

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНВЕРСИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭНЕРГИЮ ПЛАЗМЫ, ОТРАЖЕННОГО СВЕТА И РЕНТГЕНА

С. П. Мартыненко, А. А. Горбунов, В. В. Иванов, П. Ю. Лопатин, Р. В. Гаранин, А. В. Кострикин, В. Н. Пугачева, И. А. Белов, А. Н. Рукавишников, И. В. Никольский

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Во многих лабораториях мира ведутся интенсивные исследования физических процессов, происходящих при взаимодействии мощного лазерного излучения с высокотемпературной плазмой. Глубокое понимание этих процессов необходимо в частности для ответа на вопрос о возможности практической реализации лазерного термоядерного синтеза.

Хотя к настоящему времени выполнено большое количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных взаимодействию лазерного излучения (ЛИ) с различными типами мишеней, остаются вопросы в механизме поглощения и рассеяния ЛИ плазмой, в понимании процесса генерации ею рентгеновского излучения (РИ).

Изучение этого круга вопросов в экспериментах со сферическими мишенями представляет значительные трудности. Вместе с тем, некоторые основные закономерности происходящих процессов можно изучать и в более простых по постановке опытах на плоских мишенях.

Целью данной работы являлось исследование характера пространственного распределения энергии плазмы, РИ и рассеянного ЛИ в результате взаимодействия ЛИ с плоской золотой мишенью при следующих условиях: лазерный импульс с длиной волны $\lambda = 527$ нм и длительностью 4 нс воздействует на плоскую золотую фольгу толщиной 30 мкм с интенсивностью в диапазоне $I = (0,8 \div 5) \cdot 10^{14}$ Вт/см².

Для достижения поставленной цели было необходимо решить ряд задач:

- 1) выбрать метод для исследования баланса энергии и индикатрисы рассеяния;
- 2) произвести калибровку калориметров в интересующем диапазоне длин волн;
- 3) провести серию экспериментов по исследованию конверсии лазерного излучения в рентгеновское излучение и изучению индикатрисы отраженного ЛИ и плазмы.

Методика исследования характера пространственного распределения энергии разлетающейся плазмы, РИ и рассеянного ЛИ основывалась на использовании калориметрической сборки [1], однако, она была переработана для регистрации энергий, близких к минимальному пороговому значению используемых калориметров. Схема была дополнена усилителями постоянного тока, коэффициент усиления которых мог изменяться от $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^5$. Калориметрическая сборка состояла из плазменно-световых

калориметров (ПСК) и рентгеновских калориметров (РК), конструкция которых будет описана ниже.

На рис. 1 приведена схема устройства ПСК [2].

ЛИ, рассеянное плазмой, вместе с потоком частиц и РИ через входную диафрагму 1 попадает на приемную площадку 2 плазменного калориметра. Приемная площадка 2 представляет собой диск из стекла К8 толщиной 1 мм, имеющего на длине волны ЛИ $\lambda = 527$ нм коэффициент поглощения $< 1\%$ [3]. С учетом отражения лазерного излучения от граней стекла 95 % всего излучения данного диапазона частот проходит через стекло К8, попадает на площадку 3, где поглощается. Площадка 3 представляет собой диск из стекла НС12, которое на длине волны 527 нм имеет коэффициент пропускания ЛИ $< 0,1\%$ [4]. Нагрев площадки 2 обусловлен поглощением в ней энергии потока плазмы и РИ [3]. Разница температуры между приемными площадками 2, 5 и термостатом 6 измеряется с помощью термоэлектрических модулей, на основе полупроводниковых твердотельных электрических микроохладителей ТЭМО-8 4 [5, 6]. Термостатом является латунная шайба, имеющая вес много больше, чем вес приемной площадки. Определение поглощенной энергии проводится путем одновременного измерения многоканальной системой сбора данных сигналов с термоэлектрических модулей с учетом калибровки каждой из приемных площадок.

