жесткие ограничения, накладываемые как на технические параметры (которые не всегда

могут варьироваться в нужном диапазоне), так и на количество и качество контрольно-измерительных средств. Причем если одни ограничения обусловлены возможностями конкретной лаборатории, то другие носят фундаментальный характер.

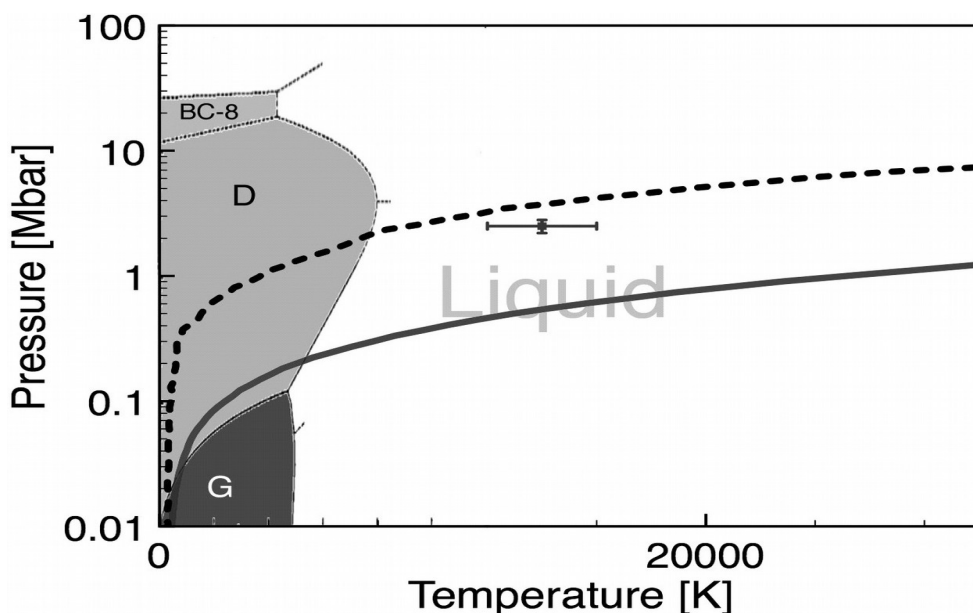


Рис. 1.2. Фазовая диаграмма углерода при высоких давлениях с указанием основных твердых фаз: графит (G), алмаз (D) и проводящая фаза с объемно-центрированной кубической решеткой с 8 атомами в элементарной ячейке (BC-8). Сплошной и пунктирной кривыми показаны ударные адиабаты Гюгонио для нормального и пористого (0.5 г/см^3) графита соответственно, и указана экспериментальная точка, в которой обнаружена металлизация в эксперименте на установке GEKKO/HiPER. [29]

Моделирование осуществлялось в среде гидрокода MULTI [24] с уравнениями состояния, взятыми в SESAME [100] или (для углерода с уменьшенной плотностью) рассчитанное с использованием MPQEOS [101].

Результаты моделирования использовались на всех этапах: как при планировании, так и в обработке и интерпретации результатов эксперимента.

Подробный анализ экспериментальных результатов, и дискуссией по обсуждаемым вопросам приведены в [29, 30, 38], а также ряде материалов конференций. Основные выводы следующие:

1. На основании результатов моделирования найдено что при интенсивностях лазерного излучения порядка 10^{14} Вт/см^2 и геометрии мишени, использованной в ряде недавних работ (толщина ступени мишени от 8 микрон для наименьшей ступени до 11.5+9.5 микрон для ступени «алюминий + углерод»), длительность гауссова импульса (на

уровне половины амплитуды) должна составлять не более 300 пс, или должен использоваться иной профиль с временем роста не более 150 пс. В противном случае необходим учет накладываемой ошибки.

2. Посредством фотохронографической интерферометрической диагностики (VISAR) экспериментально обнаружен всплеск отражательной способности углерода при давлениях порядка нескольких Мб и температурах 10-20 тыс. К, как на мишенях типа «алюминий-углерод», так и на мишенях типа «углерод-прозрачная подложка», что может являться свидетельством о металлизации жидкого углерода (см. рис 1.2)..

3. Оценены перспективы применения композитных мишеней с прозрачными подложками из SiO_2 (низкий порог собственной металлизации не дал положительного результата) и LiF (порог металлизации около 3 Мб позволил проводить исследования в диапазоне возможной металлизации жидкого углерода).

4. Проведен комплексный анализ, позволяющий судить об адекватности и точности реализованной экспериментальной методики, использующей двухслойную мишень («углерод-прозрачная подложка») и диагностической техники, состоящей из фотохронографических интерферометров, а также фотохронографического оптического и фотохронографического спектрального оптического пирометров. Результаты использованы в проведении дальнейших экспериментов. [95]

2. АВТОМОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Несмотря на то, что теоретические модели, описывающие динамику короны лазерной плазмы, построены достаточно давно, до сих пор имеется относительно мало надежных экспериментальных данных, и данный вопрос сохраняет актуальность. В продолжение анализа опубликованных в [26] экспериментальных результатов в выполненной в рамках выполнения настоящей темы работе [45] мы показали, что экспериментальные результаты для мишеней из золота укладываются в автомоделное решение и определили поправочные коэффициенты.

Измерительная система рассматриваемых экспериментов состояла из оптического интерферометра Маха-Цандера и электронно-оптическим преобразователем с пикосекундным разрешением. Пробный лазер на неодимовом гранате (вторая гармоника) был синхронизирован по времени с основной лазерной системой на неодимовом стекле (также с преобразованием на вторую гармонику). Временной профиль имел трапецидальную форму (~150-600-150 пикосекунд), диаметр достаточно однородного фокального пятна составлял 400 микрон. Двумерное моделированием, проведенное с использованием гидрокода MULTI [24], показало, что распространение плазмы при таких параметрах может рассматриваться в рамках одномерного приближения. В этом случае сдвиг фаз интерференционных полос на интерферометрических фотохронограммах равен

$$\Delta\phi_{plasma}(x,t) = \frac{2\pi L}{\lambda} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{n_e(x,t)}{n_c}} \right] \approx \frac{\pi L}{n_c \lambda} n_e(x,t) \text{ при } n_e \ll n_c,$$

где n_e - электронная плотность, n_c - критическая плотность, определяемая как:

$$n_c = \frac{4\pi^2 c^2 \epsilon_0 m_e}{\lambda^2 e^2}. \quad (2.1)$$

Здесь m_e - масса электрона, λ - длина волны лазера, e - элементарный заряд, c - скорость света, ϵ_0 - электрическая постоянная. Применяя метод прецизионного нахождения экстремумов, детально описанный в [10], в [6] удалось получить достаточно точные пространственно-временные профили электронной плотности плазмы короны. Простейшее автомоделное решение для одномерного распространения плазмы [11-14] даёт:

$$n_e(x,t) = n_c \exp\left[-\frac{1}{c_s} \frac{x}{t} \right], \quad (2.2)$$

где критическая плотность n_c также задается выражением (2.1), а скорость звука c_s вычисляется как:

$$c_s \text{ (см/с)} = 9.79 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{\gamma Z^* T_e \text{ (эВ)}}{\mu}} \quad (2.3)$$

В выражениях (2.2)-(2.3) γ – постоянная адиабаты, μ – атомная масса. Степень ионизации Z^* может быть вычислена по формуле Коломбана-Тонона [15], а электронная температура находится как $T_e \text{ (эВ)} = 10^{-6} (I_L \text{ (Вт/см}^2) \lambda^2 \text{ (мкм)})^{2/3}$, где $I_L \text{ (Вт/см}^2)$ и $\lambda \text{ (мкм)}$ – соответственно интенсивность и длина волны лазера.

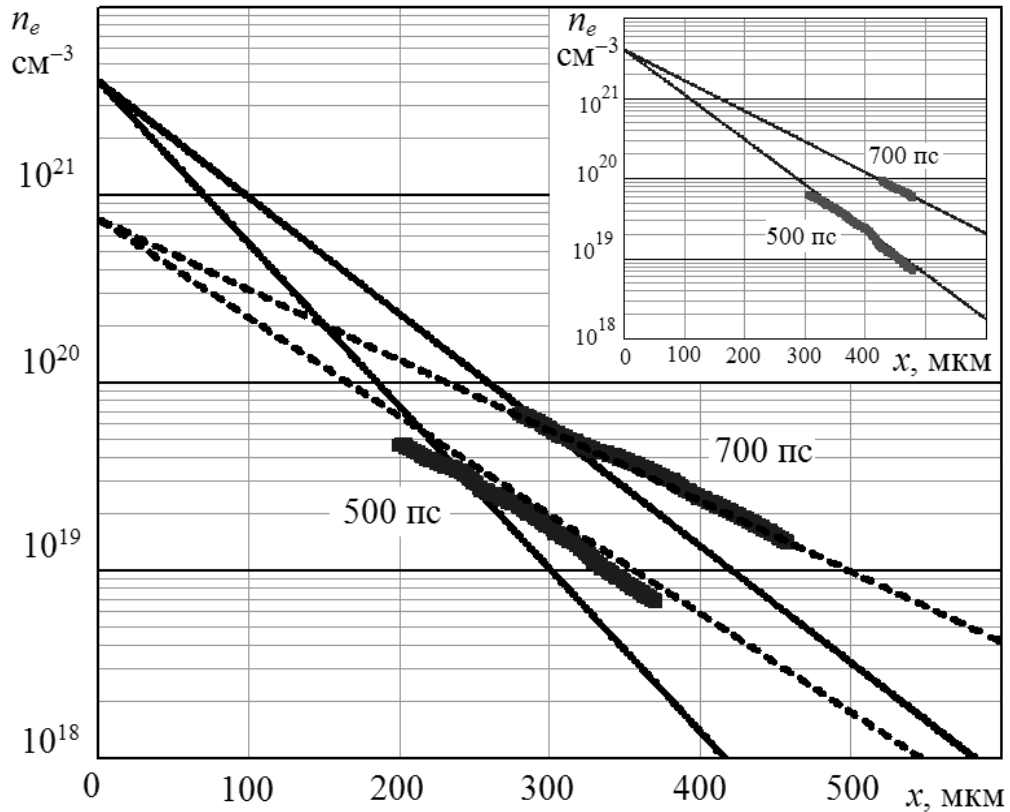


Рис. 2.1. Экспериментальные зависимости $n_e(x)$ при фиксированных моментах времени (500 и 700 пикосекунд) для выстрела с мишенью из золота и интенсивностью лазера $5,5 \cdot 10^{13} \text{ Вт/см}^2$ (черные квадраты) в сравнении с расчетами, выполненными согласно формулам (2) и (4) (сплошные и пунктирные линии соответственно). На вкладке для сравнения приведены результаты для мишени из алюминия при сходной интенсивности лазера ($5,3 \cdot 10^{13} \text{ Вт/см}^2$), где расчет по формуле (2) в рассматриваемом диапазоне полностью описывает эксперимент.

Экспериментальные результаты для пластиковых и алюминиевых мишеней (принимая во внимание сдвиг начала отчета по временной шкале около 75 пикосекунд в целях учета и компенсации трапецеидальной формы лазерного импульса) оказались в

блестящем согласии автомоделным приближением (см. вкладку рис. 2.1). В то же время как для мишеней из золота наблюдались достаточно большие расхождения, причину которых, скорее всего, следует искать в существенно большем влиянии лучистого теплообмена с увеличением атомного номера Z . В [26] это предположение иллюстрировалось одномерным численным моделированием, также проведенным с использованием гидрокода MULTI. Действительно экспериментальные результаты укладывались в достаточно широкий диапазон между различными приближениями (наличия или отсутствия локального термодинамического равновесия), хотя ни одно из приближений не позволило достаточно точно описать полученные зависимости.

