**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ**

**О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ**

**ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

УДК 535.36

**ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

[ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ И РТУТИ (ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТИ) В ОКОЛО И СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ](http://tkpns.gost.ru/TKSuggest/TKSuggestions2016.nsf/c5c6f177a850e61ac3257081003c4b3a/e3ad5b3170f8840b43257e3c003b3202?OpenDocument)

#### ССД СНГ 325–2020 (ГСССД 325–2017)

РАЗРАБОТАНЫ Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК-180 «Межгосударственная служба стандартных справочных данных»

ВНЕСЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии

АВТОРЫ: д.ф.-м.н. А.А. Карабутов, к.ф.-м.н. А.Г. Каптильный.

СОГЛАСОВАНЫ с национальными органами по стандартизации стран СНГ:

РЕКОМЕНДОВАНЫ Научно-технической комиссией по метрологии Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации

ПРИНЯТЫ Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации

(протокол от 2020 г., № –2020)

УДК 535.36

**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ**

**О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ**

**ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

|  |  |
| --- | --- |
| **Таблицы стандартных справочных данных** |  |
| Оптические свойства алюминия и ртути (отражательная и излучательная способности) в около и сверхкритической области | **ССД СНГ**  **325–2020**  **ГСССД**  **325–2017** |
| **Tables of Standard Reference Data** |  |
| Optical properties of Aluminium and Mercury (reflectivity and emittance) in near critical region | **SSD SNG**  **325–2020**  **GSSSD**  **325–2017** |

**АННОТАЦИЯ**

В таблицах приведены стандартные справочные данные по оптическим свойствам металлов ртути и алюминия (отражательной и излучательной способностей) в около и сверхкритической области их термодинамических параметров состояния: **Hg** (давление - Р ~ 0,65ГПа, температура Т~2800К), **AL** (давление - Р ~ 0,5ГПа, температура Т~ 7000К).

Данные получены на рабочей длине волны импульсного лазера λ=1.062мкм.

Границы суммарных погрешностей для 95 % доверительной вероятности получены путем оценок их случайных и систематических составляющих для отражательной и излучательной (определяемой на основании закона Кирхгофа) способности составляют 11,6% – 14,4% для указанной длины волны.

Температура и давление определялись по аттестованным методикам ГСССД.

СОДЕРЖАНИЕ

[1 Введение](#_Toc25233089) 6

[2 Объект исследований](#_Toc25233090) 7

3 [Методика измерений 8](#_Toc25233091)

4 Характерные пространственные и временные масштабы задачи о взаимодействии лазерного излучения с металлами 10

5 Методика измерения температуры по тепловому излучению нагретого образца и способ высокотемпературной калибровки пирометра 13

6 Экспериментальная установка, результаты исследований 18

7 Таблицы стандартных справочных данных и их погрешности 27

8 Список литературы 31

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Технологические процессы, основанные на использовании Сверхкритических Флюидов (СКФ), являются процессами следующего поколения, которые кардинальным образом качественно превосходят традиционные процессы, а сверхкритические флюиды рассматриваются как основа новых экологически чистых технологий 6-го технологического уклада.

В связи с выше указанным, не имеет особого смысла конкретизировать области применения сверхкритических технологий (от производства лекарств до ядерных реакторов на сверхкритических теплоносителях, создания уникальных покрытий для спец. техники и т.п.). Экспериментальные данные по оптическим свойствам металлов при температурах более 2500К практически отсутствуют. Это в полной мере относится к околокритической области параметров состояния вещества.

Определение истинной температуры методами оптической пирометрии невозможно без знания излучательной способности металла в околокритическом диапазоне термодинамических параметров. Измерение величин отражательной способности в процессе проведения эксперимента позволяет на основании закона Кирхгофа определить излучательную способность вещества [1].

Кроме того, оптические свойства металлов позволяют сделать оценки об изменении в электронном спектре металлов, что в свою очередь позволяет сделать определенные выводы о трансформации внутренней структуры вещества в области высоких температур и давлений. Знание отражательной способности позволят также оценить электропроводность металлов в высокоэнергетической области фазовой диаграммы вещества.

Теоретиками был предсказан переход металл-диэлектрик в околокритической области и к настоящему времени этот результат подтвержден достаточно ограниченным количеством экспериментальных работ. За этим явлением стоит фундаментальный процесс – уменьшение плотности металла на ~10% при его нагреве приводит к существенному изменению в электронном спектре свободных электронов. Происходит процесс локализации электронов: свободные носители начинают возвращаться на орбиты атомов и при плотностях ~20-40% от твердотельной реализуется переход металл-диэлектрик (следует отметить, что данная схема носит достаточно грубый, качественный характер). В этом случае происходит кардинальное изменение все свойств металла. Данный процесс происходит в высокоэнергетической области, близкой к критической точке вещества.

Это область высокоинтенсивных процессов, проходящих с высокими скоростями [2-5] и использование оптических свойств для их диагностики представляется одним из наиболее эффективных методов исследования. При переходе в высокоэнергетическое состояние в процессе лазерного нагрева существенно усиливается поглощение падающего излучения лазера возбужденными атомами металла, а величина отраженной части излучения уменьшается, что позволяет сделать количественный вывод о состоянии металла.

**2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Целью работы являлась разработка стандартных справочных данных по оптическим свойствам (отражательной и излучательной способностям) ртути и алюминия в околокритической области их термодинамических параметров состояния. Выбор этих металлов обусловлен относительно низким уровнем параметров их критических точек, что облегчало отработку методики проведения эксперимента, кроме того ртуть единственный жидкий металл перспективный для применения в сверхкритических технологиях создания новых видов покрытий. Алюминий при создании на его поверхности лазерно-индуцированных покрытий (в околокритических условиях нагрева) приобретает прочностные свойства сопоставимые с титаном и высокопрочными сталями. Алюминий продолжает оставаться одним из основных конструкционных материалов при создании авиационной и космической техники. Резкий рост температур и давлений, обусловленный переходом на гиперзвуковой масштаб скоростей в авиационной технике, столкновение микрометеорита с защитной оболочкой типичный пример реализации высокоэнергетических взаимодействий и состояний вещества, включая около критическую область. Во всех рассмотренных выше случаях для определения истинной температуры методами пирометрии принципиально необходимо знать излучательную способность нагретого вещества.

Для исследования оптических свойств металлов использовались диски отполированные по оптической технологии (среднеарифметическая высота шероховатости ~ 50нм), также использовались образцы с напыленным слоем металла толщиной ~200мкм.

Ртутные образцы получались «раздавливанием» микро капли ртути между двумя стеклами марки К8, толщина слоя ртути составляла ~50 мкм и контролировалась цифровым микрометром.

**3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ**

1. Контролируемая генерация высокоэнергетических состояний исследуемого вещества.