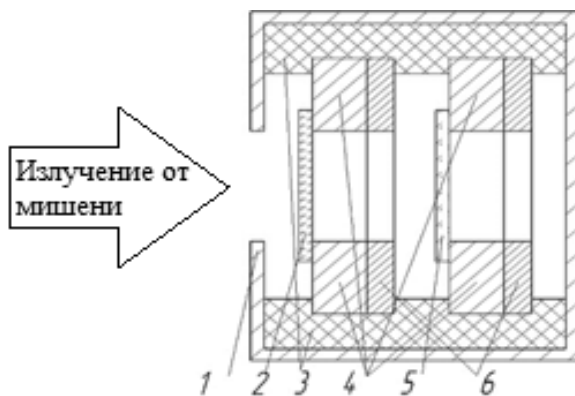


Рис. 1. Конструктивная схема ПСК: 1 – входная диафрагма; 2 – приемная площадка плазменного калориметра (стекло К8); 3 – диэлектрические проставки; 4 – твердотельные электрические микроохладители; 5 – приемная площадка светового калориметра (стекло НС12); 6 – термостаты

На рис. 2 изображена схема калориметрической сборки ПСК, которая была установлена в камере на

расстоянии 185 мм от мишени. Сборка представляла собой 13 ПСК, размещенных в одной плоскости, равномерно по дуге с шагом 15° . Величина полного угла, стягиваемого дугой, составляла 180° .

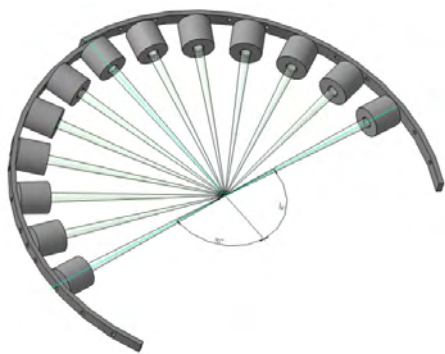


Рис. 2. Схема калориметрической сборки ПСК, участвовавшей в экспериментах по исследованию конверсии ЛИ в РИ

В отличие от работы [1] облучение мишеней ЛИ проводилось под тремя углами падения: 0 , 30 и 60 градусов. Калориметрические измерения проводились в двух плоскостях: в плоскости падения ЛИ и в плоскости, перпендикулярной плоскости падения.

В зависимости от задач эксперимента, ось центрального калориметра совпадала с нормалью мишени – в экспериментах, в которых дуга калориметрической сборки располагалась в плоскости падения ЛИ, либо с осью отражённого от мишени ЛИ – в экспериментах, в которых плоскость падающего ЛИ перпендикулярна плоскости калориметрической сборки.

РК также были расположены в одной плоскости равномерно по дуге окружности на расстоянии 500 мм от мишени. Величина центрального угла, стягиваемого дугой, составляла 90° . Принципиальная схема устройства РК изображена на рис. 3 [2].

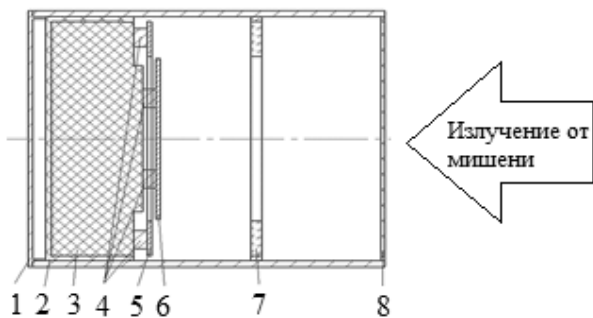


Рис. 3. Принципиальная схема устройства рентгеновского калориметра: 1 – корпус калориметра; 2 – термоизоляционная подложка; 3 – тело термостата; 4 – твердотельные электрические микроохлаждатели; 5 – фоновая приемная площадка; 6 – основная приемная площадка; 7 – защитное стекло; 8 – фильтр $C_{10}H_8O_4$ (0,5 мкм)

В конструкции рентгеновского калориметра использовались две медные приемные площадки, толщиной 250 мкм одинаковой площади и массы. Одна

из площадок выполнена в виде диска $\varnothing 40$ мм, расположенного внутри второй приемной площадки, выполненной в виде кольца с внешним диаметром $\varnothing 64$ мм и шириной 9,5 мм. Для уменьшения поглощения излучения видимого диапазона их поверхность выполнена зеркальной с нанесением слоя Cr . Внешняя кольцевая площадка защищена от воздействия РИ с помощью кольца тех же размеров, выполненного из стекла толщиной 1,2 мм, и служит для измерения вклада в полезный сигнал энергии рассеянного ЛИ.