Вместе с тем, как видно из рис. 2.1. (а также других опубликованных в [26] других экспериментальных данных), зависимость $n_e(x, t)$ и для золота достаточно точно аппроксимируется как

$$\ln(n_e(x, t)) = b_0(t) - b_1(t)x,$$

где при $t > 450$ пс зависимости $b_0(t)$ и $b_1(t)$, найденные методом наименьших квадратов, принимают вид: $b_0 \approx \text{const}$, $b_1 \sim \frac{1}{t}$. Таким образом, несмотря на очевидную сложность процессов, протекающих в лазерной плазме, сохраняется достаточно простое автомоделное описание:

$$n_e(x, t) = n_c^* \exp\left[-\frac{1}{c_s^*} \frac{x}{t}\right], \quad (2.4)$$

где при интенсивности лазерного излучения $5,5 \cdot 10^{13}$ Вт/см² вводятся следующие параметры: $n_c^* \approx 0.185n_c$, $c_s^* \approx 1.65c_s$, а величины n_c и c_s как и ранее вычисляются согласно (2.1) и (2.3) соответственно. Следует особо отметить, что в приведенных на рисунке 1 графиках критическая плотность n_c и скорость звука c_s вычислялись без каких-либо подгоночных параметров.

В заключение можно сделать вывод, что хотя для понимания физического смысла n_c^* и c_s^* в выражении (2.4) требуются дальнейшие, в первую очередь экспериментальные, исследования, включающие расширение диапазона интенсивностей лазерного излучения, использование разных длин волн, а также варьирование диагностических техник, установлено простое, но вместе с тем точное описание экспериментальных зависимостей $n_e(x, t)$ лазерной плазмы.

3. ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО УДАРНОГО СЖАТИЯ КОМПОЗИТНОЙ МИШЕНИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ДВОЙНЫМ ФОКАЛЬНЫМ ПЯТНОМ

Структурированные мишени с пенным абляционным слоем уже давно исследуются как на предмет увеличения ударного давления при переходе [102], так и для повышения однородности поглощения [103]. Нами была поставлена задача проследить пространственно-временную динамику лазерного ударного сжатия слоистых структурированных мишеней различных конфигураций в условиях искусственно созданной сильной неоднородности фокального пятна. Материал данной главы написан на основе совместных работ [28, 32, 40, 41 и др.], включая публикации 2017 года.

3.1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент реализовывался на лазерной установке PALS (Prague Asterix Laser System) [69].

Луч основного лазера делился призмой на две приблизительно равных части, которые фокусировались на мишени в виде двух фокальных пятен, диаметр каждого из которых составлял около 30 мкм. Расстояние между центрами пятен составляло около 100 мкм. Таким образом, создавалась сильная неоднородность, которую априори очень трудно сгладить. Использовался одноканальный йодный лазер с длиной волны излучения 0,438 мкм на третьей гармонике. Максимальная энергия в импульсе составляла 400 Дж на поверхности мишени, длительность импульса по полувысоте интенсивности – 400 пс. Система характеризовалась хорошей стабильностью параметров лазерного излучения от выстрела к выстрелу, а также достаточно однородным пространственным распределением интенсивности по каждому из двух фокальных пятен.

Диагностический комплекс описан в [28]. ЭОК регистрировала оптическое свечение тыльной стороны мишени. Для отсекающего электромагнитного излучения третьей гармоники основного лазера перед ЭОК был установлен красный фильтр RG60. Пространственное разрешение спаренной с ЭОК CCD камеры составляло 2,6 мкм/пиксель, временное – 3,12 пс/пиксель. Расположенная в плоскости мишени рентгеновская электронно-оптическая камера позволяла также получать изображения процесса распространения фронта рентгеновского излучения по толщине мишени. Использовались двухслойные мишени (малоплотная пена различной плотности и состава (50 мкм) + алюминиевая фольга (10 мкм)), а также (для сравнения) простые однослойные алюминиевые мишени (также 10 мкм толщины).

3.2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Один из важнейших результатов состоял в найденной разнице разрешенных по времени ЭОК изображений для однослойных алюминиевых и двухслойных мишеней (см. рис. 3.1, 3.2).

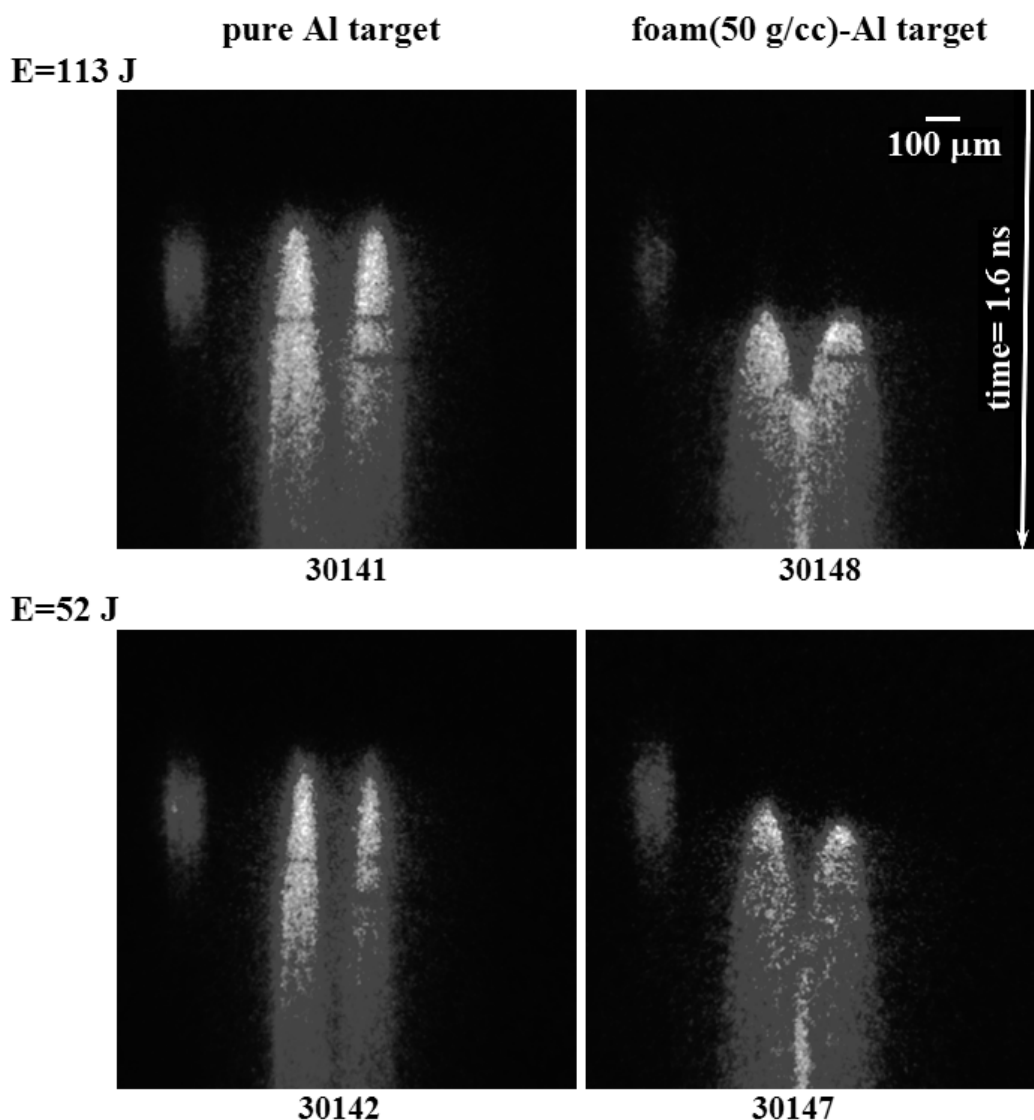


Рис.3.1. Изображения, полученные ЭОК с тыльной стороны мишени: а) монослойная алюминиевая мишень (10 мкм), б) двухслойная мишень алюминий + пенный полимер (10 мкм + 50 мкм), плотность полимера $\rho_{\text{foam}}=50\ \text{мг/см}^3$. Энергия лазерного импульса одинакова для обоих выстрелов 113 Дж.

Если в мишенях из однослойной алюминиевой фольги две ударные волны, генерируемые отдельными фокальными пятнами, практически независимо достигали тыльной стороны мишени (собственное оптическое свечение, соответствующее двум фокальным пятнам, не перекрывается), то в двухслойных мишенях имело место появление ярко выраженной области свечения между двумя фокальными пятнами.

Очевидно, что появление ярко выраженной области свечения между двумя фокальными пятнами не может быть объяснено в рамках одномерной модели.

При осевой симметрии (используемой для 2D моделирования) сильная неоднородность, аналогичная двум разнесенным фокальным пятнам, моделировалась кольцевым фокальным пятном. Рис. 3.2 представляет распределение давления в алюминии для однослойной (вверху) и двухслойной (внизу) мишеней в моменты, когда ударная волна достигает тыльной стороны мишени в кольцевой области фокального пятна (слева) и в «темном» центре (справа). Для лучшей наглядности данные приведены в лагранжевой системе координат. Распределение плотности для момента времени, соответствующего рис. 3.3d, по которому мы можем оценить деформацию мишени, представлено на рис. 3.4.

При достижении ударной волной тыльной стороны мишени, в обоих случаях давление падает из-за отраженной волны разгрузки. Однако прослеживается отчетливая разница давления в центральном регионе для однослойной и композитной мишеней.