На современном уровне состояния техники постановки экспериментального исследования практически невозможно одновременно создать в измерительной объеме (ячейке) давления на уровне ~ десятков килобар при температурах ~ десятков тысяч градусов. Эти величины соответствуют параметрам критических точек металлов. В связи с этим, широкое распространение приобрели динамические методы генерации и исследования состояний веществ при высоких температурах и давлениях, в том числе при интенсивном лазерном воздействии [2-5]. Отличительной чертой динамических методов является существенно нестационарный и, как правило, пространственно неоднородный характер процесса ввода энергии в систему. Это приводит к значительным трудностям при постановке экспериментальных исследований и определении термодинамических параметров, которые непрерывно меняются во времени и в пространстве.

В настоящий момент практически неисследованной оказалась область вырожденного состояния вещества с температурами выше 3000К и давлениями более 200 МПа (2000 бар). Особый интерес представляет диапазон состояний металлов с температурами ≥ 10 000К и давлениями ≥ 2ГРа (20 000бар), недостижимый статическими методами, которому согласно теоретическим оценкам, соответствуют параметры критических точек практически всех металлов, составляющих ~ 80 % таблицы Менделеева.

Настоящая методика представляет собой не имеющий аналогов динамический метод генерации и исследования фазовых диаграмм металлов. Методика основана на управляемом достижении высокоэнергетического состояния вещества при облучении импедансной поверхности металла мощным наносекундным импульсом излучения лазера (импедансная поверхность - поверхность нагруженная слоем диэлектрика). В этом случае происходит квазиизохорный нагрев веществ, и эффективность генерации давления резко возрастает (на два порядка). Нагружающий металл диэлектрик предотвращает возникновение абляции – выброса плазменного факела с облучаемой поверхности исследуемого вещества. Это, в свою очередь, позволяет изучать оптические свойства вещества: отражательную (и соответственно) излучательную способность металла при указанном уровне температур и давлений. Достижение заданной точки фазовой диаграммы определяется интенсивностью излучения лазера и физическими свойствами диэлектрика, нагружающего облучаемую поверхность. При исследовании теплофизических свойств веществ динамическими методами принципиально важно правильно выбрать длительность внешнего воздействия. Использование сверхкоротких лазерных воздействий, фемто и пикосекундных возможны ситуации, когда нельзя говорить о наступлении термодинамического равновесия в системе [6]. В этих случаях состояние системы не описывается набором термодинамических параметров, таких как температура и давление. При лазерном облучении поверхности металла характерным временем установления локального термодинамического равновесия в системе является время выравнивания температур электронной и ионной подсистем ***τэ-ф***, которое по порядку величины составляет 10-12 - 10-11с [7]. Характерное время формирования границы раздела фаз для металлов составляет это время составляет ~10-13 – 10-10c время выхода на «стационарный» режим нуклеации, ~ 5\*10-10с, На временах больших ***τэ-ф*** поведение системы можно описывать на языке термодинамических параметров. Для металлических мишеней, облучаемых лазерными импульсами наносекундной длительности, указанное условие выполняется и можно считать, что система находится в области локального термодинамического равновесия.

1. **ХАРАКТЕРНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ ЗАДАЧИ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МЕТАЛЛАМИ**

На рисунке 2.1 показана схема постановки экспериментального исследования: лазерный импульс (1) падает на границу металл / диэлектрик (2) (такая граница в общем случае называется импедансной). Часть энергии падающего излучения поглощается в металле, вызывая нестационарный неоднородный нагрев, как самого металла, так и прозрачного диэлектрика, часть – отражается (3). Нестационарный неоднородный нагрев приводит к генерации термоупругих напряжений, которые уносятся из приповерхностной области акустической волной (4). Также на рисунке 2.1 схематически указано тепловое излучение поверхности (5).

|  |  |
| --- | --- |
| Geometry | Scales |
| Рисунок 2.1 – Геометрия задачи. | Рисунок 2.2 – Характерные пространственные масштабы задачи нагрева алюминия лазерным импульсом наносекундной длительности. |

В данной задаче можно выделить ряд характерных пространственных масштабов: глубина проникновения света , длина диффузии тепла за время лазерного воздействия  и пространственная протяжённость акустического импульса , где  - коэффициент поглощения света,  - температуропроводность,  - -теплопроводность,  - плотность, - изобарическая теплоёмкость,  - скорость продольных акустических волн,  - длительность лазерного импульса. Для металлов при наносекундной длительности лазерных импульсов справедливы следующие соотношения между приведёнными выше масштабами:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.1)  (2.2) |

Соотношение (2.1) является условием поверхностного нагрева, а условие (2.2) – условием адиабатического распространения звука (и как следствие, одним из условий применимости акустического приближения). Оценим характерные длины, например, для алюминия при длительности лазерного воздействия  – 10 нс:  ~ 20 нм,  ~ 900 нм,  ~ 63 мкм. Данные масштабы представлены на рисунке 2.2.

Как уже было отмечено выше, длительность лазерного импульса в рамках данной задачи ограничена снизу временем электрон – фононной релаксации (***τэ-ф***), так как на меньших временах невозможно говорить о наступлении локального термодинамического равновесия и, следовательно, о термодинамических параметрах системы. Сверху длительность лазерного воздействия строгих физических ограничений не имеет, однако есть ряд факторов, которые делают нежелательным использование как чересчур коротких воздействий (100 пс – 1 нс), так и слишком длинных (> 1 мкс). На рисунке 2.3 представлена временная диаграмма основных процессов, происходящих при лазерном нагреве металлов.

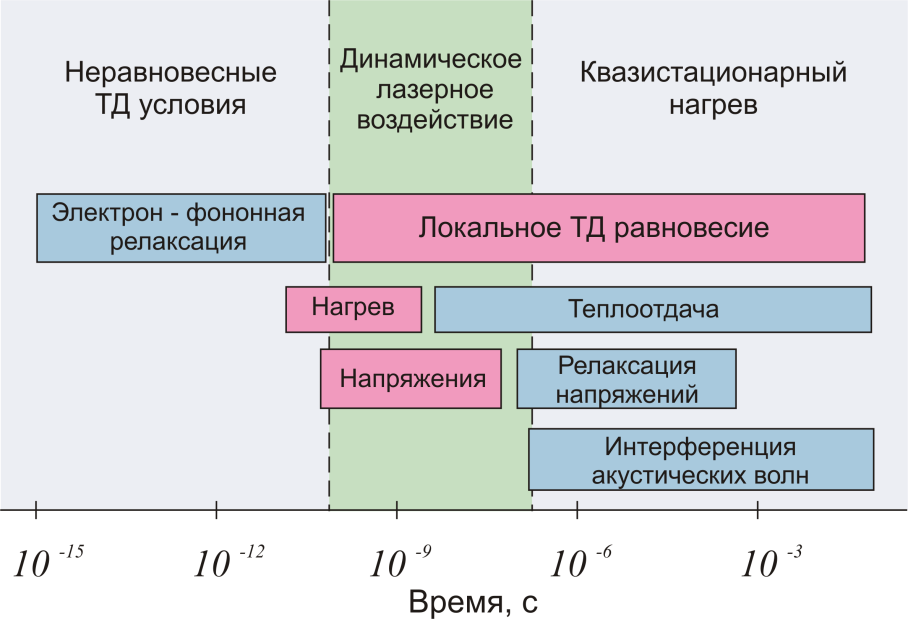


Рисунок 2.3 – Временная диаграмма лазерного нагрева металлов

Главными трудностями при использовании лазерных импульсов длительностью 100 пс – 1 нс является существенное затухание импульсов давления гиперзвукового диапазона частот. Рассмотрим теперь диапазон длительностей лазерного импульса более 100 нс. В этом диапазоне нагрев будет происходить значительно менее эффективно, так как . Из приведённой оценки также следует, что и эффективность генерации давления также значительно упадёт. К тому же, для точной регистрации импульса давления в данном временном диапазоне необходимо значительно увеличивать толщины образца и нагружающей среды, что неизбежно приведёт к увеличению дифракционных искажений. В случае наложения многократных отражений от границ образца генерация давления также будет происходить квазистатически и неэффективно.