Для отсечения потока плазмы на калориметр устанавливался рентгеновский фильтр из $C_{10}H_8O_4$ (полиэтилентерефталат, лавсан), который эффективно пропускает рентгеновское излучение. Спектральная характеристика фильтра представлена на рис. 4.

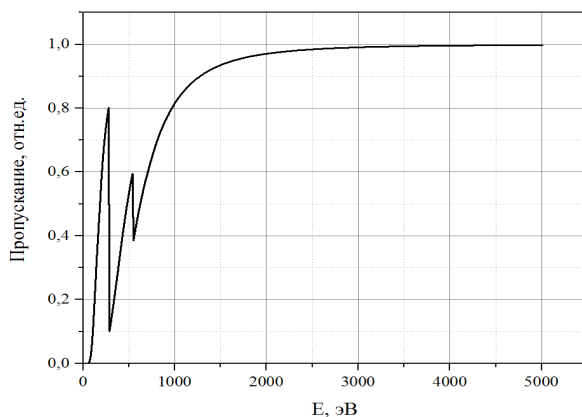


Рис. 4. Спектральная характеристика фильтра $C_{10}H_8O_4$ 0,5 мкм

Перед проведением экспериментов проводилась калибровка обоих видов калориметров. Процесс калибровки ПСК заключался в определении чувствительности каждого калориметра к известной величине энергии ЛИ в интересующем диапазоне. Для этого использовался твердотельный импульсно-периодический лазер с рабочей длиной волны 532 нм для имитации рассеянного ЛИ и 266 нм для имитации излучения плазмы. Энергия ЛИ достаточно точно измеряется (с погрешностью 2,5 %) калиброванными средствами.

Принципиальная схема калибровочного комплекса изображена на рис. 5.

ЛИ из 1 с помощью телескопа 2 и фокусирующей линзы 3 трансформировалось и вводилось в вакуумную камеру 7. В центре вакуумной камеры 7 располагался калориметр 6, на исследуемую площадку которого подавалось ЛИ необходимой длины волны. Энергетические параметры ЛИ контролировались с помощью калиброванного на заданную длину волны измерителя энергии 4 путем отражения части энергии от клина 5. Давление в вакуумной камере составляло $\approx 5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Сигналы с калибруемых калориметров усиливались с помощью усилителей постоянного тока, и регистрировались многоканальной системой сбора данных.

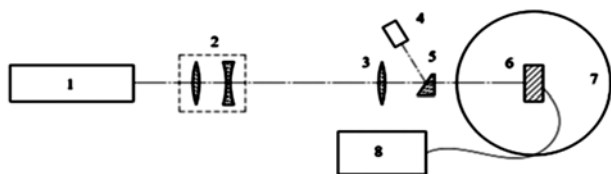


Рис. 5. Принципиальная схема калибровки калориметров: 1 – лазерный комплекс; 2 – телескоп; 3 – фокусирующая линза; 4 – калориметр; 5 – клин; 6 – калибруемая площадка калориметра; 7 – вакуумная камера; 8 – многоканальная система сбора данных с усилителями

Калибровка плазменно-световых калориметров заключалась в определении чувствительности каждого калориметра к известной величине энергии ЛИ в интересующем диапазоне длин волн. Так же процесс калибровки включал в себя исследование взаимного влияния площадок.

Погрешность калибровки определялась следующими факторами:

1) погрешностью работы усилителей постоянно-го тока, используемых в тракте регистрации – 2,5 %;

2) погрешностью прибора регистрации сигналов – паспортное значение, которое зависит от уровня измеряемого сигнала и от диапазона регистрации, составляет 1 %;

3) взаимным влиянием площадок калориметров. Вклад сигнала с площадки К8 в сигнал с площадки НС12 – 2 %, и вклад сигнала с площадки НС12 в сигнал с площадки К8 – 5 %;

4) пропусканьем площадки К8 на длине волны 248 нм – 3 %;

5) погрешностью контрольного калориметра – 2,5 %;

6) погрешностью работы термоэлектронных микроохладителей – 10 %.

