

# РАЗРАБОТКА КАЛОРИМЕТРА ДЛЯ ПРЯМОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*А. С. Мелехин, О. Е. Авдошина, В. А. Мазанов, Е. Н. Макейкин, К. Р. Мансуров,  
С. В. Маркин*

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

В исследованиях с использованием лазеров часто возникает необходимость в измерении энергии лазерного излучения (ЛИ). Для этого используют специальные приборы – калориметры. В настоящее время существует множество калориметров различных фирм-производителей, которые работают в различных энергетических диапазонах. Однако их недостатком является небольшое значение максимального предела по энергии, в большинстве случаев не превышающего порядка 200 Дж [1]. Для измерения более высоких энергий ЛИ используются специальные оптические элементы, например, оптический клин. Отводя часть излучения, и направляя ее на приемную площадку калориметра, рассчитывается энергия падающего ЛИ. Но это приводит к потере части излучения, оценка энергии которой вызывает значительные трудности и повышает погрешность измерения.

В настоящее время фирма Ophir разработала и производит калориметры для прямого измерения мощности 1,5 кВт и выше. Однако предел измерения энергии составляет 200 Дж.

Один из подобных приборов показан на рис. 1.

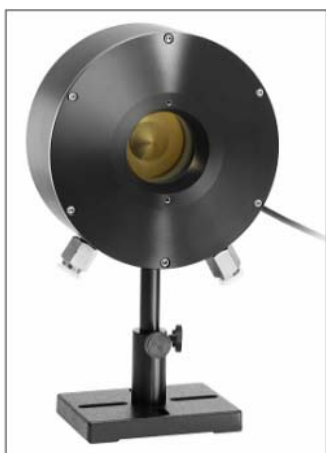


Рис. 1. Внешний вид измерителя мощности и энергии 1,5KW Power/Energy Sensor фирмы Ophir

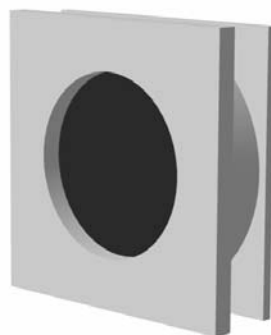


Рис. 2. Схематический внешний вид калориметра

В этом приборе в центре приемной площадки сенсора используется специальный оптический конус, чтобы отражать лазерный пучок на периферию кругового сенсора. Это увеличивает площадь поглощения ЛИ и уменьшает эффективную плотность мощности до допустимых уровней. Тем самым увеличивается срок службы прибора. Однако стоимость такого калориметра высока.

Поэтому для измерения высоких энергий и мощностей ЛИ напрямую – т. е. без использования дополнительных оптических элементов, возникла необходимость в разработке калориметра, предназначенного для измерения высокой энергии лазерного излучения.

В ИЛФИ был разработан калориметр на основе тепловых измерительных головок, позволяющий измерять энергию ЛИ до 100 кДж. Схематический внешний вид калориметра представлен на рис. 2.

## Схема калибровки калориметра

Калибровка калориметра проводилась по схеме, показанной на рисунке 3.