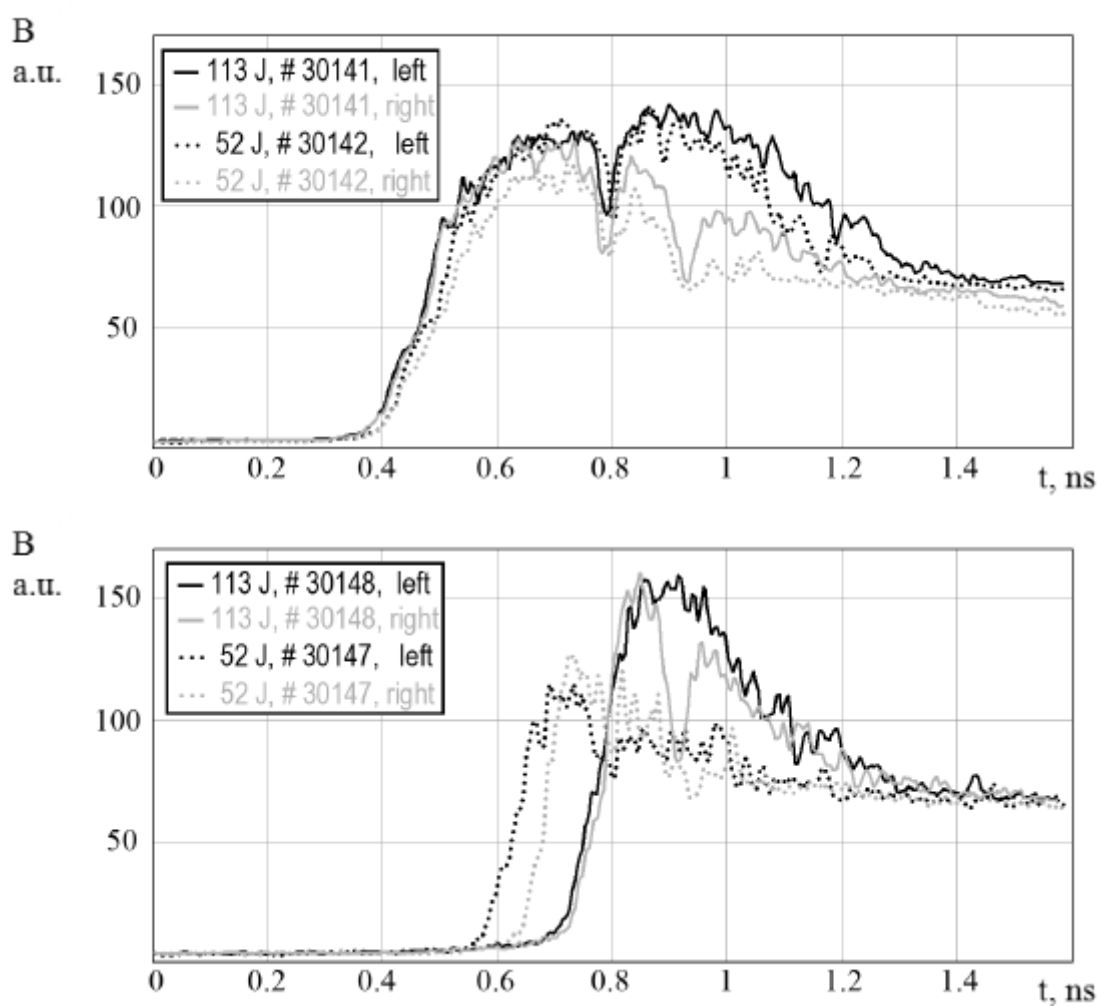


Рис.3.2. Пространственно-интегрированная временная зависимость собственного излучения с тыльной стороны мишени.

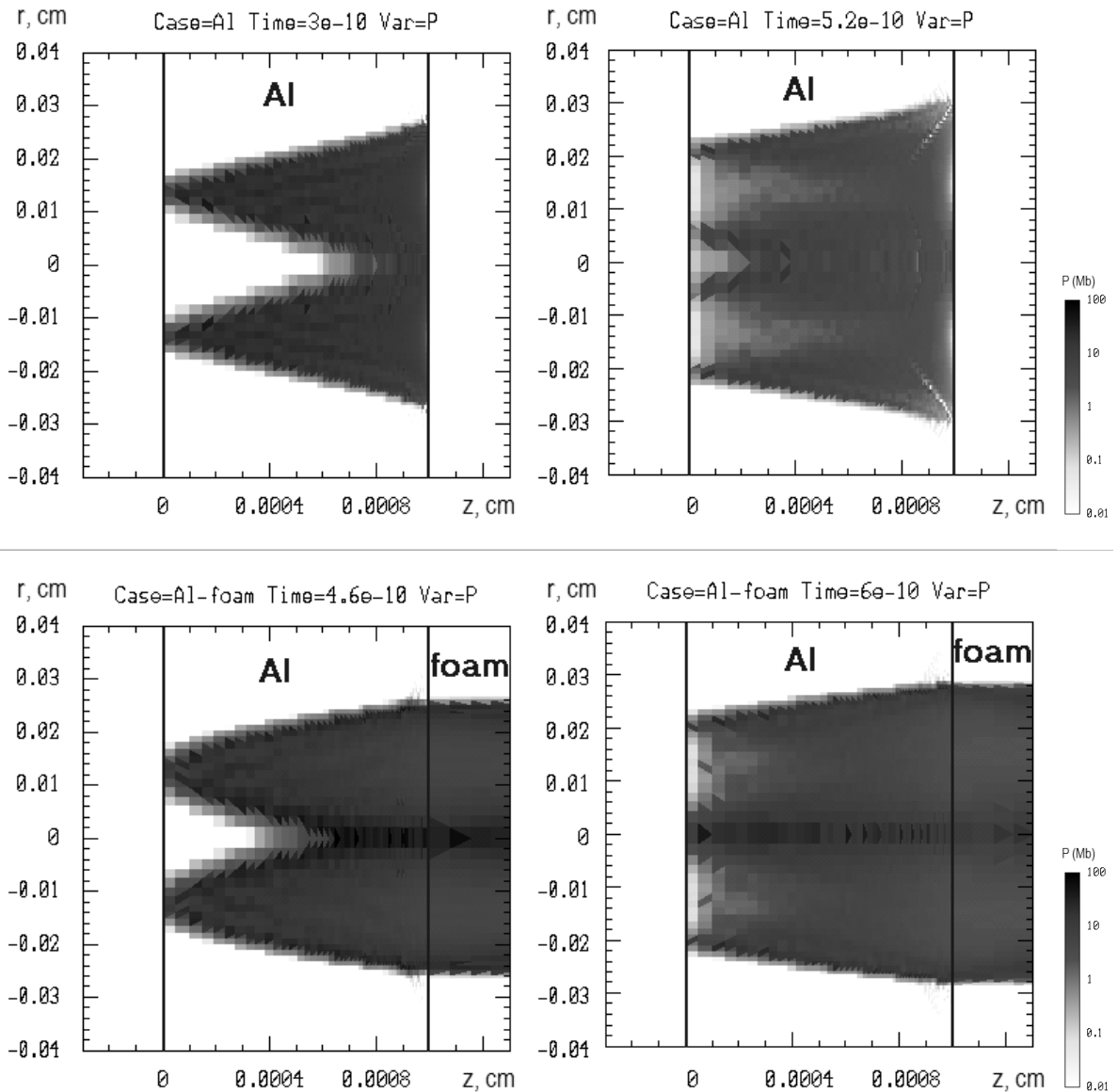


Рис.3.3. Профили давления в алюминии для однослойной алюминиевой мишени (вверху) и двухслойной мишени алюминий + малоплотный пенный полимер (10 мкм + 50 мкм, плотность полимера $\rho_{\text{foam}}=50 \text{ мкм}/\text{см}^3$) (внизу) для моментов достижения ударной волны тыльной стороны для участков максимальной интенсивности (слева) и средней части (справа). Данные приведены в лагранжевой системе координат. При моделировании использовался кольцевой пространственный профиль фокального пятна (гауссов профиль по полувысоте интенсивности диаметром 50 мкм около окружности диаметра 300 мкм, мощность лазерного импульса $P=0.2 \text{ TW}$, длина волны $\lambda=0.44 \text{ мкм}$, гауссов временной профиль длительностью по полувысоте интенсивности $\tau=400 \text{ пс}$). Лазерный импульс приходит справа, вверху указано время снимка.

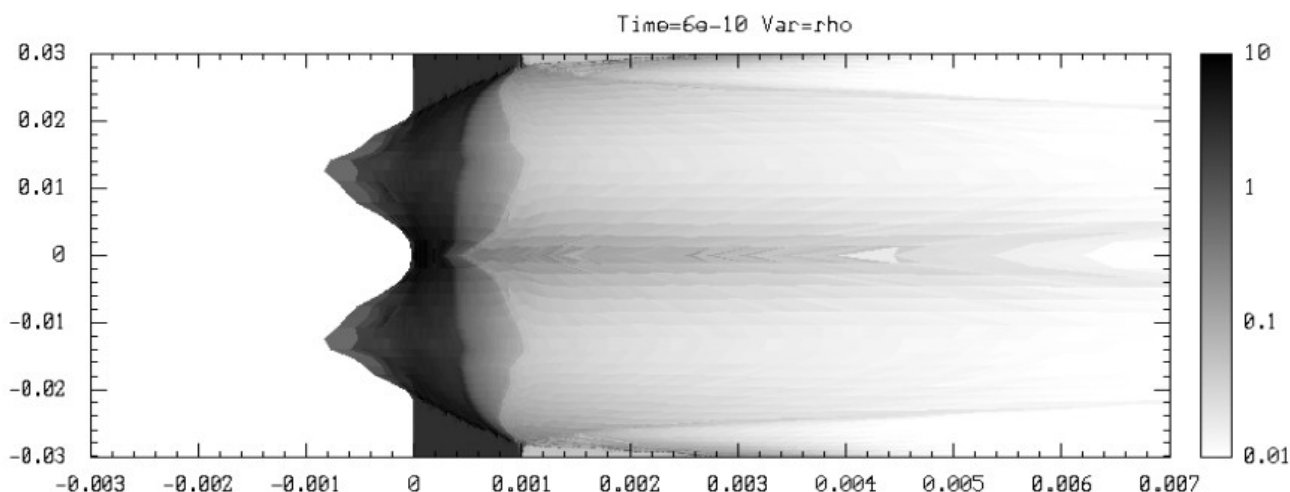


Рис.3.4. Распределение плотности (шкала справа в $г/см^3$) для двухслойной мишени. Те же параметры, что на рис. 3.2. Данные приведены в декартовой системе координат. Следует обратить внимание на разницу в масштабах по осям координат.

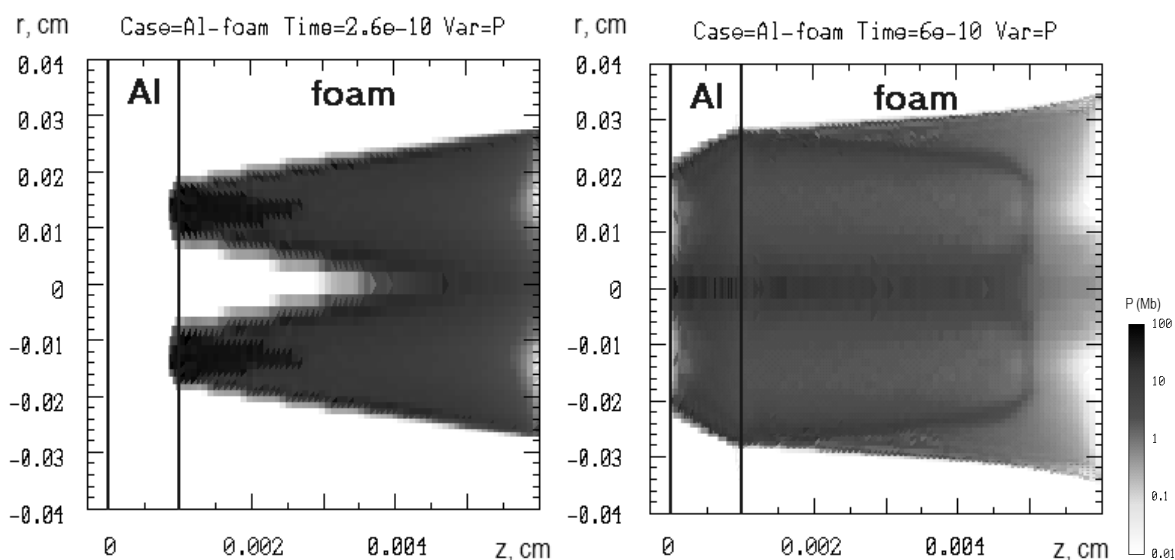


Рис.3.5. Профили давления для двухслойной мишени. Те же параметры, что на рис. 2. Данные приведены в лагранжевой системе координат.

На рис. 3.5 показано распределение давления в обоих слоях двухслойной мишени. Как видно из этого рисунка, ударные волны, отраженные от границы полимер-алюминий продолжают сжимать полимерную ступень, и их дальнейшее столкновение создает область высокого давления в центре, а это, в свою очередь, поддерживает давление в соответствующей части алюминиевой ступни.