Таким образом, для задачи исследования локально - равновесных высокоэнергетических состояний металлов оптимальная длительность лазерного импульса лежит в диапазоне от 10 до 100 нс, который представляет собой компромисс между простотой эксперимента и эффективностью нагрева и генерации давления.

Ещё одним принципиально важным временем является время двойного пробега звука в нагружающем диэлектрике , или его безразмерный аналог . Так как при отражении от свободной границы диэлектрика акустический импульс меняет полярность на противоположенную, то на поверхность металла через время приходит волна разрежения, по амплитуде сравнимая с величиной давления на поверхности, что может приводить к отрыву нагружающей среды и изоэнтропическому расширению металла. Таким образом, меняя длину нагружающей среды, можно управлять временем сброса давления, что может позволить наблюдать свободную релаксацию термодинамической системы из заданного высокоэнергетического состояния.

1. **МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ НАГРЕТОГО ОБРАЗЦА И СПОСОБ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КАЛИБРОВКИ ПИРОМЕТРА**

Вопросы температурных измерений более подробно были представлены авторами в уже прошедшей аттестацию методике ГСССД МЭ 179–2011. (Методика экспериментального определения температуры исследуемых объектов до ~105К с наносекундным временным разрешением при специальной калибровке оптического тракта пирометра). В настоящем разделе эти материалы будут представлены в сокращенном варианте, иллюстрирующем необходимость определения оптических свойств металла: излучательной способности при проведении температурных измерений методами оптической пирометрии.

Измерение температура образца в процессе воздействия лазерного импульса сталкивается со значительными методологическими проблемами. Это обусловлено: широким динамическим диапазоном изменения температуры (300 - 10000 К и более); высокими скоростями нагрева и охлаждения (до 1014 К·с-1); малыми размерами области нагрева (0.2-5мм); сильной зависимостю оптических свойств материалов от температуры. Для изучения процессов, индуцируемых лазерным излучением наносекундной длительности, требуемое временное разрешение определения температуры должно составлять не менее 1 нс. Указанное временное разрешение могут дать лишь бесконтактные методы, основанные на регистрации теплового излучения исследуемой поверхности. Однако при этом возникают сложности с абсолютной калибровкой пирометров. Кроме того, возникает необходимость применения высокоскоростных фотоприемников и систем регистрации сигналов, которые являются относительно дорогими.

В настоящей работе использован принципиально новый способ калибровки оптического тракта пирометра при помощи, так называемой квазимонохроматической модели абсолютно черного тела нетеплового происхождения (КМАЧТ), (аттестованная методика ГСССД МЭ 179 - 2011).

Качественно, квазимонохроматическая модель черного тела можно представить в виде обычной (спектральной) модели черного тела, в выходном отверстии которого установлен интерференционный фильтр с полосой пропускания ~ (10-20нм). Если далее подобрать параметры интерференционного фильтра так, чтобы спектральная полоса пропускания фильтра совпадала с узкой полосой излучения лазера, то с «точки зрения регистрирующего фотоприемника» в этой узкой, спектральной полосе равновесное тепловое излучение нагретой полости классической модели АЧТ будет идентично излучению квазимонохроматического лазерного источника (нетеплового происхождения). Этот лазерный источник можно рассматривать как некоторое виртуальное, квазимонохроматическое абсолютно черное тело, имеющее температуру , спектральная интенсивность излучения которого описывается законом Планка. При этом необходимо учесть, что тепловое излучение модели абсолютно черного тела носит «Ламбертовский» характер: в полусферу распространяется излучение одинаковой яркости (интенсивности) вне зависимости от направления (данное требование обычно никогда не выполняется). Это условие реализуется при пропускании излучения лазера через пластину «молочного» (вспененного) стекла со шлифованной внешней поверхностью. Интенсивность излучения лазера в узком спектральном диапазоне на многие порядки превосходит интенсивность излучения классической модели черного тела (МАЧТ), температура которого ограничена жаростойкостью используемых материалов нагревателей и составляет ~3500K для самых современных МАЧТ на основе металл-графитовых эвтектик.

Формальная оценка «максимальной температуры, которой соответствует интенсивность монохроматического излучения современного лазера» на основе закона Планка была проведена в [7] и составила  при плотности излучения лазера ~5Мвт/см2.

Принцип работы квазимонохроматической модели АЧТ с лазерным источником излучения основан на следующем математическом соотношении, описывающем мощность излучение некоторого источника в узком спектральном диапазоне [8].

Мощность излучения в телесном угле :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.1) |

где:  [Вт] – мгновенная мощность излучения источника;

 [Вт/м3] – спектральная интенсивность излучения источника на его рабочей длине волны  при температуре ;

 (~ 10-20нм) – ширина спектрального диапазона, в котором излучает источник и которому принадлежит ;

 [м2] – площадь излучающей поверхности источника.

Откуда для спектральной интенсивности излучения получаем:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.2) |

В качестве источника эталонного излучения в предлагаемой квазимонохроматической модели абсолютно черного тела (КМАЧТ) использовался импульсный твердотельный Nd:YAG лазер, работающий в режиме модуляции добротности, длина волны излучения 1064 нм, но это не принципиально, в качестве источника излучении может быть использован непрерывный лазер. Величины  и , входящие в формулу (1), являются паспортными для данного лазера, но при необходимости, могут быть измерены стандартными методами с высокой точностью. Мгновенная мощность излучения источника рассчитывается по измеренным величинам энергии лазерного излучения, измеренного с помощью приемника лазерного излучения [9] (патентованная разработка авторов), и временной форме лазерного импульса. Площадь излучающей поверхности источника  определяется удобством проведения калибровки и легко измеряется, следовательно, на основании формулы (1) может быть определена величина спектральной интенсивности излучения . Эту величину можно сопоставить со спектральной интенсивностью излучения классической модели абсолютно черного тела (АЧТ) – , которая описывается законом Планка:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.3) |

где: , .