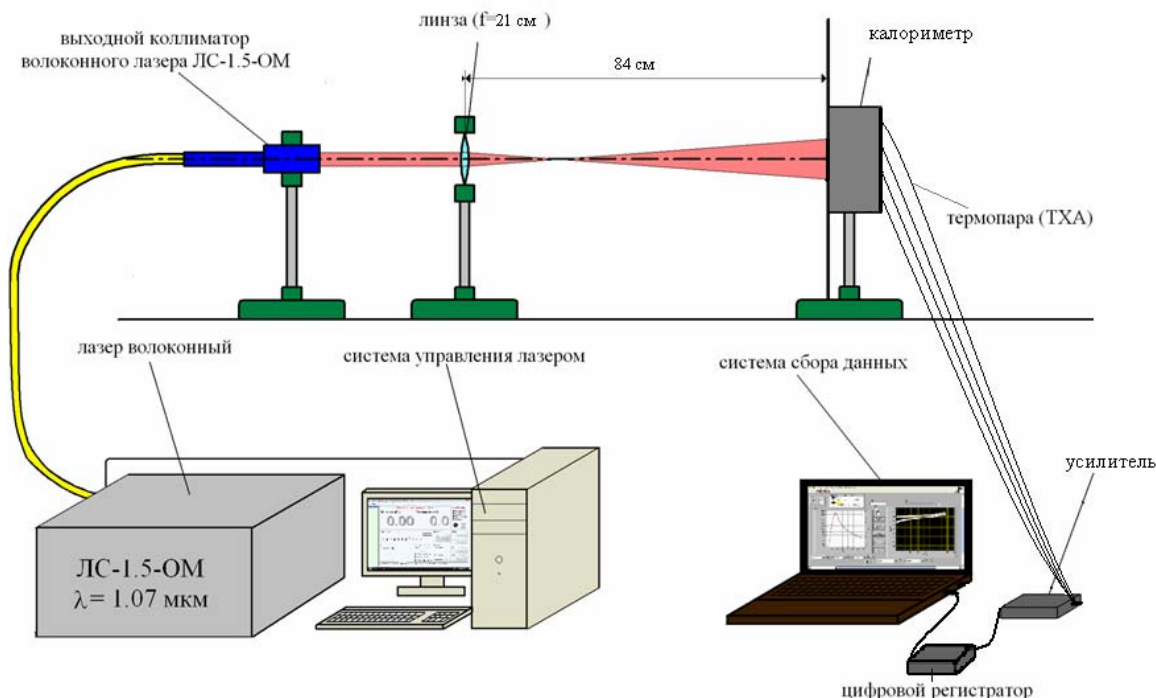


Рис. 3. Схема калибровки калориметра

Излучение рабочего лазера диаметром 3 см с заданной энергией падало на приемный элемент калориметра и нагревало его. В процессе нагрева и охлаждения с тыльной стороны термопарами измерялась температура приемного элемента в каждый момент времени. Сигналы с термопар поступали на усилитель, далее на АЦП и затем регистрировались системой сбора и обработки экспериментальной информации «NI» [2]. Для обработки экспериментальных данных представленных в цифровом виде использовалась программная среда Origin.

### Определение параметров ЛИ

Задание временных и энергетических параметров ЛИ на установке осуществляется с помощью программы управления «LaserNet». Значение выходной мощности устанавливается по величине тока накачки диодов лазера от его максимального значения, длительность ЛИ задается временем удержания требуемого уровня накачки.

Для проверки стабильности работы лазера, определения связи между условными значениями мощности и длительности импульса ЛИ, задаваемыми в программе «LaserNet», и фактическими характеристиками ЛИ, а также для определения потерь при использовании оптической схемы, были проведены измерения, схема которых представлена на рис. 4. Длительность импульса ЛИ определялась по изменению сигнала на кремниевом фотодиоде (ФД), энергия ЛИ определялась с помощью измерителя мощности/энергии Ophir L1500W-LP-V1-ROHS, который попеременно располагался либо после выходного коллиматора лазера, либо после оптической схемы перпендикулярно лазерному пучку.