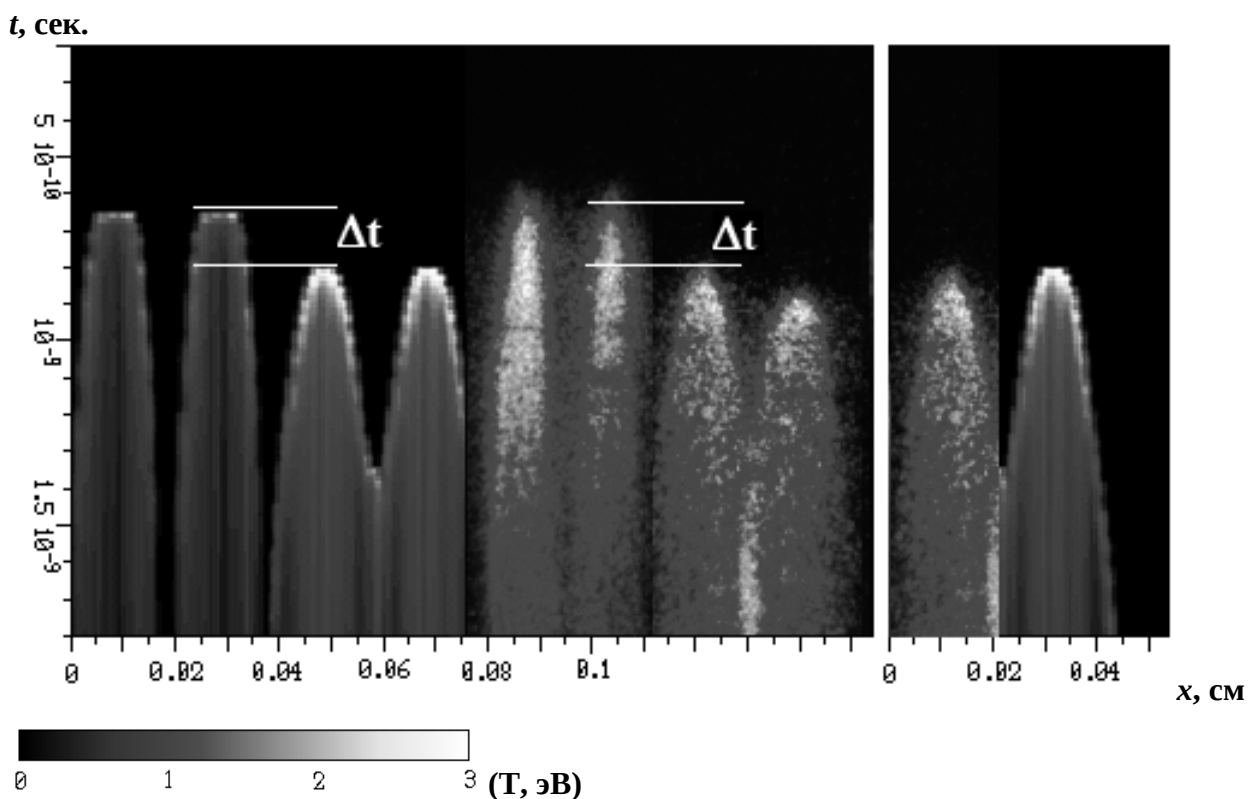


Рис. 3.5. Сравнение результатов моделирования (температура, эВ, шкала приведена внизу) и ЭОК-изображений с тыльной стороны мишени (относительные единицы) для однослойной алюминиевой мишени (10 мкм, слева) и двухслойной мишени алюминий + пенный полимер (10 мкм + 50 мкм, плотность полимера $\rho_{\text{foam}}=50$ мг/см³, справа).

В первичных оценках в приближении осевой симметрии (для 2D моделирования) сильная неоднородность, аналогичная двум разнесенным фокальным пятнам была представлена в виде кольцевого фокального пятна. Важная при такой конфигурации область центра кольца является наиболее подверженной неустойчивостям моделирования, связанным с дискретизацией. В этой связи в дальнейшем анализе рассматривался пространственный профиль фокального пятна, состоящий из двух колец большого диаметра и круглого пятна посередине (см. рис. 3.6). Толщина колец и диаметр внутреннего круга выбирались близкими к размерам каждого из фокальных пятен в обсуждаемом эксперименте. Анализировалось столкновение ударных волн между кольцами. Центральное пятно использовалось для дополнительного контроля и минимизации возможных 2D и 3D эффектов в условиях неполного соответствия геометрии эксперимента и модели.

Работа по количественному описанию экспериментальных результатов продолжают (включая описание особенностей возбуждения и распространения ударной волны в пористом материале), результаты будут представлены в итоговом отчете.

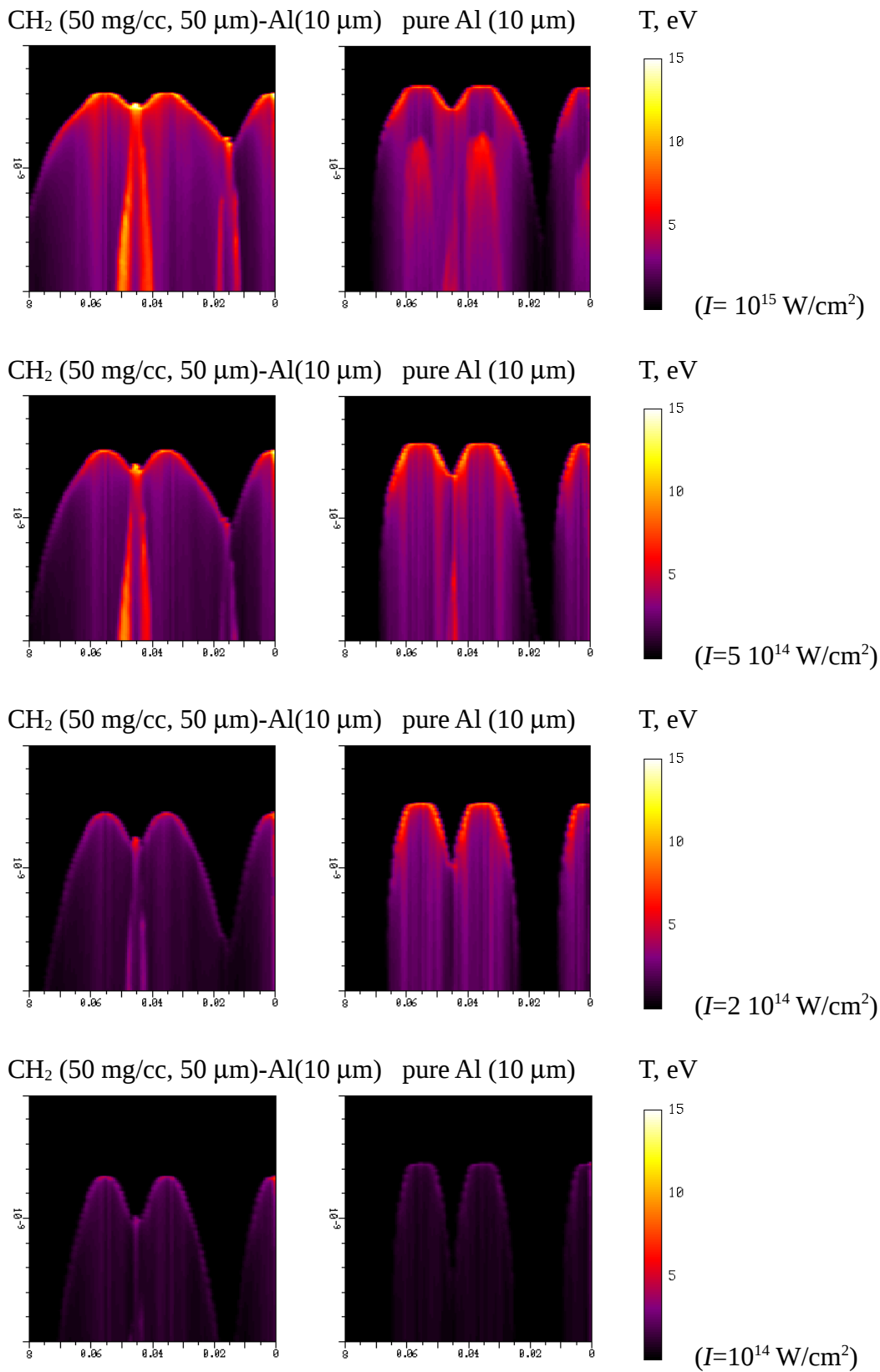


Рис.3.6. Температура тыльной стороны мишени как функция от времени и радиуса (справа налево) для мишеней алюминий-пена ($\rho_{\text{foam}} = 50 \text{ мг/см}^3$, слева) и чистый алюминий (справа) для разных интенсивностей. Моделирование проводилось с пятном, состоящим из двух concentрических полос и круговым пятном в центре.

4. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В СРЕДАХ С ВЫРАЖЕННЫМИ НЕЛОКАЛЬНЫМИ ЭФФЕКТАМИ

4.1. К ПРИМЕНЕНИЮ ДРОБНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ К НЕЛОКАЛЬНОЙ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Наличие нелокальных эффектов памяти, сильных пространственных корреляций и самоорганизации в пористых многофазных структурах затрудняет математическое описание и моделирование процессов в подобных средах. Как показано, в нашей недавней публикации за 2017 год [33], одним из перспективных путей является применение к подобным задачам аппарата дробных производных.

Исходя из обобщения в производных дробного порядка закона Дарси [104, 105] в линейном приближении по возмущениям температуры и давления неизотермическая фильтрация может быть описана следующей системой уравнений для давления (P) и температуры (T):

$$\frac{\partial^\alpha P(\xi, \tau)}{\partial \tau^\alpha} - D_p(\xi, \tau) \frac{\partial^\beta P(\xi, \tau)}{\partial \xi^\beta} = \frac{P(\xi, 0)}{\Gamma(1-\alpha)\tau^\alpha} + \frac{\beta/\alpha}{\rho_0} T(\xi, \tau) \frac{\partial^\alpha P(\xi, \tau)}{\partial \tau^\alpha}, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial^\alpha T(\xi, \tau)}{\partial \tau^\alpha} - D_T(\xi, \tau) \frac{\partial^\beta P(\xi, \tau)}{\partial \xi^\beta} = \frac{T(\xi, 0)}{\Gamma(1-\alpha)\tau^\alpha} + \frac{\beta/\alpha}{c_p \rho_0} T(\xi, 0) \frac{\partial^\alpha P(\xi, \tau)}{\partial \tau^\alpha},$$

где

$$\frac{\partial^\alpha T(\xi, \tau)}{\partial \tau^\alpha} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^\tau \frac{T(\xi, z)}{(\tau-z)^\alpha} dz - \frac{T(\xi, 0)}{\Gamma(1-\alpha)\tau^\alpha}, \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial^\beta T(\xi, \tau)}{\partial \xi^\beta} = \frac{1}{2\Gamma(2-\beta) \cos\left(\frac{\pi}{2}(2-\beta)\right)} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{T(\xi', \tau)}{|\xi - \xi'|^{(\beta-1)}} d\xi' \quad (4.3)$$

производные дробного порядка, учитывающие временную(4.2) и пространственную (4.3) нелокальности.