Объединяя соотношения (2) и (3) имеем:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.4) |

Как было отмечено выше, предлагаемая квазимонохроматическая модель АЧТ имеет огромный запас по величине верхней температуры (теоретически до , [8]) и для калибровки можно использовать маломощный импульсный лазер. Естественно, при проведении эксперимента в реальных условиях максимальная температура калибровки не превысит величины ~ 104 - 105 К. После несложных преобразований из (4) можно получить:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.5) |

Формула (3.5) определяет «температуру» квазимонохроматической модели абсолютно черного тела с лазерным источником излучения в зависимости от мощности излучения  лазерного источника при заданных величинах , , .

Проведение калибровки всего оптического тракта пирометра, тем не менее, не позволяет определить истинную температуру нагретого образца, т.к. тепловое излучение реальных тел определяется их излучательной способностью, величина которой существенно зависит от температуры и рода металла и его температуры. При проведении пирометрических измерений именно отсутствие данных по оптическим свойствам – излучательной способности представляет основную проблему измерений. Это замечание относится к пирометрическим измерениям использующих для калибровки любые типы «моделей черных тел». Знание излучательной способности металла и ее зависимости от температуры принципиально необходимо. Определение излучательной способности по измеренной отражательной способности осуществляется на основании закона Кирхгофа:

|  |  |
| --- | --- |
| ***ρ(λ) + α(λ) + τ (λ) =1,*** |  |

где**: *ρ(λ); α(λ); τ (λ)*** – соответственно спектральные коэффициенты отражения, поглощения (излучения в случае зеркальной отражающей поверхности) и пропускания.

В случае не прозрачных тел (металлы вдали от перехода металл-диэлектрик) величина ***τ (λ) = 0***и излучательная способность, как спектральная (так и интегральная по длинам волн) определяется следующим образом**:**

|  |  |
| --- | --- |
| *α(λ) =1 - ρ(λ)* | 3.6 |

Окончательно истинная температура определяется как:

|  |  |
| --- | --- |
| *Тист = Т\*(1 - ρ(λ),* | 3.7 |

где *Т\** определяется по формуле (3.5).

*Необходимо обязательно отметить, что формула (3.7) справедлива только для тел с зеркальным отражением, таковыми являются все наши образцы, облучаемая поверхность отполирована. Зеркальная поверхность ртути получается при механическом нагружении чистой капли жидкого металла слоем прозрачного диэлектрика [1].*

**6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

**6.1 Экспериментальное исследование сверхкритических состояний ртути (*Hg*) и алюминия (*Al*)**

Схема экспериментальной установки представлена на **рисунке 4.1**. В качестве источника лазерного излучения в работе использовался твердотельный Nd:YAG лазер (1), работающий в режиме модуляции добротности, со следующими характеристиками: длина волны излучения 1.06 мкм, длительность импульса ~ 10нс, предельная энергия в импульсе 0.6 Дж. Лазерное излучение ослаблялось набором нейтральных светофильтров (4), после чего фокусировалось собирающей линзой (*f = 30 см*) (5) на поверхность мишени (6) в пятно диаметром 2 мм. Изменение коэффициента ослабления позволяло варьировать плотность энергии падающего излучения. Временная форма падающего на мишень излучения регистрировалась кремниевым PIN-диодом (2) (время нарастания 1нс), на который направлялась часть излучения при помощи делительной пластинки (3). По сигналу этого же фотоприёмника происходил запуск осциллографа. Запись формы зеркально отраженного излучения осуществлялось аналогичным фотодиодом (7).

Измерение падающего, отраженного, теплового излучения, и сигнала пьезоприемника осуществлялось с наносекундным временным разрешением.

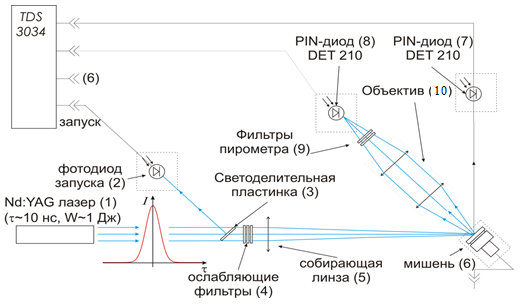


Рисунок 4.1 – Схема экспериментальной установки.

Система регистрации теплового излучения мишени состояла из объектива (10), фильтров СЗС-24 толщиной 4 мм и СЗС-27 толщиной 2 мм (9) и фотоприемника (8). Тепловое излучение мишени собиралось объективом и проходило через фильтры СЗС-24, СЗС-27, отсекающие излучение на длине лазерного излучения, после чего направлялось на фотоприёмник теплового излучения. При необходимости, к упомянутым фильтрам добавлялись нейтральные светофильтры для ослабления теплового излучения во избежание насыщения фотоприёмника. Измерение акустического сигнала осуществлялась широкополосным акустическим пьезоприемником на основе ниобата лития (6). Сигналы от фотоприёмников и датчика давления регистрировались цифровым запоминающим четырёхканальным осциллографом Tektronix TDS 3034B с полосой пропускания 300 МГц и частотой дискретизации до 2.5 ГГц. Осциллограф управлялся с компьютера по интерфейсу Ethernet, что позволило автоматизировать сбор и обработку экспериментальных данных.

**6.2 Положение образца - мишени**

На схеме экспериментальной установки показано, что облучение мишени импульсом лазерного излучения осуществляется под углом ~450, тепловое излучение нагретого металла регистрируется по нормали к мишени, отраженное от мишени излучение лазера регистрируется под углом ~900 по отношению к падающему лазерному пучку. В [1] показано, что излучательная способность металлов при углах падения излучения в диапазоне ± 450 от нормали можно считать постоянной. Это значит, что при регистрации теплового излучения по нормали к нагретой поверхности отражательную (излучательную только для случая зеркального отражения) способность допустимо регистрировать под углом ~450. Использование такой оптической схемы облучения позволяет развести падающее и отраженное излучение лазера и тепловое излучение нагретой мишени и максимально исключить их взаимное влияние (паразитную «засветку»). При этом величина отраженного излучения регистрируется на длине волны излучения лазера (λ=1.062мкм). Такая схема измерений не требует синхронизации падающего и отраженного пучков, но длительность регистрации отраженного излучения определяется длительностью лазерного импульса.

Критические параметры алюминия (Al) , ртути (Hg)

Экспериментальное исследование высокоэнергетических состояний было проведено для ртути (***Hg***), алюминия (***Al***).

Результаты статических экспериментов (в частности для алюминия) достаточно широко представлены в литературе . Температура плавления алюминия Тпл = 933.5К, температура кипения при атмосферном давлении Ткип = 2792К. В силу достаточно высокой температуры кипения при атмосферном давлении и динамического сдвига точки кипения, при лазерном нагреве механически нагруженной поверхности алюминия возможен перевод расплава в сверхкритическую область без вскипания. Для алюминия существует полуэмирическое уравнение состояния, основанное на модели мягких сфер, удовлетворительно описывающее экспериментальные данные вплоть до температур порядка 4000К. Экспериментальные данные по критическим параметрам алюминия отсутствуют, однако согласно теоретическим расчетам

***Al*** - Ткр=7990К, Ркр = 0.271ГПа (2.71Кбар), [3].

***Hg***  - Ткр=1763К, Ркр = 0.154ГПа (1.54Кбар)

**6.3** **Измерение отражательной способности поверхности образца**

Измерение отражательной способности поверхности образца необходимо для определения температуры, однако эта величина представляет самостоятельный интерес.