Погрешность для ПСК высчитывалась по формуле:

$$\delta W_{\text{пск}} = \sqrt{\delta W_1^2 + \delta W_2^2 + \dots + \delta W_6^2}. \quad (1)$$

Таким образом, погрешность значений, полученных при калибровке ПСК, составила 12 % для площадки К8 и 11 % для площадки НС12. Полученные значения чувствительностей площадок к поглощенному излучению для используемых ПСК с учетом погрешности представлены в табл. 1.

Разница чувствительностей площадок различных калориметров может быть связана с конструктивными особенностями калориметров.

Перед проведением экспериментов проводилась калибровка РК. Она включала в себя определение чувствительности центральной площадки к поглощенному излучению и оценку вклада ЛИ в общий сигнал с помощью лазерного комплекса. На поверхность центральной площадки наносилось несколько слоев пламенной сажи, поглощающий 98 % всего падающего излучения (532 нм), с массой много меньше массы самой приемной площадки.

Погрешность для РК обуславливалась следующими параметрами:

Данные по калибровке ПСК с учетом погрешностей

Номер калориметра ПСК	Чувствительность площадки К8, мВ/Дж	Чувствительность площадки НС12, мВ/Дж
1	0,8±0,1	0,9±0,1
2	0,68±0,08	0,8±0,1
3	0,8±0,1	0,86±0,09
4	1,2±0,1	1,0±0,1
5	1,4±0,2	1,2±0,1
6	2,3±0,3	1,9±0,2
7	1,9±0,2	1,9±0,2
8	2,1±0,3	1,5±0,2
9	1,9±0,2	1,9±0,2
10	1,9±0,2	2,0±0,2
11	2,1±0,3	2,1±0,2
12	0,8±0,1	0,86±0,09
13	0,72±0,09	0,8±0,1

1) погрешностью прибора регистрации сигналов – 1 %;

2) погрешностью контрольного калориметра – 2,5 %.

3) взаимным влиянием площадок – 3,5 %;

4) погрешностью работы термоэлектронных микроохладителей – 10 %.

Тогда погрешность для РК высчитывалась по формуле:

$$\delta W_{\text{брк}} = \sqrt{\delta W_1^2 + \delta W_2^2 + \delta W_3^2 + \delta W_4^2}. \quad (2)$$

Таким образом, погрешность калибровки составила 11 %. Значения полученных чувствительностей к поглощенному излучению для используемых калориметров с учетом полученных погрешностей представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения чувствительностей для РК

Номер рентгеновского калориметра	Чувствительность мВ/Дж
1	0,78±0,09
2	7,3±0,9
3	3,9±0,4
4	4,5±0,5
5	14±2

Как и в случае с ПСК разница чувствительностей площадок различных калориметров также может быть связана с их конструктивными особенностями.

На рис. 6 показано расположение диагностик в камере взаимодействия при проведении исследования конверсии ЛИ в РИ. Показано расположение калориметрических сборок относительно плоскости падающего ЛИ.