Здесь $|\xi| < \infty$; $\tau > 0$; $0 < \alpha \leq 1$; $0 < \beta \leq 2$; $\tau = t/t_0$; $\xi = x/x_0$ – безразмерные время и координата, t_0 , x_0 – характерные время и масштаб, μ – вязкость жидкости, λ – теплопроводность, ρ – плотность, c_p – теплоемкость при постоянном давлении, β – коэффициент теплового расширения, $\tilde{\alpha}$ – коэффициент изотермической сжимаемости,

$\chi = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ - температуропроводность, $D_p(\xi, \tau) = \frac{l_0^2}{t_0} \frac{k^{\beta_0} \beta(\xi, \tau)}{m \rho_0 \mu \beta_0}$, $D_T(\xi, \tau) = \frac{l_0^2}{t_0} \frac{\lambda}{c_p \rho}$, $\Gamma(x)$ -

Гамма функция Эйлера.

Преобразование Лапласа по времени и Фурье по координате к системе (4.1) дают:

$$\bar{\bar{P}}_{LF}(k, s) = \frac{\bar{P}_F^{\beta_0}(k, 0)}{s^{1-\alpha} (s^\alpha + \bar{D}_P^{\beta_0}(k))} + \frac{\beta_0}{\beta_0 s^\alpha + \bar{D}_P^{\beta_0}(k)} \frac{\bar{T}_F^{\beta_0}(k, 0)}{s^{1-\alpha} (s^\alpha + \bar{D}_T^{\beta_0}(k))}, \quad (4.4)$$

$$\bar{\bar{T}}_{LF}(k, s) = \frac{\bar{T}_F^{\beta_0}(k, 0)}{s^{1-\alpha} (s^\alpha + \bar{D}_T^{\beta_0}(k))} + \frac{\beta_0}{c_p \rho_0} \int_{-\infty}^{\infty} dk' \bar{P}_F^{\beta_0}(k-k', 0) \frac{s^\alpha}{s^\alpha (s^\alpha + \bar{D}_T^{\beta_0}(k))} \frac{\bar{P}_F^{\beta_0}(k', 0)}{s^{1-\alpha} (s^\alpha + \bar{D}_P^{\beta_0}(k'))}.$$

Применив к (4.4) обратные преобразования Фурье и Лапласа, окончательно имеем:

$$P(\xi, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk \int_{-\infty}^{\infty} d\xi' e^{ik(\xi-\xi')} P(\xi', 0) E_{\alpha,1}(-\bar{D}_P^{\beta_0}(k)\tau^\alpha) - \frac{\beta_0}{\beta_0(d-\chi)} \frac{1}{2\pi} \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} dk \int_{-\infty}^{\infty} d\xi' T(\xi', 0) e^{ik(\xi-\xi')} [dE_{\alpha,1}(-\bar{D}_P^{\beta_0}(k)\tau^\alpha) - \chi E_{\alpha,1}(-\bar{D}_T^{\beta_0}(k)\tau^\alpha)] \quad (4.5)$$

$$T(\xi, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk \int_{-\infty}^{\infty} d\xi' e^{ik(\xi-\xi')} T(\xi', 0) E_{\alpha,1}(-\bar{D}_T^{\beta_0}(k)\tau^\alpha) - \\ - \frac{\beta_0}{c_p \rho_0} \int_{-\infty}^{\infty} dk \int_{-\infty}^{\infty} dk' \int_{-\infty}^{\infty} d\xi' \int_{-\infty}^{\infty} d\xi'' \frac{e^{ik(\xi-\xi')} e^{ik'(\xi'-\xi'')}}{\bar{D}_T^{\beta_0}(k) - \bar{D}_P^{\beta_0}(k')} \times \\ \times T(\xi', 0) P(\xi'', 0) \xi [\bar{D}_P^{\beta_0}(k') E_{\alpha,1}(-\bar{D}_P^{\beta_0}(k')\tau^\alpha) - \bar{D}_T^{\beta_0}(k) E_{\alpha,1}(-\bar{D}_T^{\beta_0}(k)\tau^\alpha)]$$

где $\bar{D}_P^{\beta_0}(k) = \frac{l_0^2}{t_0} \frac{k^{\beta_0}}{m \mu \beta_0} |k|^\beta = d |k|^\beta$, $\bar{D}_T^{\beta_0}(k) = \frac{l_0^2}{t_0} \frac{\lambda}{c_p \rho} |k|^\beta = \chi |k|^\beta$.

Таким образом, полученное решение (4.5) дает возможность описать процесс неизотермической фильтрации с учетом нелокальных эффектов как по координате, так и по времени.

Если выбрать начальные условия $P(\xi, 0) = P_0 \delta(\xi)$, $T(\xi, 0) = T_0 \delta(\xi)$, что соответствует резкому изменению (повышению) температуры и давления (взрыв), из (4.5) имеем:

$$P(\xi, \tau) = \frac{P_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ik\xi} dE_{\alpha,1}(-d |k|^\beta \tau^\alpha) - \frac{\beta_0}{\beta_0(d-\chi)} \frac{T_0}{2\pi} \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ik\xi} (dE_{\alpha,1}(-d |k|^\beta \tau^\alpha) - \chi E_{\alpha,1}(-\chi |k|^\beta \tau^\alpha)) ,$$

$$T(\xi, \tau) = \frac{T_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ik\xi} d E_{\alpha,1}(-\chi |k|^\beta \tau^\alpha) + \frac{\beta_0}{c_p \rho_0} \frac{P_0 T_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk dk' \frac{e^{ik\xi}}{\chi |k|^\beta - d |k'|^\beta} \times \\ \times (d |k'|^\beta E_{\alpha,1}(-d |k'|^\beta \tau^\alpha) - \chi |k|^\beta E_{\alpha,1}(-\chi |k|^\beta \tau^\alpha))$$

В этом случае, как изменение давления, так и изменение температуры зависят от разности $(d - \chi)$, причем для температуры эта зависимость имеет нелинейный характер.

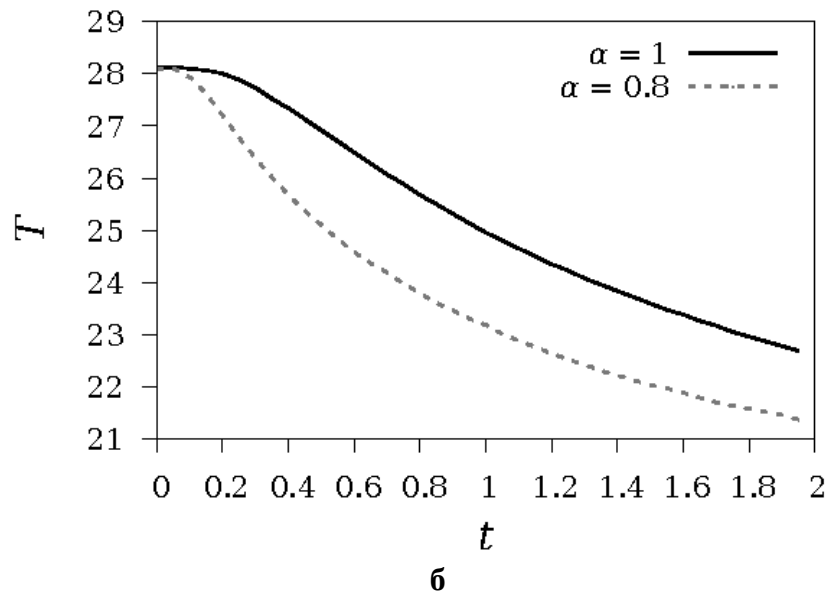
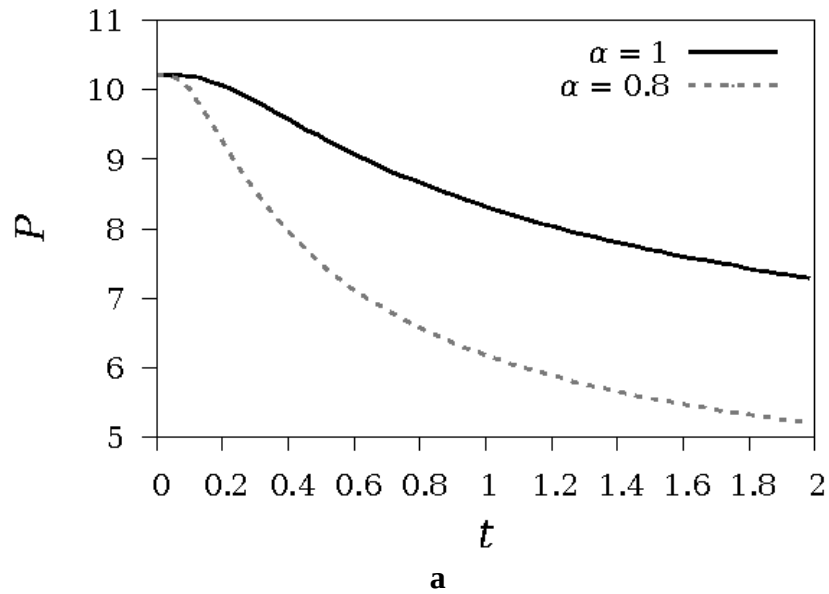


Рис.4.1.

На рисунке 4.1 [33] представлены диаграммы решений (2.7) для распределения давления и температуры (в безразмерных величинах) от времени. Расчеты выполнены для фиксированной точки с начальным давлением $P(\xi,0)=10.1$ и температурой $T(\xi,0) = 28$. Как

можно заметить, переход к дробным производным описывает более быстрое снижение давления и температуры.

4.2. О ТЕМПЕРАТУРНЫХ И БАРИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Процесс переноса тепла в твёрдых телах с упорядоченной кристаллической структурой носит волновой характер, описывается моделями Эйкина и Дебая и имеет температурную зависимость $\lambda \sim T^{-1}$, в то время как процесс переноса тепла в твёрдых телах с аморфной структурой носит активационный характер (т.е. передача тепла от атома к атому) и имеет температурную зависимость $\lambda \sim T^{0.5}$. В неупорядоченных кристаллических твёрдых телах атомы занимают правильное положение в узлах кристаллической решётки, но порядок расположения атомов различных сортов не соблюдается. Таким образом, в неупорядоченных структурах массы атомов и их силовые константы беспорядочно меняются от узла к узлу, что вызывает дополнительное рассеяние тепловых волн (фононов). Такие вещества являются переходными между кристаллическими и аморфными твёрдыми телами, которые от первых сохранили правильную решётку, а от вторых - имеют неупорядоченный характер расположения атомов разных сортов в узлах этой решётки. Кроме того, значительное влияние на величину эффективной теплопроводности λ оказывают границы блоков и дефекты кристаллической решётки. Это приводит к сложному характеру процесса теплопереноса в неупорядоченных структурах.

Проведенный в наших недавних публикациях за 2017 год [34, 43, 80-85] анализ экспериментальных и теоретических работ показывает, что температурная зависимость теплопроводности горных пород хорошо описывается степенным законом:

$$\frac{\lambda(T, P)}{\lambda(T_0, P)} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{n(P)}. \quad (4.6)$$

Причем показатель степени n обычно находится в достаточно узкой области от -0.5 до 0.5. При гидростатическом сжатии в горной породе возникают внутренние напряжения, которые вызывают изменение ее объема и упругих параметров решетки. При этом в горных породах под воздействием внутренних напряжений развиваются продольные и поперечные деформации. Учет и описание влияния высокого давления на теплофизические свойства горных пород имеет большое как фундаментальное, так и прикладное значение, что делает актуальной тему данной работы.

Рисунок 4.2 демонстрирует барические зависимости величин, входящих в уравнение (4.6), для ряда горных пород, проанализированных нами в [34, 43, 80-85] (часть работ, включая всю экспериментальную составляющую, проводилась коллегами в рамках выполнения другой темы).