Для измерения изменений отражательной способности образца относительно ее первоначального значения в процессе импульсного лазерного нагрева, использовались два фотоприемника, регистрирующих падающее излучения и зеркально отраженное от исследуемого образца. Отношение сигналов, зарегистрированных фотоприемниками отраженного и падающего излучения пропорционально отражательной способности поверхности в каждый момент времени. Однако в силу различного положения в пространстве доли излучения, собираемые фотоприемниками, отличаются. Поэтому их эффективная чувствительность различна. Кроме того, сигналы с обоих приемников смещены во времени друг относительно друга в силу временных задержек между каналами осциллографа. Так как в дальнейшем находится отношения этих сигналов, временные задержки и различие чувствительностей фотоприемников необходимо компенсировать. По этой причине перед каждым выстрелом с большой плотностью энергии производилась калибровка приемников – определение различия в чувствительности и временной задержки.

В работе использовались ртутные и алюминиевые образцы, отражательная способность мишеней до воздействия мощного лазерного импульса (на длине волны ***λ=1062нм***) равнялась:

***Hg*** –*ρо* = 0.51±0.05 – для микрокапель ртути зажатых между двумя стеклами К8,

***Al*** – *ρо* = 0.80±0.045 – для полированных образцов и образцов полученные методом магнетронного напыления алюминия на оптическое стекло толщиной ~200нм,

## **6.4 Динамика измерения отражательной способности поверхности металлов «Hg» и «Al» при воздействии лазерного излучения**

Приведены примеры экспериментального исследования динамики изменения температуры, давления и отражательной способности металлических образцов и образцов из графита при воздействии мощного импульса лазерного излучения.

**РТУТЬ – Hg**

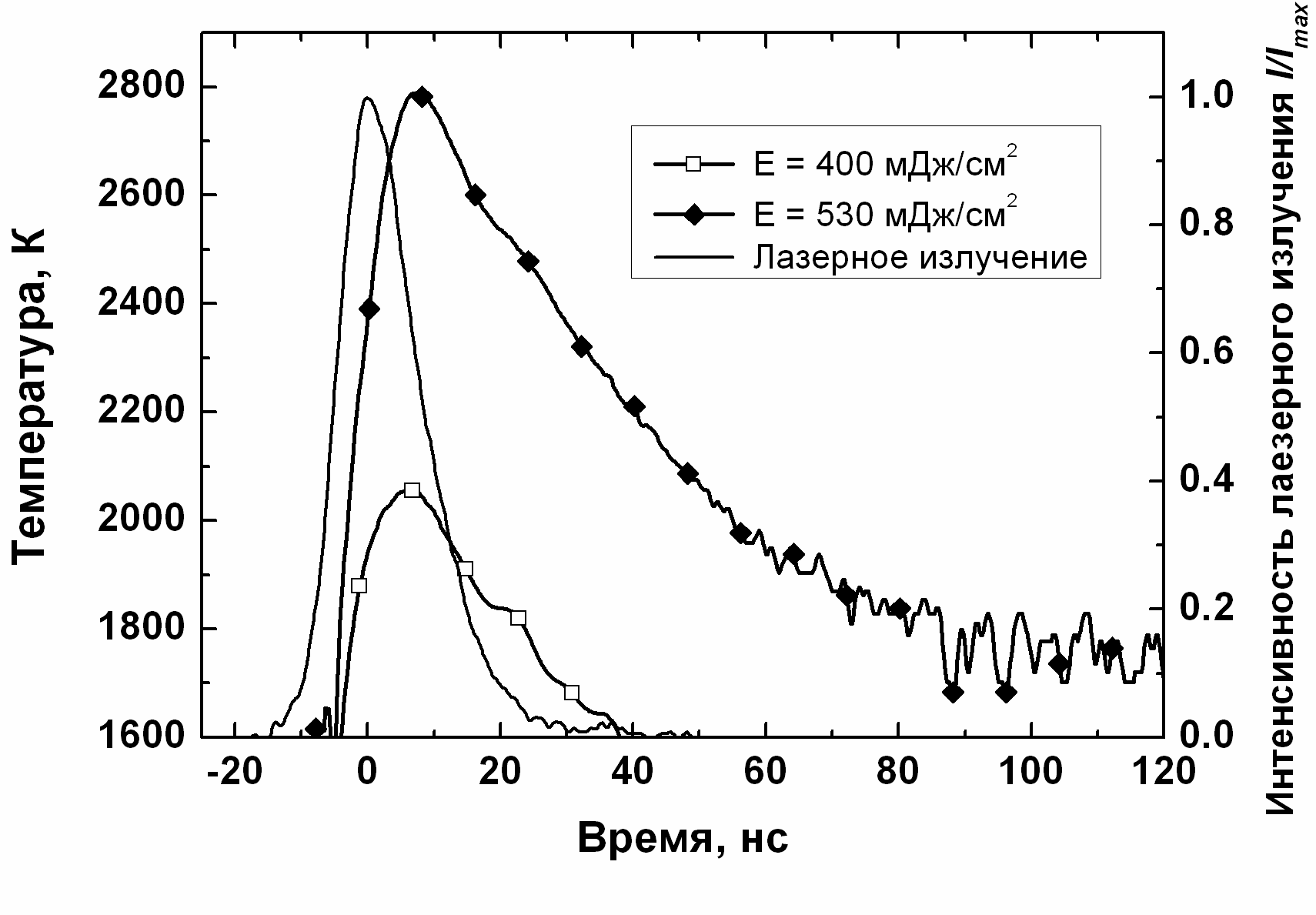


Рисунок 4.2 – Динамика изменения температуры ртути при больших плотностях энергии лазерного излучения