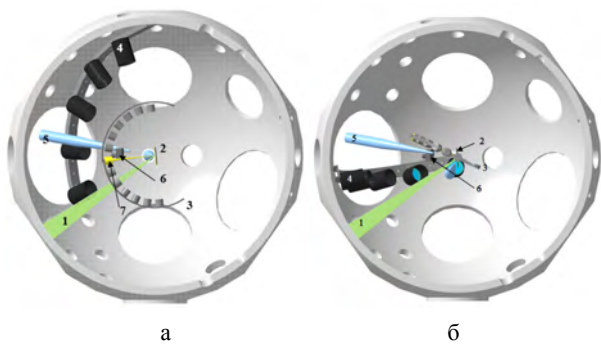
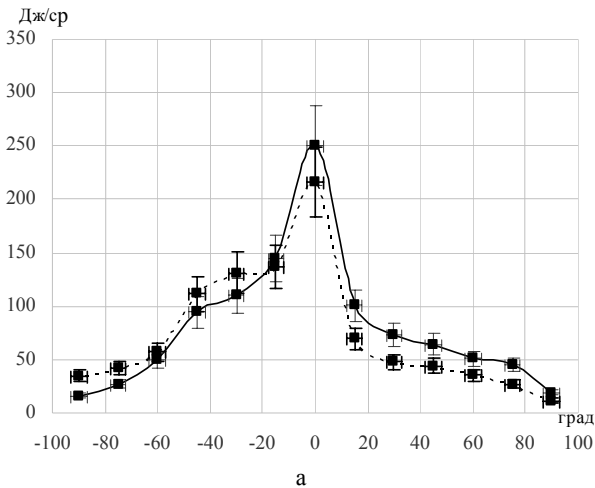
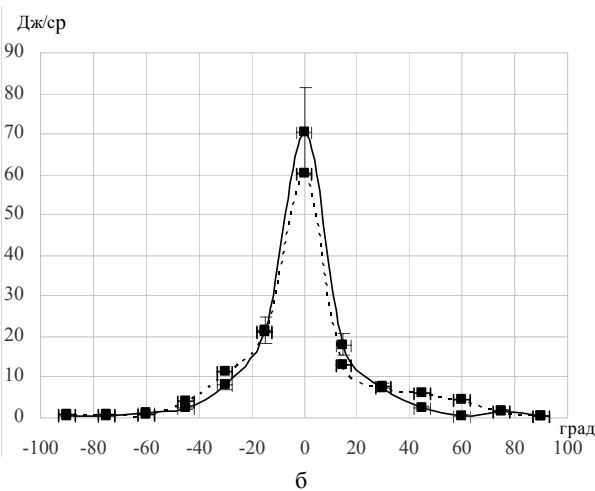


Рис. 6. Расположение калориметрических сборок в камере взаимодействия в экспериментах при измерениях в разных плоскостях падения ЛИ на мишень: а – в плоскости падения ЛИ, б – в перпендикулярной плоскости падения ЛИ; 1 – ЛИ; 2 – мишень; 3 – ПСК; 4 – рентгеновские калориметры; 5 – обскура (для измерения интенсивности ЛИ на мишени); 6 – электронные спектрометры; 7 – позиция центрального калориметра

Результаты измерений приведены на рис. 7–9.



а

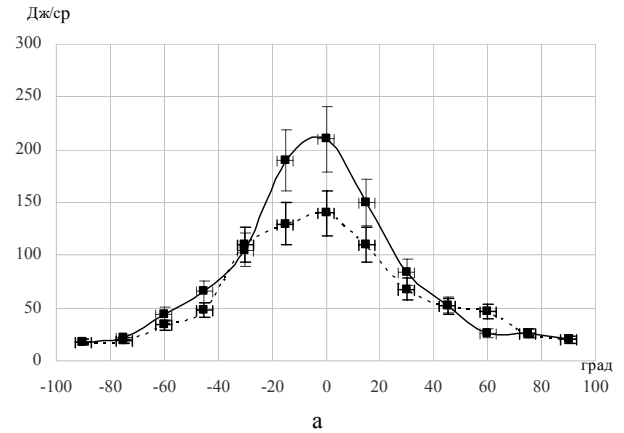


б

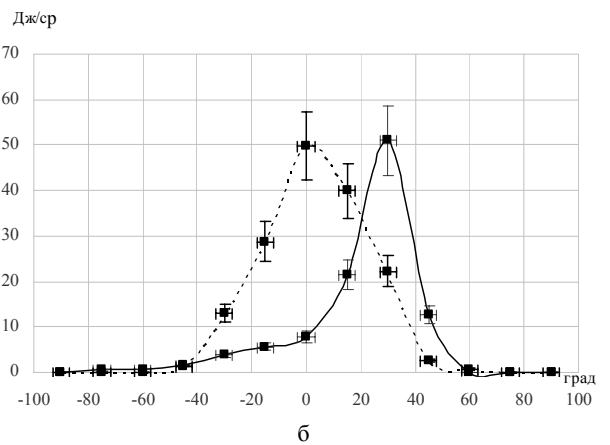
Рис. 7. Типичные результаты измерений в экспериментах с углом падения ЛИ на мишень 0°: а – плазменных калориметров; б – световых калориметров