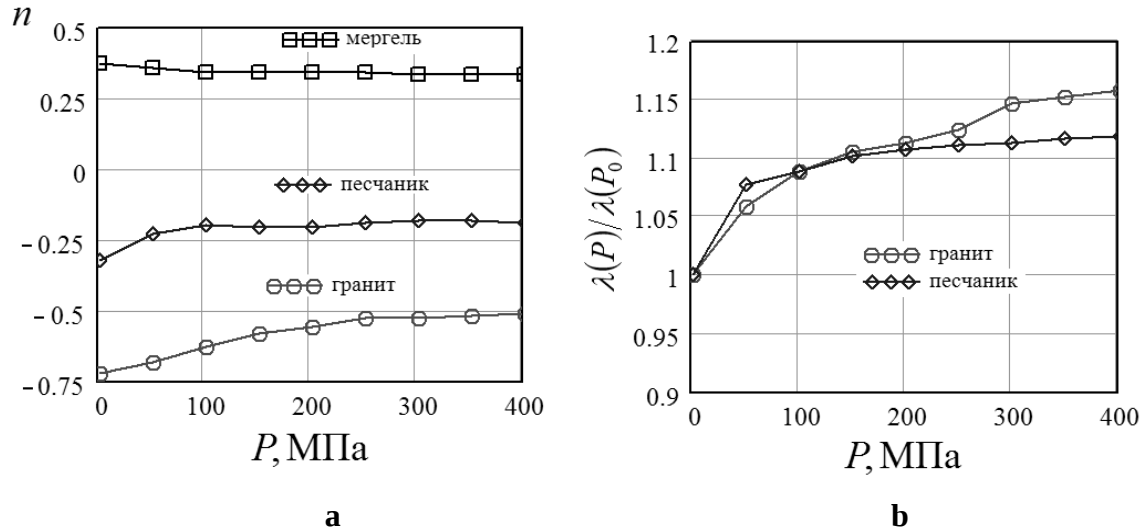


Рис. 4.2.

Как показали наши оценки, барические зависимости теплопроводности при постоянной температуре имеют нелинейный и сложный (хотя и достаточно сходный для широкого класса естественных и искусственных композитных материалов) характер. Для оценки их в виде степенного закона от относительного давления нами получено следующее соотношение:

$$\lambda(T, P) = \lambda_0 \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{0.132 \Delta \lambda_P}{\lambda_0}} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{1.54 \Delta \lambda_T}{\lambda_0}} \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.65 \ln(\lambda_0 / (\lambda_0 + \Delta \lambda_P))},$$

где $\Delta \lambda_P$ - среднее суммарное приращение теплопроводности при постоянном давлении, $\Delta \lambda_T$ - среднее суммарное приращение теплопроводности при постоянной температуре, $\lambda_0 = \lambda(T_0, P_0)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения проекта был получен ряд новых оригинальных результатов, несущих научную новизну, и имеющих фундаментальное и прикладное значение. В частности:

1. Совместно с зарубежными коллегами обнаружены скачки отражательной способности углерода при высоких давлениях и температурах, указывающие на металлизацию жидкого углерода. [30,31]

2. Оценены необходимые пространственно-временные характеристики лазерного драйвера в экспериментах по определению уравнения состояния методом преград. [38]

2. На основании данных моделирования обосновано получение экстремальных состояний вне ударной адиабаты Гюгонио в слоистых мишенях. [27] Продолжается работа над интерпретацией полученных в 2016 г. экспериментальных данных. [96]

3. Получены новые данные по исследованию процессов, происходящих при лазерном ударном сжатии простой и комплексной мишени при использовании двойного или комплексного фокального пятна. [28, 32, 40, 41]

4. Проведен анализ пространственно-временной зависимости электронной плотности короны лазерной плазмы при размере фокального пятна, достаточном для одномерного приближения. Найдены поправочные коэффициенты для автомоделного приближения. [45]

5. Проведено описание процессов неизотермической фильтрации на основе дробного исчисления, обеспечивающее естественный учет пространственной (эффект корреляций) и временной (эффект памяти) нелокальности. Показано, что использование различных значений параметров показателей дробного порядка позволяет найти решение, соответствующее описанию реальных процессов.

Из основных результатов за промежуточный 2017 год можно выделить:

1. Сравнительный анализ результатов моделирования с экспериментальными данными при разных плотностях и составах первого слоя мишени. [32]

2. Описание процессов неизотермической фильтрации на основе дробного исчисления, обеспечивающее естественный учет пространственной (эффект корреляций) и временной (эффект памяти) нелокальности. [33]

3. Анализ и описание экспериментальных зависимостей теплопроводности от давления и температуры для горных пород и керамик. [34]

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. В. Бушман, В.Е. Фортов, Модели уравнения состояния вещества // УФН, том 140, вып.2, 1983, С. 180-232.
2. J. Lindl, Development of indirect-drive approach to inertial confinement fusion and target physics basis for ignition and gain // Phys. Plasmas, 2, 1995, pp. 3933-4024.
3. P.M. Celliers, G.W. Collins, L.B. Da Silva, D.M. Gold, R. Cauble, R.J. Wallace, M.E. Foord, & Hammel, B.A. Shock induced transformations of liquid deuterium into a metallic fluid. Phys. Rev. Lett. 84, 2000, pp. 5564–5567.
4. B.A. Remington, R.P. Drake, H. Takabe, & D. Arnett // A review of astrophysics experiments on intense lasers. Phys. Plasmas 7, 2000, pp. 1641'1652.
5. D.H.H. Hoffmann, A. Blazevic, P. Ni, O. Rosmej, M. Roth, N.A. Tahir, A. Tauschwitz, S. Udrea, D. Varentsov, K. Weyrich, & Y. Maron, // Present and future perspectives for high energy density physics with intense heavy ion and laser beams. Laser Part. Beams 23, 2005, 47-53.
6. В.Е. Фортов. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // УФН, том 177, вып. 4, 2007, стр. 347-368.
7. D. Batani, A. Benuzzi, M. Koenig, I. Krasnyuk, P. Pashinin, A. Semenov, I. Lomonosov, V. Fortov, Problems of measurement of dense plasma heating in laser shock wave compression // Plasma Physics Controlled Fusion, 41, 1999 pp. 93-103.
8. D. Batani, M. Koenig, A. Benuzzi, I.K. Krasnyuk, P.P. Pashinin, A.Yu. Semenov, I.V. Lomonosov, & V. Fortov, Problems of measurement of dense plasma heating in laser shock-wave compression // Laser and Particle Beams 17, 1999, 265-273.
9. D. Umstadter, Review of physics and applications of relativistic plasmas driven by ultra-intense lasers" Phys. Plasmas 8, 2001, p. 1774.
10. M. Koenig, B. Faral, J.M. Boudenn, D. Batani, A. Benuzzi, & S. Bossi., Optical smoothing techniques foe shock wave generation in laser produced plasmas, Phys. Rev. E 50, R3314 (1994)
11. A. Pukhov, Strong field interaction of laser radiatio Rep. Prog. Phys. 66, 2003 p. 47.
12. S.D. Rothman, A.M. Evans, C.J. Horsfield, P. Graham, & B.R. Thomas, Impedance mismatch equation of state using indirectly laser driven mutimagabar shocks. Phys. Plasmas 9, 2002, pp. 1721-1733.
13. D. Batani, S. Bossi, A. Benuzzi, M. Koenig, B. Faral, J.M. Boudenne, Nicolas Grandjouan, S. Atzeni, & M. Temporal, Optical smoothing for shock-wave generation:

- Application to the measurement of equation of state. // Laser Part. Beams 14, 1996, pp. 211/221.
14. D. Batani, D. Balducci, D. Bretta, A. Bernarddinello, Th. Lower, M. Koenig, A. Benuzzi, B. Faral, & T. Hall, Equation of state data for gold in the pressure range, 10 TPa. // Phys. Rev. B 61, 2002, pp. 9287-9294.
 15. D. Batani, T. Desai, G. Lucchini, T.H. Lower, & T. Hall, Pressure amplification in thermal x-ray irradiated foam layered gold targets. Laser Part. Beams 20, 2002, pp. 165–169.
 16. A. Benuzzi, Th. Lower, M. Koenig, B. Faral, D. Batani, D. Beretta, C. Danson, & D. Pepler, Indirect and direct laser driven shock waves and applications to copper equation of state measurement in 10– 40 Mbar pressure range. Phys. Rev. E 54, 1996, pp. 2162-2165.
 17. T. Hall, D. Batani, W. Nazarov, M. Koenig, & A. Benuzzi, Recent advances in laser-plasma experiments using foams. Laser Part. Beams 20, 2002, pp. 303-316.
 18. M. Koenig, B. Faral, J.M. Boudenno, D. Batani, A. Bennuzi, S. Bossi, C. Remond, J.P. Perrine, M. Temporal, & S. Atzeni, Relative consistency of equations of state by laser driven shocks. Phys. Rev. Lett. 74, 1995, pp. 2260-2263.
 19. H.C. Pant, M. Shukla, V.K. Senecha, S. Bandyopadhyay, V.N. Rai, P. Khare, R.K. Bhatt, B.K. Godwal, & N.K. Gupta, Equation of state studies using laser-driven shock wave propagation through layered targets. Current Science 82, 2002, pp. 149-157.
 20. M. Shukla, H.C Pant, V.K. Senecha, P. Khare, A.K. Veram, R.S. Rao, N.K. Gupta, & B.K. Godwal, Equation-of-state study of copper using laser induced shocks near 10 Mbar pressure and revalidation of theoretical modeling. // Current Science 85, 2003, pp. 802-808.
 21. M. Shukla, A. Upadhyay, V.K. Senecha, P. Khare, S. Bandyopadhyay, V.N. Rai, C.P. Navathe, H.C. Pant, M. Khan, & B.K. Godwal, Equation of state studies using a 10 Hz Nd:YAG laser oscillator. Laser Part. Beams 21, 2003, pp. 615-626.
 22. Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер, Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений 2-е изд., М. Наука, 1966
 23. Л.В. Альтшулер, Применение ударных волн в физике высоких давлений, УФН, том 85, 197, 1965.
 24. R. Ramis, J. Meyer-ter-Vehn and J. Ramírez MULTI2D – a computer code for two-dimensional radiation hydrodynamics, Computer Physics Communications 180, 977-994, 2009