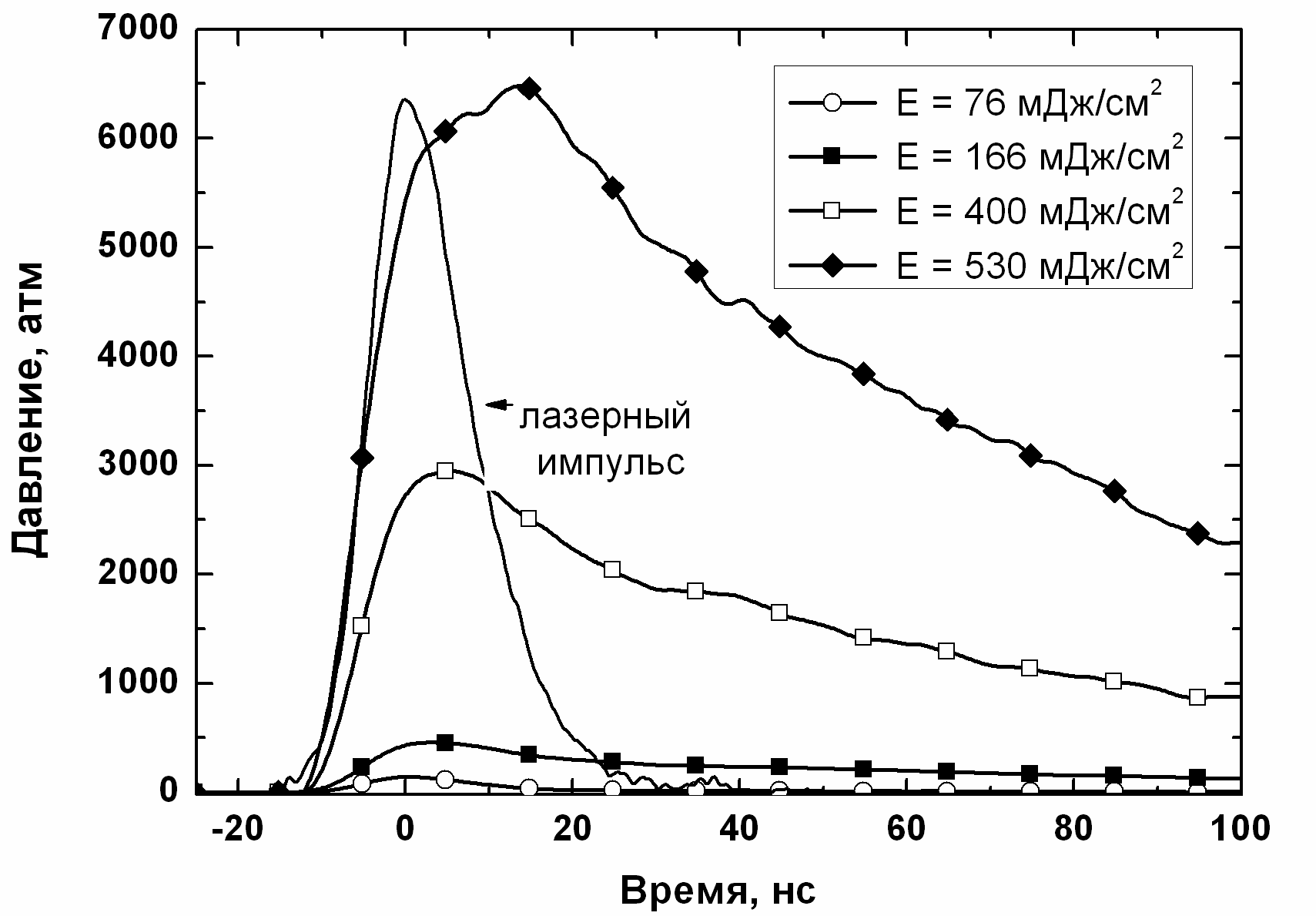


Рисунок 4.3 – Динамика изменения давления в ртутном образце при больших плотностях энергии лазерного излучения

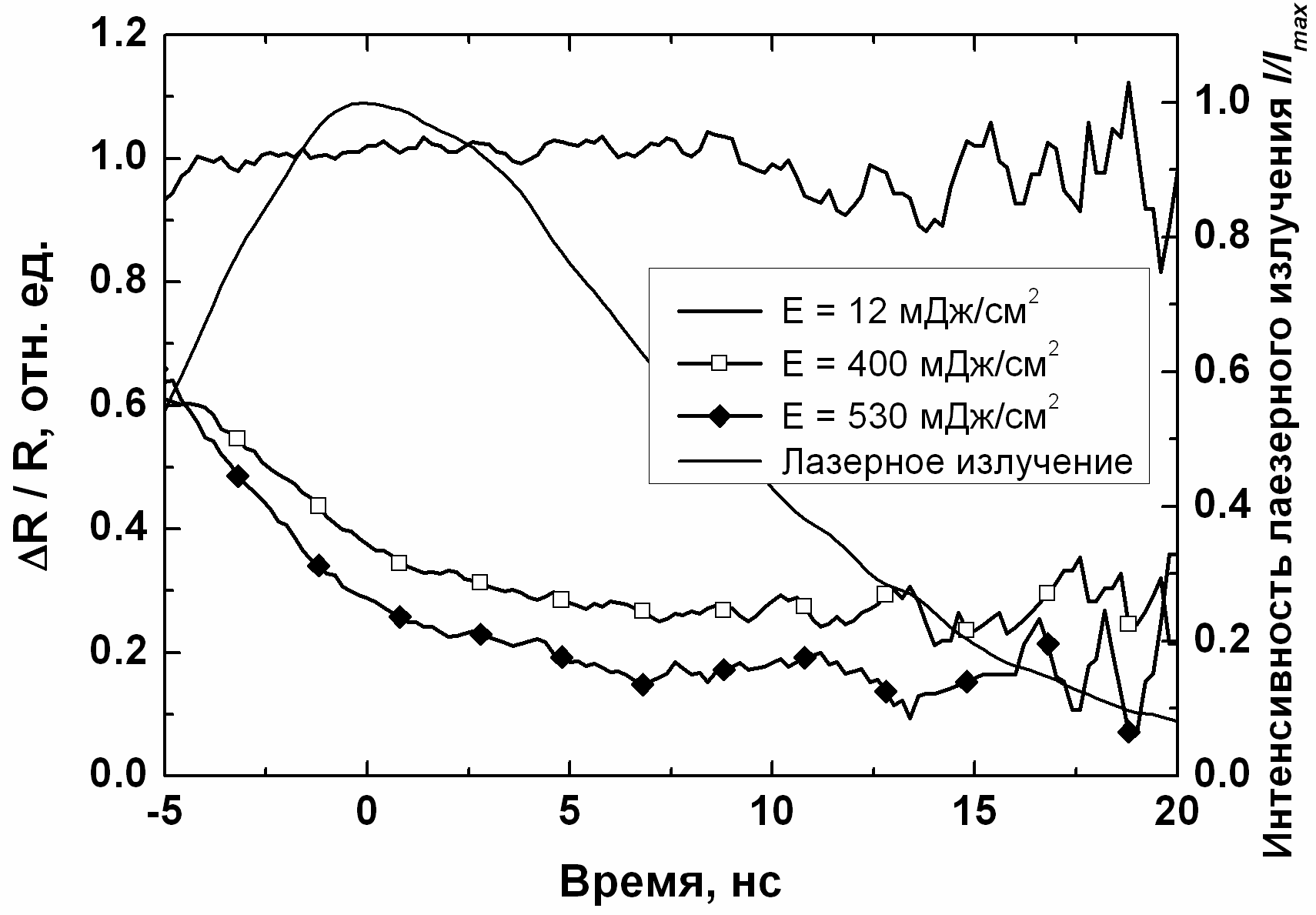


Рисунок 4.4 – Динамика изменения отражательной способности поверхности ртути при больших плотностях энергии лазерного излучения

На Рисунке 4.4 представлена динамика изменения отражательной способности поверхности образца. При относительно высокой плотности энергии лазерного импульса ~ 120мДж/см2 изменяется характер поведения отражательной способности, что в совокупности с изменением характера поведения температуры поверхности, подтверждает предположение об ионизации приповерхностного слоя нагружающего диэлектрика. Отражательная способность поверхности ртути падает практически в 5 раз по сравнению с первоначальной.