На рис. 7 сплошной линией изображены эксперименты с расположением дуги калориметров в плоскости падения ЛИ, пунктирной линией изображены

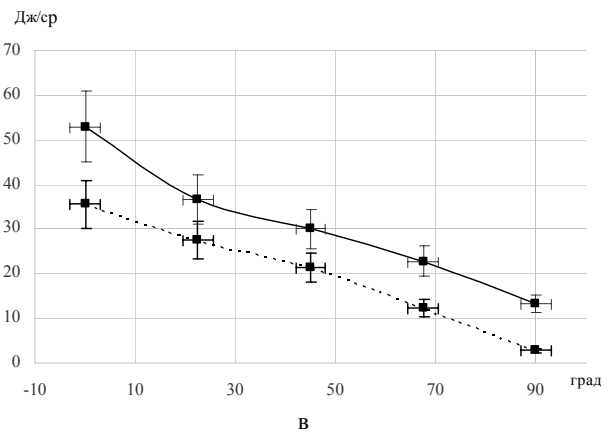
результаты экспериментов при расположении дуги калориметров в плоскости, перпендикулярной плоскости падения ЛИ. Данные результаты представлены для одного уровня лазерной энергии.



а



б



в

Рис. 8. Типичные результаты измерений в экспериментах с углом падения ЛИ на мишень 30°: а – плазменных калориметров, б – световых калориметров, в – РК

На рис. 8 сплошной линией изображены эксперименты с расположением дуги калориметров в плоскости падения ЛИ, пунктирной линией изображены результаты экспериментов при расположении дуги калориметров в плоскости, перпендикулярной плоскости падения ЛИ. Данные результаты приводятся для одного уровня лазерной энергии.

В экспериментах с углом падения лазерного излучения на мишень 30° коэффициент конверсии составил 14 ± 2 %. Значение коэффициента конверсии получено в предположении симметричной картины распределения РИ относительно нормали мишени.

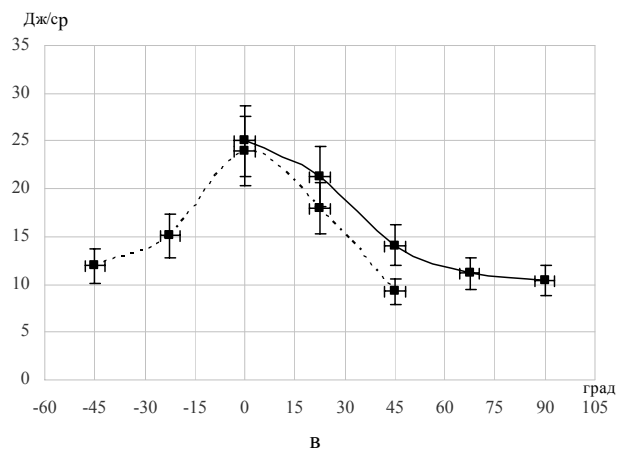
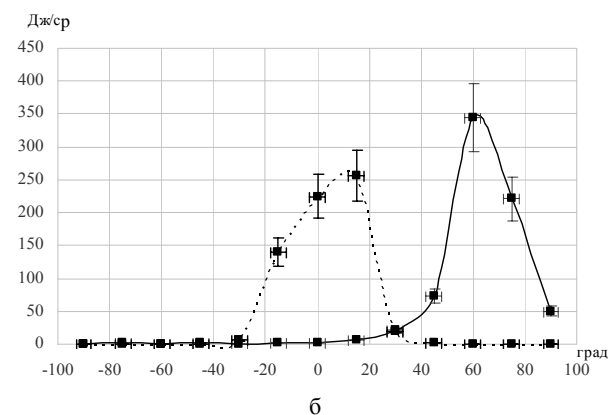
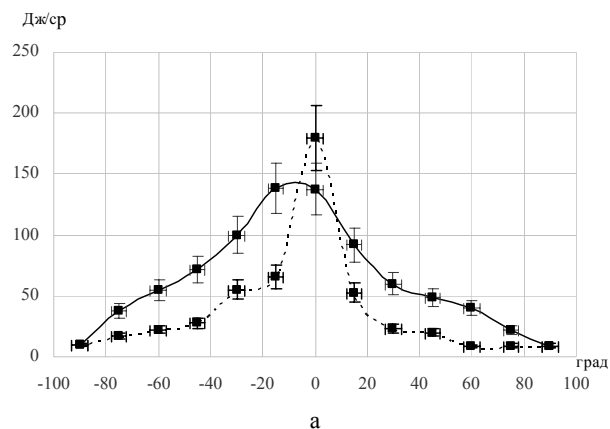