25. J.A. Maruhn et al, Numerical codes development issues, *Laser and Particle Beams*, 20, 2002, pp. 423-426.
26. A. Aliverdiev, D. Batani, R. Dezulian, T. Vinci, A. Benuzzi-Mounaix, M.Koenig, and V. Malka, Coronal hydrodynamics of laser-produced plasmas // *Phys. Rev. E*, **78**, 046404, 2008.
27. A. Aliverdiev, D. Batani, L. Antonelli, K. Jakubowska, R. Dezulian, A. Amirova, G. Gajiev, M. Khan, and H.C. Pant, Use of multilayer targets for achieving off-Hugoniot states // *Phys. Rev. E* **89**, 2014, 053101, doi: 10.1103/PhysRevE.89.053101
28. A. Aliverdiev, D. Batani, A. Amirova, R. Benocci, R. Dezulian, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Skala, R. Dudzak, K. Jakubowska, Shock dynamics induced by double-spot laser irradiation of layered targets // *Nukleonika*, 2015, **60** (2), 213-219
29. S. Paleari, D. Batani, R. Benocci, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Kadono, A. Shiroshita and A. Aliverdiev, About carbon reflectivity in the Mbar regime // *Phys. Scr.* **T161**, 2014, 014018, doi:10.1088/0031-8949/2014/T161/014018
30. S. Paleari, D. Batani, T. Vinci, R. Benocci, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Kadono, A. Shiroshita, P. Piseri, S. Bellucci, A. Mangione, and A. Aliverdiev, A new target design for laser shock-compression studies of carbon reflectivity in the megabar regime // *Eur. Phys. J. D*, 2013, **67**: 136, doi: 10.1140/epjd/e2013-30630-8
31. R.A. Magomedov, R.R. Meilanov, E.N. Akhmedov, V.D. Beybalaev, A.A. Aliverdiev, Generalization of thermodynamics in fractional order derivatives and calculation of heat-transfer properties of noble gases // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018 (**accepted**) doi: 10.1007/s10973-018-7024-2
32. A. Aliverdiev, D. Batani, R. Benocci, R. Dezulian, A. Amirova, G. Ragimkhanov, E. Krousky, J. Ullschmied, J. Skala, R. Dudzak, K. Jakubowska, About laser shocks dynamics for complex focal spots and structured targets // *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, **946**, 012013, doi :10.1088/1742-6596/946/1/012013
33. R.R. Meilanov, E.N. Akhmedov, V.D. Beybalaev, R.A. Magomedov, G.B. Ragimkhanov, A.A. Aliverdiev, To the theory of non-local non-isothermal filtration in porous medium // *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, **946**, 012076, doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012076
34. S.N. Emirov, V.D. Beybalaev, G.G. Gadzhiev, A.E. Ramazanova, A.A. Amirova, and A.A. Aliverdiev, To the description of the temperature and pressure dependences of the thermal conductivity of sandstone and ceramics // *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, **891**, 012335 doi :10.1088/1742-6596/891/1/012335

35. R.A. Magomedov, R.R. Meilanov, R.P. Meilanov, E.N. Akhmedov, V.D. Beybalaev, A.A. Aliverdiev, To the fractal equation of state // Journal of Physics: Conference Series, 2017, **891**, 012331 doi:10.1088/1742-6596/891/1/012331
36. R.A. Magomedov, R.P. Meilanov, E.N. Akhmedov and A.A. Aliverdiev, Calculation of multicomponent compound properties using generalization of thermodynamics in derivatives of fractional order // Journal of Physics: Conference Series, 2016, **774**, 012025 (doi:10.1088/1742-6596/774/1/012025)
37. V.S. Kurbanismailov, O.A. Omarov, G.B. Ragimkhanov, A.A. Aliverdiev, About the uniformity and the stability of a volume discharge in helium in near-atmospheric pressure // Acta Polytechnica **55**(4) (2015) 237-241
38. A. Aliverdiev, D. Batani, R. Dezulian, Influence of a laser profile in impedance mismatch techniques applied to carbon EOS measurement // High Power Laser Science and Engineering, **1**(2) (2013) 102-104, doi: 10.1017/hpl.2013.15
39. S. Paleari, D. Batani, R. Benocci, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Kadono, A. Shiroshita, and A. Aliverdiev Liquid Carbon reflectivity in the Mbar regime // Europhysics Conference Abstracts. 2013. V. 37D. P1.201 (1-4), ISBN 2-914771-84-3, 40th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Helsinki, Finland, July 1-5, 2013
40. A. Aliverdiev, D. Batani, A. Amirova, R. Benocci, R. Dezulian, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Ullschmied, J. Skala, R. Dudzak, and K. Jakubowska, About dynamics of shocks induced by complex spot laser-irradiation of layered targets // Europhysics Conference Abstracts Vol. **39E**, 2015, P1.202, 4 p., ISBN 2-914771-98-3, 42nd EPS Conference on Plasma Physics, Lisbon, Portugal, 22 - 26 June 2015
41. D. Batani, A. Aliverdiev, A. Amirova, R. Benocci, R. Redaelli, R. Dezulian, M. Pfeifer, J. Skala, R. Dudzak, About non-uniformity smoothing using foam substrate // Europhysics Conference Abstracts. 2014. Vol. 38F P1.092 (1-4), ISBN 2-914771-90-8, 41th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Berlin, Germany, 23-27 June, 2014.
42. В.Д. Бейбалаев, А.А. Аливердиев, Р.А. Магомедов, Р.Р. Мейланов, Э.Н. Ахмедов Моделирование процессов промерзания одномерным уравнением теплопроводности с операторами дробного дифференцирования // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки, 2017. Т. 21, № 2. С. 376-387. doi: 10.14498/vsgtu1492
43. С.Н. Эмиров, В.Д. Бейбалаев, А.Э. Рамазанова, Г.Г. Гаджиев, А.А. Амирова, А.А. Аливердиев. О температурных и барических закономерностях изменения

- теплопроводности горных пород // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого, №5(103) , 2017, 52-66.
44. V.S. Kurbanismailov, O.A. Omarov, G.B. Ragimhanov, and A.A. Aliverdiev, Volume discharge in Helium nearby atmospheric pressure: uniformity and stability // Plasma Physics and Technology V. 1 (3) (2014), 112-114, ISSN: 2336-2626
 45. А.А. Аливердиев, А.А. Амирова, Об автомодельном описании лазерной плазмы // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки, 2016. № 1. С. 38-42.
 46. Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э.Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А. Фрактальное уравнение состояния и расчет теплофизических характеристик аргона // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки, 32, No. 1, 2017, 6-11, doi: 10.21779/2542-0321-2017-32-1-6-11
 47. Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э.Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А. Фрактальное уравнение состояния и расчет теплофизических характеристик воды // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки, 32, No. 4. 2017, 63-69 doi: 10.21779/2542-0321-2017-32-4-63-69
 48. А.А. Аливердиев, А.А. Амирова, О некоторых особенностях динамики лазерной плазмы // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 3-1. С. 6-8.
 49. А. Аливердиев, А. Амирова, О моделировании в экспериментальном исследовании углерода при давлениях мегабарного диапазона // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 7. Часть 1. С. 73-76. doi: 10.12737/issn.2308-8877
 50. А.А. Аливердиев, А.А. Амирова, Об автомодельном описании динамики лазерной плазмы тяжелых элементов // Материалы IX Всероссийской конференции «Физическая электроника» ФЭ-2016, Махачкала, 19-21 октября 2016, Махачкала, ИПЦ ДГУ, 2016, С. 114-116.
 51. А.А. Аливердиев, А.А. Амирова, О проблемах и перспективах термоядерной энергетики // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы математики, информатики и современной науки: теория и практика актуальных исследований», посвященной 80-летию профессора Магомедова К. М., Махачкала, 2016, С. 147-149.
 52. А.А. Аливердиев, А.А. Амирова, О свойствах углерода при давлениях мегабарного диапазона // Материалы региональной научно-практической

- конференции «Актуальные проблемы химической науки и образования», Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», 85-лет Дагестанскому государственному университету, Махачкала, 20-21 апреля 2016 г., С.10-12.
53. А. Аливердиев, D. Batani, А. Амирова, R. Benocci, R. Dezulian, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Skala, R. Dudzak, K. Jakubowska, О некоторых особенностях лазерного ударного сжатия композитной мишени при сложном фокальном пятне // Труды IX Всероссийской конференции по физической электронике, Махачкала, 25-28 ноября 2015, С. 160-162
54. А. Аливердиев, D. Batani, А. Амирова, R. Benocci, R. Dezulian, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Skala, R. Dudzak, K. Jakubowska, О некоторых особенностях лазерного ударного сжатия композитной мишени в экспериментах со сложным фокальным пятном Труды IV Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2015, Т. 2, С. 189-192
55. A. Aliverdiev, D. Batani, A. Amirova, R. Benocci, R. Dezulian, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Ullschmied, J. Skala, R. Dudzak, and K. Jakubowska, About some peculiarities of the dynamics of shocks induced by complex laser spot // Electron proc. of 56th Course: "Atoms and plasmas in superintense laser fields", Erice 12 – 22 July 2015 (15 p.)
56. D. Batani, S. Paleari, R. Benocci, R. Dezulian, and A. Aliverdiev, About liquid carbon properties in the Mbar regime // Physics of Extreme States of Matter, 2014, P. 16-18, ISBN 978-5-94691-625-7
57. D. Batani, A. Aliverdiev, A. Amirova, R. Benocci, R. Dezulian, M. Pfeifer, J. Skala, R. Dudzak, Non-uniformity smoothing using foam substrate: some preliminary estimations // Contributions of 12th Kudowa Summer School “Towards Fusion Energy”, Kudowa Zdrój, Poland, 9-13 June 2014, OP-3 (oral presentation), pp. 64-67.
58. D. Batani, A. Aliverdiev, A. Amirova, R. Benocci, R. Dezulian, M. Pfeifer, J. Skala, and R. Dudzak, Estimations of non-uniformity smoothing using foam substrate // CD collection of 12th Kudowa Summer School “Towards Fusion Energy”, Kudowa Zdrój, Poland, 9-13 June 2014, 09.06.2014, 7.A.Aliverdiev.pdf, 11 p.
59. А.А. Аливердиев, А.А. Амирова, И.Ш. Шахшаев, О влиянии лучистого теплообмена в исследовании экстремальных состояний углерода // Материалы Девятой Международной теплофизической школы “Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий”, 6-11 октября 2014 г. Республика Таджикистан, Душанбе-Москва-Тамбов – 2014, С. 132-136

60. М.А. Назаралиев, В.Д. Бейбалаев, А.А. Аливердиев, Э.Н. Ахмедов, Р.Р. Мейланов, Магомедов Р.А., Численное решение краевой задачи для системы уравнений нелокальной неизотермической фильтрации // Материалы тезисов Международной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и информатики» и XIV Школы молодых ученых «Нелокальные краевые задачи и современные проблемы анализа информатики», Терскол 17 – 21 октября 2016 г., С. 218-221.
61. А. Аливердиев, D. Batani, А. Амирова, R. Venocci , R. Dezulian, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Skala, R. Dudzak, Особенности лазерного ударного сжатия композитной мишени в экспериментах с двойным фокальным пятном // Труды III Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2014, С. 224-228.
62. А. Аливердиев, D. Batani, А. Амирова, R. Venocci , R. Dezulian, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Skala, R. Dudzak, О лазерном ударном сжатии композитной мишени в экспериментах с двойным фокальным пятном // Труды VIII Всероссийской конференции по физической электронике, Махачкала, 23-25 октября 2014 г., т.2., С. 27-29.
63. М.Г.Каримов, К.М. Каримов, А.А. Аливердиев, К использованию нелинейно-оптической диагностики для решения реконструктивных задач // Труды VIII Всероссийской конференции по физической электронике, Махачкала, 23-25 октября 2014 г., т. 2, С. 24-26.
64. Aliverdiev A.A., Amirova A.A., Batani D., Dezulian R., Khan M., Pant H.C. Some features of intense laser driven shock propagation in structured target, Proc. Of. XXVIII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (March 1-6, 2013, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia), Moscow, ИИТ RAS, P. 12-14, ISBN 978-5-94691-533-5
65. A. Aliverdiev, D. Batani, R. Dezulian, About the influence of a laser profile in impedance mismatch techniques applied to carbon EOS measurement // Proc. of XXXI International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG), Granada, Spain, on July 14-19, 2013, PS3-098, 3 p.
66. A. Aliverdiev, D. Batani, R. Dezulian, A. Amirova, M. Khan, and H.C. Pant, About laser driven shock pressure amplification in sandwich target// Proc. of XXXI International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG), Granada, Spain, on July 14-19, 2013, PS3-099, 3 p.