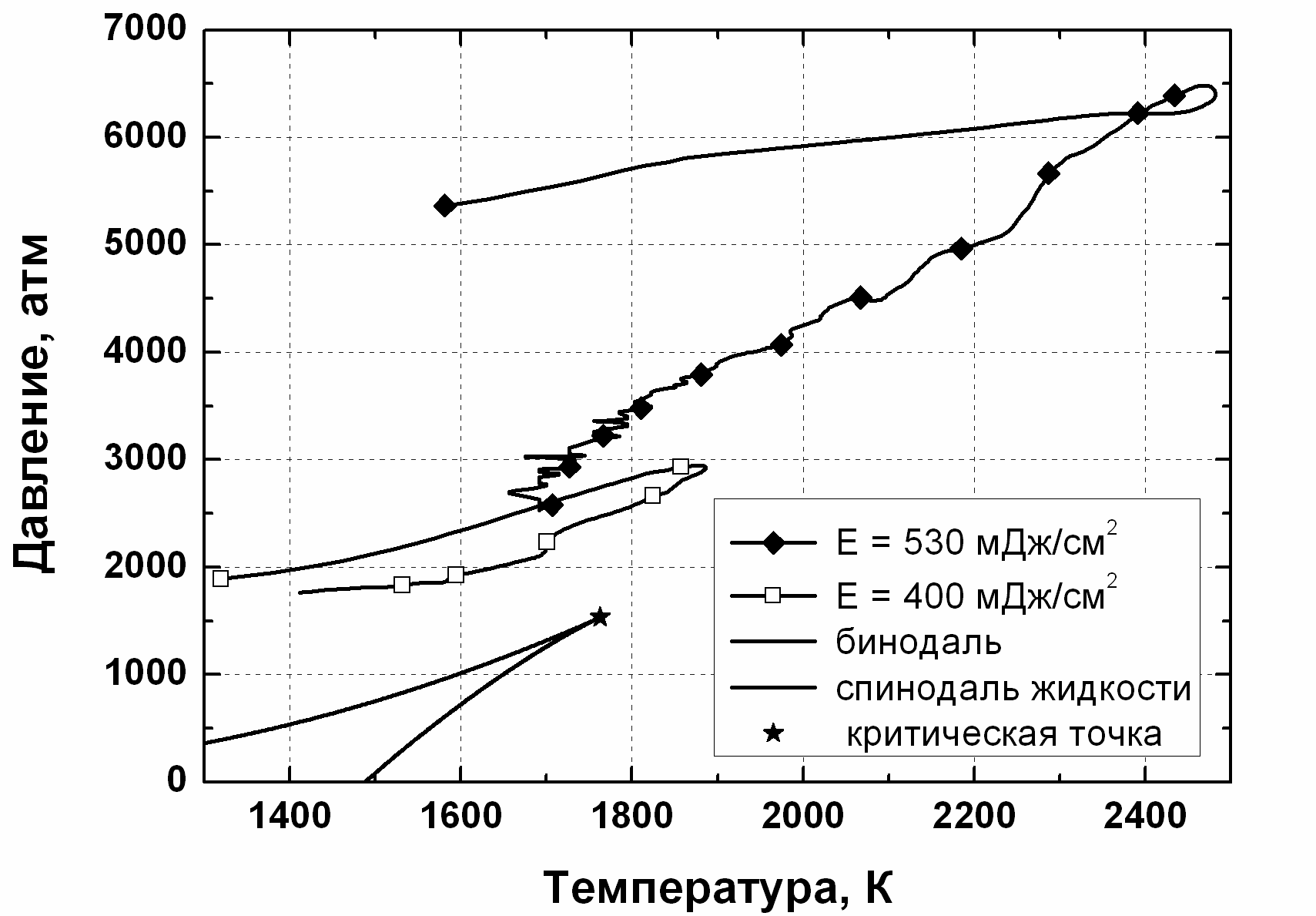


Рис. 4.5 – **Р-Т** диаграмма лазерного нагрева поверхности ртути

**АЛЮМИНИЙ – Al**



Рисунок 4.6 – Динамика изменения температуры алюминиевых образцов при относительно высоких уровнях энергии лазерного импульса.

На рисунке 4.6 представлены распределения температуры во времени при различных уровнях энергии лазерного импульса. Температуры представлены в «нормальзованном» и «абсолютном виде». При энергиях Е = 3Дж/см2 температура в максимуме достигает критической (Ткр = 7990К). В случае Е = 5Дж/см2 произошло нарушение условия «механического нагружения» облучаемой поверхности и в пространстве между слоем металла и диэлектриком в момент облучения образовалась «плазменная линза», температуру которой Тпл = 60000К и зафиксировал пирометр.

s

Рисунок 4.7 – Динамика изменения давления в алюминиевом образце при больших плотностях энергии лазерного излучения



Рисунок 4.8 **–** Динамика изменения относительной отражательной способности поверхности образца «Al» при высоких плотностях энергии.

При достаточно высоком уровне плотности энергии лазерного импульса начиная с величин ~ 1Дж/см2 поведение отражательной способности алюминия полностью аналогично результатам, полученным ртути: отражательная способность поверхности «Al» падает практически в 5 раз. Критической точке алюминия соответствует величина относительной отражательной способности ~ 0,24. Следует отметить, что для всех исследованных металлов минимум отражательной способности точно коррелируется с максимумом температуры образца, нагреваемого импульсом лазерного излучения.



Рисунок 4.9 – **Р-Т** диаграмма лазерного нагрева поверхности алюминия

**7. ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ И ИХ ПОГРЕШНОСТИ**

Отражательная способность: ***ρ* = Pотр / Pпад**,

где Pотр, Pпад – соответственно потоки зеркально отраженного и падающего излучения.

***ρо* = Pотр / Pпад** - отражательная способность образцов при низком уровне энергии лазерного импульса (на длине волны ***λ=1062нм***), полученная в тестовых режимах.

Для ртути - *Hg* →  *ρо* = 0,51±0,05

***ρt* = Pотр / Pпад** - отражательная способность образцов при высоком уровне энергии лазерного импульса (на длине волны ***λ=1062нм***), полученная в результате экспериментальных исследований.