Рис. 9. Типичные результаты измерений в экспериментах с углом падения ЛИ на мишень 60° : а – плазменных калориметров, б – световых калориметров, в – РК

На рис. 9 сплошной линией изображены эксперименты с расположением дуги калориметров в плоскости падения ЛИ, пунктирной линией изображены результаты экспериментов при расположении дуги калориметров в плоскости, перпендикулярной плоскости падения ЛИ. Данные результаты приводятся для одного уровня лазерной энергии.

В экспериментах с углом падения лазерного излучения 60° к нормали мишени, коэффициент конверсии составил 12 ± 2 %. Значение коэффициента конверсии получено в предположении симметричной картины распределения РИ относительно нормали мишени.

Выводы

- Произведена калибровка калориметров.
- Выбрана методика и адаптирована для проведения калориметрических измерений для экспериментов с низким уровнем энергии регистрации.
- Проведена серия экспериментов по исследованию эффективности конверсии ЛИ в отраженное ЛИ, энергию плазмы и РИ плазмы при различных углах падения ЛИ на мишень (0° , 30° и 60°) в двух плоскостях относительно падения ЛИ на мишень.

Показана картина распределения плазменных потоков, рассеянного ЛИ и РИ при

разных углах воздействия на мишень ЛИ. При угле падения на мишень 0° плазма и отраженный свет имеют четко выраженную индикатрису в направлении нормали мишени, что подтверждается проведенными работами [7]. В опытах с углом падения на мишень 30° , когда калориметры расположены в плоскости падения лазерного луча, наблюдается четкая индикатриса рассеянного ЛИ в направлении отраженного от мишени лазерного излучения. В тех же экспериментах зарегистрировано отражение рассеянной плазмы в сторону, обратную падающему лазерному лучу. В экспериментах с падением ЛИ под углом 60° , когда калориметры расположены в плоскости падения лазерного луча, также наблюдается направленность рассеянной световой компоненты сигнала в направлении отраженного от мишени лазерного излучения. Распределение рентгена в опытах 30° и 60° не имеет явно выраженной индикатрисы.

Литература

1. Belkov S. A., Bessarab A. V., Dolgoleva G. V., Kunin A. V. Investigation of laser energy conversion into plasma x-rays in the system ISKRA-4 // Czechoslovak journal of physics. 1992. Vol. 42, N10. P. 969.
2. Gunn S. R., Rupert V. C. Calorimeters for Measurement of Ions, X-Ray, and Scattered Radiations in Laser-Fusion Experiments // Review of Scientific Instruments. 1977. Vol.48, N11. P. 1375–1380.
3. ГОСТ 3514-78. Стекло оптическое бесцветное.
4. ГОСТ 9411-91. Стекло оптическое цветное.
5. Гассанов П., Войтенко Г., Возная Г. Термоэлектронные приборы ТЭМО и ТЭБ // Радио. 1983. № 11. С. 59–60.
6. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев: Наукова думка, 1979.
7. Даниелян Г. Л., Осипов М. В. и др. Метод регистрации рассеянного плазмой лазерного излучения. Москва: Препринт ФИАН, 2007. № 25.