67. Аливердиев А.А., Об исследовании углерода при давлениях мегабарного диапазона // Материалы VI Школы молодых ученых им. Э.Э.Шпильрайна "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов", Махачкала 2013, стр. 110-114
68. А.А. Аливердиев, Об исследовании экстремальных состояний углерода // Материалы Всероссийской конференции «Современные проблемы физики плазмы», 25-27 октября 2013, Махачкала, 2013, С. 215-218
69. A. Aliverdiev, D. Batani, A. Amirova, R. Benocci, R. Dezulian, K. Jakubowska, E. Krousny, M. Pfeifer, J. Ullschmied, J. Skala, and R. Dudzak, About the shock dynamics induced by complex spot laser-irradiation of layered targets // Materials of 42nd European Physical Society Conference on Plasma Physics (Lisbon, Portugal, June 22-26, 2015) <http://ocs.ciemat.es/EPS2015ABS/pdf/P1.202.pdf>, 1 p.
70. A. Aliverdiev High-power laser-matter interaction: experiment, data processing and simulations // Electron materials of Winter College on Optics "Light: a Bridge between Earth and Space", Trieste, Italy (09/02/2015 - 20/02/2015)
71. D. Batani, S. Paleari, R. Benocci, R. Dedzulian, and A. Aliverdiev, About liquid carbon properties in the Mbar regime // Proc. of. XXIX International Conference on Equations of States for Matter (March 1-6, 2014, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia), Moscow & Chernogolovka & Nalchik, JIHT RAS, P. 42-43, ISBN 978-5-94691-621-9
72. D. Batani, R. Benocci, R. Dezulian, R. Redaelli, M. Pfeifer, J. Skala, R. Dudzak, and A. Aliverdiev, About non-uniformity smoothing using foam substrate, Abstracts of 41th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Berlin, Germany, 23-27 June, 2014, P1.092, <http://ocs.ciemat.es/EPS2014ABS/pdf/P1.092>, 1 p.
73. Aliverdiev A.A., Amirova A.A., Batani D., Dezulian R., Khan M., Pant H.C. Some features of intense laser driven shock propagation in structured target, Book of the abstracts of oral and poster contributions to the XXVIII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (March 1-6, 2013, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia), P. 22-23, ISBN 978-5-94691-536-6.
74. S. Paleari, D. Batani, R. Benocci, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Kadono, A. Shiroshita, and A. Aliverdiev, Liquid Carbon reflectivity in the Mbar regime // Abstracts of 40th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Helsinki, Finland, July 1-5, 2013, P1.201, <http://ocs.ciemat.es/EPS2013ABS/pdf/P1.201.pdf>, 1 p.
75. S. Paleari, D. Batani, R. Benocci, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Kadono, A. Shiroshita, and A. Aliverdiev, Carbon reflectivity in the Mb regime, Abstracts of PLASMA2013, Warsaw, Poland, September 2-6, 2013

76. Р.А. Магомедов, Р.Р. Мейланов, Э.Н. Ахмедов, В.Д. Бейбалаев, А.А. Аливердиев, К расчету термодинамических характеристик на основе фрактального уравнения состояния на примере водяного пара Материалы Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и физики», Кабардино-Балкарская Республика, Терскол, 17 – 21 мая 2017 г., стр. 136-137.
77. Р.А. Магомедов, Р.Р. Мейланов, Э.Н. Ахмедов, В.Д. Бейбалаев, А.А. Аливердиев, Расчет теплофизических характеристик воды в дробном исчислении // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" 23-26 октября 2017 г., Т.1, стр. 305-307.
78. Р.А. Магомедов, Р.Р. Мейланов, Э.Н. Ахмедов, В.Д. Бейбалаев, А.А. Аливердиев, К расчету термодинамических характеристик воды на основе фрактального уравнения состояния // Материалы XII Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики», приуроченная к 85-летию профессора М.Г. Алишаева, стр. 155-156.
79. Р.А. Магомедов, Р.Р. Мейланов, Э.Н. Ахмедов, В.Д. Бейбалаев, А.А. Аливердиев, К фрактальному уравнению состояния, Материалы Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетике», Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, 9-11 октября 2017 г., ISBN 978-5-383-01233-8 (Том 2), стр. 316-318.
80. С.Н. Эмиров, В.Д. Бейбалаев, Г.Г. Гаджиев, А.А. Амирова, А.А. Аливердиев, Температурные и барические закономерности изменения теплопроводности песчаника и керамики // Сборник докладов Седьмой Международной научной конференции “Химическая термодинамика и кинетика” 29 мая –2 июня 2017, Великий Новгород, стр. 364-365.
81. С.Н. Эмиров, В.Д. Бейбалаев, А.Э. Рамазанова, И.А. Давудов, А.А. Амирова, А.А. Аливердиев, О температурных и барических закономерностях изменения теплопроводности композитных материалов // Материалы XX Междисциплинарный, Международный Симпозиум “Упорядочение в минералах и сплавах”, ОМА-20, 10-15 сентября 2017г., Ростов-на-Дону – п. Южный, с. 276-279.
82. В.Д. Бейбалаев, С.Н. Эмиров, А.А. Аливердиев, А.А. Амирова, Г.Г. Гаджиев, К описанию температурной и барической зависимости теплопроводности мергеля // Материалы Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и физики», Кабардино-Балкарская Республика, Терскол, 17 – 21 мая 2017 г., стр. 46-47.

83. С.Н. Эмиров, В.Д. Бейбалаев, А.Э. Рамазанова, А.А. Амирова, О.И. Ибрагимов, А.А. Аливердиев, Тепловые свойства минерального вещества в термобарических условиях литосферы // *Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы"* 23-26 октября 2017 г., Т. 2, стр. 152-155.
84. С.Н. Эмиров, В.Д. Бейбалаев, А.Э. Рамазанова, И.А. Давудов, А.А. Амирова, А.А. Аливердиев, К описанию температурной и барической зависимости теплопроводности керамики и песчаника, *Материалы Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетике», Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, 9-11 октября 2017 г., ISBN 978-5-383-01233-8 (Том 2), с. 334-335.*
85. С.Н. Эмиров, В.Д. Бейбалаев, А.А. Аливердиев, А.А. Амирова, Г.Г. Галжиев, А.Э. Рамазанова, Ф.Ф. Малиева. Расчет теплопроводности песчаника в зависимости от давления// *Материалы XII Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики», приуроченная к 85-летию профессора М.Г. Алишаева, стр. 230-232.*
86. А.А. Аливердиев, Р.А. Магомедов, Р.Р. Мейланов, Э.Н. Ахмедов, Расчет термодинамических характеристик на основе фрактального уравнения состояния на примере воды // *Сборник докладов Седьмой Международной научной конференции “Химическая термодинамика и кинетика” 29 мая –2 июня 2017, Великий Новгород, стр. 7-10.*
87. R.A. Magomedov, R.R. Meilanov, E.N. Akhmedov, V.D. Beybalaev, A.A. Aliverdiev, EOS calculation for Ar and water with the application of fractional order derivatives // *Abstracts of XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter March 1-6, 2017, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Section 3. Equations of State for Matter, P. 83.*
88. R.A. Magomedov, R.R. Meilanov, E.N. Akhmedov, V.D. Beybalaev, A.A. Aliverdiev, About the generalization of thermodynamics in fractional order derivatives // *Abstracts of XXI International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia (RCCT 2017) and School Conference on Chemical Thermodynamics for Young Scientists, June 26-30, 2017, Akademgorodok, Novosibirsk, Russia (2017) P.85.*
89. А.А. Аливердиев, Взаимодействие мощного лазерного излучение с веществом: эксперимент, обработка данных и моделирование // *Материалы XII Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные*

- проблемы математики и информатики», приуроченная к 85-летию профессора М.Г. Алишаева, стр. 155-156
90. В.Д. Бейбалаев, М.А. Назаралиев, А.А. Аливердиев, Ф.Ф. Малиева, О численном исследовании краевой задачи для нелинейного уравнения теплопроводности с дробными производными // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" 23-26 октября 2017 г., Т.1, стр. 263-265.
 91. Р.Б. Арсланбекова, И.О. Омаров, В.Д. Бейбалаев, А.А. Аливердиев, Об особенностях в фазовой плоскости обобщенной нелинейной системы Дуффинга // Материалы Международного симпозиума «Неравновесные процессы в сплошных средах», Том 1, Пермь 2017, стр. 38-41
 92. R.R. Meilanov, E.N. Akhmedov, V.D. Beybalaev, G.B. Ragimkhanov, R.A. Magomedov, R.P. Meilanov, A.A. Aliverdiev, Application of fractional calculus for local non-isothermal filtration // Abstracts of XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter March 1-6, 2017, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Section 2. Shock Waves, Detonation and Combustion, 127.
 93. V. Kurbanismailov, O. Omarov, G. Ragimhanov, M. Khachalov, R.A. Abdusalamov, and A. Aliverdiev, Study of kinetics of air photoplasma // VEIT 2017 International Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies, 25 - 29 September 2017, Sozopol, Bulgaria, PA-8.
 94. A.A. Aliverdiev, R.P. Meilanov, R.R. Meilanov, V.D. Beybalaev, R.A. Magomedov, M.-Sh.A. Nazaraliev, E.N. Akhmedov, About the application of fractional calculus to the nonequilibrium process dynamics // Proc. of TMB-2017 (Turbulent Mixing and Beyond, Sixth International Conference 6 Tenth Anniversary Program), Abstracts, 14 - 18 August, 2017, the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Strada Costiera 11, Trieste, Italy, p. 77
 95. A.A. Aliverdiev, D. Batani, A.A. Amirova, R. Benocci, R. Dezulian, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Ullschmied, J. Skala, K. Jakubowska, About laser shocks dynamics for complex spot and structured targets // Abstracts of XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter March 1-6, 2017, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Section 1. Power Interaction with Matter, 36
 96. D. Batani, K. Jakubowska, T. Sakaki, J. Trela, R. Benocci, P. Neumayer, O.N. Rosmej, C. Verona, A.A. Aliverdiev, Carbon in the Megabar pressure range: new experiment and calculations // XXXIII International Conference on Equations of State for

Matter March 1–6, 2018, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Section 1. Equations of State for Matter **(accepted)**

97. M.P. Grumbach and R.M. Martin, Phase diagram of carbon at high pressures and temperatures // *Phys. Rev. B* 54, 1996, P. 15730-15741.
98. P. Mora, Theoretical model of absorption of laser light by a plasma // *Phys. Fluids*, 25, 1982, 1051.
99. K.S. Holian (ed.), T-4 Handbook of Material Properties Data Bases, Vol. 1C: Equations of State, LANL Report No. LA-10160-MS UC-34, 1984.
100. SESAME Report on the Los Alamos Equation-of-State Library, Report No. LALP-83-4, T4 Group LANL, Los Alamos, 1983.
101. A. Kemp and J. Meyer-ter-Vehn An equation of state code for hot dense matter, based on the QEOS description // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 415, 1998, P. 674-676.
102. D. Batani, A. Balducci, W. Nazarov, etc., Use of low-density foams as pressure amplifiers in equation-of-state experiments with laser-driven shock waves // *Phys. Rev. E*, **63**, 2001, 046410.
103. D. Batani, W. Nazarov, T. Hall, etc., Foam smoothing studied through laser produced shocks // *Phys. Rev. E*, **62**, (6), 2000, P. 8573-8582.
104. Р.П. Мейланов К теории фильтрации в пористых средах с фрактальной структурой // *Письма в Журнал Технической Физики*, Т. 22, В. 23, 1996, С. 40-42.
105. R.P. Meilanov Generalized equations of one-dimensional filtration with fractional-power differentiations // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, V. 74, 2001, P. 298-303.