***ρотн= ρt /ρo*** – относительная величина отражательной способности, представленная в таблицах:

В случае не прозрачных тел (металлы вдали от перехода металл-диэлектрик) величина ***τ (λ) = 0***и излучательная (поглощательная) способность ***α(λ)***, как спектральная (так и интегральная по длинам волн) определяется В соответствии с законом Кирхгофа следующим образом**:**

***α(λ) = 1 - ρ(λ); ρt(λ) = ρотнρo ;***

***αt(λ) = 1 – ρt(λ) = 1-- ρотнρo***

Таблица №1 – Ртуть (Hg): λ = 1062нм; *ρо* = 0,51±0,05 Pпад = 400МДж/см2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| ***Т(****К)* | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 | 2100 | - | - | - |
| ***ρотн*** | 0,64 ±0,07 | 0,56 ±0,06 | 0,53 ±0,06 | 0,48 ±0,05 | 0,40 ±0,04 | 0,32 ±0,04 | 0,28 ±0,03 | - | - | - |
| ***ρt*** | 0,33 | 0,29 | 0,27 | 0,24 | 0,20 | 0,16 | 0,14 |  |  |  |
| ***αt*** | 0,67 | 0,71 | 0,73 | 0,76 | 0,80 | 0,84 | 0,86 |  |  |  |
| ***Р****(МПа)* | 165 | 185 | 220 | 235 | 260 | 280 | 290 | - | - | - |

Таблица №2 – Ртуть (Hg): λ = 1062нм; *ρо* = 0,51±0,05 Pпад = 530МДж/см2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| ***Т(****К)* | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 | 2100 | 2200 | 2300 | 2400 |
| ***ρотн*** | 0,62 ±0,08 | 0,61 ±0,08 | 0,59 ±0,08 | 0,57 ±0,07 | 0,56 ±0,07 | 0,49 ±0,06 | 0,43 ±0,06 | 0,38 ±0,05 | 0,33 ±0,04 | 0,26 ±0,03 |
| ***ρt*** | 0.32 | 0,31 | 0,30 | 0,29 | 0,29 | 0,25 | 0,22 | 0,19 | 0,17 | 0,13 |
| ***αt*** | 0,68 | 0,69 | 0,70 | 0,71 | 0,71 | 0,75 | 0,78 | 0,81 | 0,83 | 0,87 |
| ***Р****(МПа)* | 300 | 305 | 310 | 325 | 365 | 400 | 445 | 460 | 500 | 560 |

Таблица №2 *(продолжение) –* Ртуть (Hg): λ = 1062нм; *ρо* = 0,51±0.05;Pпад = 30МДж/см2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| ***Т(****К)* | 2500 | 2600 | 2700 | 2800 |  |  |  |  |  |  |
| ***ρотн*** | 0,25 ±0,03 | 0,23 ±0,03 | 0,20 ±0,026 | 0,17 ±0.02 |  |  |  |  |  |  |
| ***ρt*** | 0,13 | 0,120 | 0,10 | 0,09 |  |  |  |  |  |  |
| ***αt*** | 0,87 | 0,88 | 0,90 | 0,91 |  |  |  |  |  |  |
| ***Р****(МПа)* | 570 | 585 | 600 | 635 |  |  |  |  |  |  |

Отражательная способность алюминиевых образцов до воздействия мощного лазерного импульса (на длине волны ***λ=1062нм***) равнялась:

***Al*** → *ρо* = 0,80±0,045

Таблица №3 – Алюминий (Al): λ = 1062нм; *ρо* = 0.80±0.045; Pпад = 1.0 Дж/см2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| ***Т(****К)* | 3000 | 3100 | 3200 | 3300 | 3400 | 3500 | 3600 | 3700 | 3800 | 3900 |
| ***ρотн*** | 0,97 ±0,11 | 0,93 ±0,12 | 0,92 ±0,12 | 0,92 ±0,12 | 0,87 ±0,1 | 0,80 ±0,10 | 0,74 ±0,10 | 0,69 ±0,09 | 0,64 ±0,08 | 0,62 ±0,08 |
| ***ρt*** | 0,78 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,70 | 0,64 | 0,59 | 0,55 | 0,51 | 0,50 |
| ***αt*** | 0,22 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,30 | 0,36 | 0,41 | 0,45 | 0,49 | 0,50 |
| ***Р(****МПа)* | 18 | 38 | 41 | 52 | 52 | 51 | 48 | 38 | - | - |

Таблица №4 – Алюминий (Al); λ = 1062нм; *ρо* = 0,80±0,045; Pпад = 3,0 Дж/см2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| ***Т(****К)* | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 | 6500 | 7000 | 7200 |
| ***ρотн*** | 0,78 ±0,11 | 0,82 ±0,11 | 0,80 ±0,11 | 0,77 ±0,11 | 0,72 ±0,10 | 0,67 ±0,09 | 0,60 ±0,08 | 0.52 ±0,07 | 0,43 ±0,06 | 0,18 ±0,03 |
| ***ρt*** | 0,62 | 0,66 | 0,64 | 0,62 | 0,58 | 0,54 | 0,48 | 0,42 | 0,34 | 0,14 |
| ***αt*** | 0,38 | 0,34 | 0,36 | 0,38 | 0,42 | 0,46 | 0,52 | 0,58 | 0,66 | 0,86 |
| ***Р(****МПа)* | 36 | 38 | 45 | 51 | 60 | 69 | 88 | 106 | 130 | 200 |

Погрешность относительной величины отражательной способности обусловлена систематической (инструментальной) погрешностью и случайной погрешностью, которая, в основном, определяется нестабильностью воспроизведения формы и энергии импульса лазерного излучения и, кроме того, низким качеством собственно лазерного излучения – наличием большого количества «ярких» точек случайным образом, распределенных по сечению пучка. Это особенно заметно при высоком уровне энергии лазерного импульса.

Инструментальная погрешность составляла ~5%, случайная погрешность, обусловленная выше перечисленными факторами, и связанный с ней разброс точек при проведении эксперимента, составляла до ~15% в отдельных экспериментах.

Средняя квадратическая погрешность определения относительной отражательной способности состоит из суммы двух указанных составляющих и для таблиц №1 и №3 равна: 0,116 (11.6%)

Для таблиц №2 и №4 – 0,144 (14.4%)

**8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Свет Д.Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. - М.: Наука, 1967, 236 с.
2. Mintsev V.B., Fortov V.E. Dense plasma properties from shock wave experiments. //J. Phys. A, 2006, vol. 39, 17, p. 4319.
3. Фортов В.Е. Динамические методы в физике плазмы. //УФН, 1982, т. 138, 3, с. 36.
4. Красюк И.К., Пашинин П.П., Семенов А.Ю., Фортов В.Е. Изучение теплофизических и механических свойств вещества в экстремальных условиях. //Квант. электроника, 2003, т. 33, 7, с. 593.
5. Анисимов С.И., Прохоров А.М., Фортов В.Е. Применение мощных лазеров для исследований вещества при сверхвысоких давлениях, //УФН, 1984, т. 142, 3, с. 395.
6. Анисимов С.И. и др. Действие излучения большой мощности на металлы. - М.: Наука, 1970, 272 с.
7. Крохин О.Н. и др. Лазерная плазма. Физика и применения. - М.: МИФИ, 2003, 400 с.
8. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004, 656 с.
9. Карабутов А.А., Каптильный А.Г., Ивочкин А.Ю. Способ калибровки оптического тракта пирометра с помощью модели абсолютно черного тела и устройство его реализующее, Заявка на получение патента на изобретение РФ №2008140241 от 13.10.2008.
10. Физические величины: Справочник. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М.. и др. – М.; Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. ISBN 5-283 – 04013 - 5