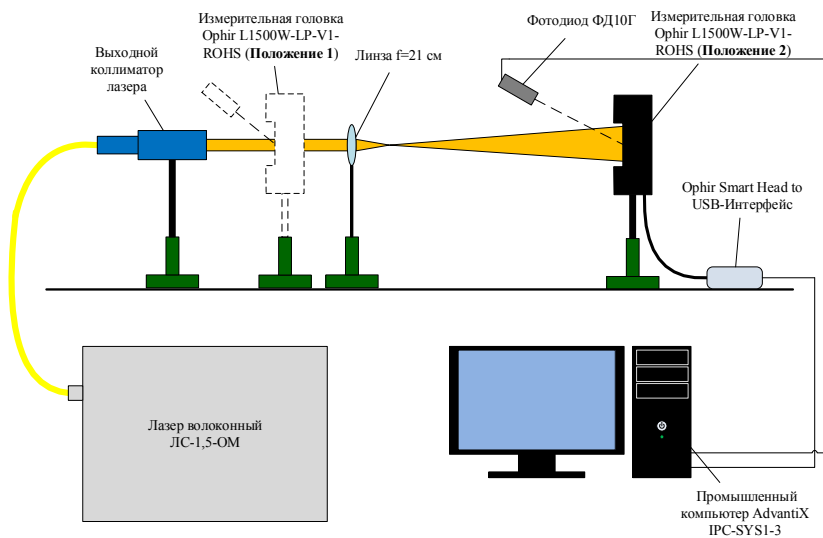


Рис. 4. Схема измерения параметров ЛИ лазера

В результате измерений с помощью ФД были получены зависимости, характеризующие форму и длительность импульса ЛИ. Результаты измерений представлены в табл. 1. На рис. 5 изображена типичная форма импульса, полученная в опытах.

Таблица 1

Связь между задаваемой в программе и фактической длительностью ЛИ

Длительность ЛИ по программе, с	Фактическая длительность ЛИ, с	Относительная погрешность, %
0,25	0,2501	0,04
0,25	0,2501	0,04
0,25	0,2502	0,08
0,1	0,0999	0,1
0,1	0,1001	0,01
0,1	0,1002	0,2
1	1,0002	0,02
1	1,0001	0,01
1	1,0014	0,14

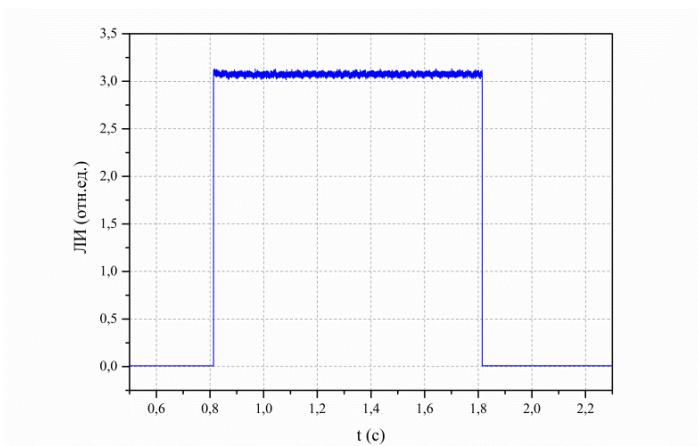


Рис. 5. Форма импульса ЛИ

Как видно из табл. 1 и рис. 5 форма импульса ЛИ – прямоугольник, длительность импульса соответствует заданной в программе управления с погрешностью не более 0,2 %.

Фактический уровень мощности определялся как  $P_{\text{факт}} = E_{\text{Ophir}}/t_{\text{факт}}$ , где  $E_{\text{Ophir}}$  – энергия ЛИ, определенная с помощью измерителя мощности/энергии Ophir L1500W-LP-V1-ROHS,  $t_{\text{факт}}$  – длительность импульса ЛИ, измеренная с помощью ФД. Результаты измерений мощности ЛИ после коллиматора представлены на рис. 6.

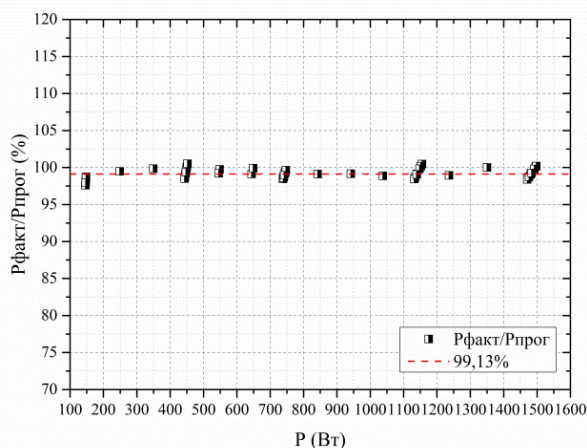


Рис. 6. Мощность ЛИ относительно задаваемой в программе «LaserNet»

Из рис. 6 видно, что фактический уровень мощности на выходе коллиматора составляет  $(99\pm 1)\%$  мощности ЛИ, задаваемой в программе управления лазером.

Для формирования пятна требуемой геометрии излучение лазера расширялось линзой из стекла К8. Для определения фактических параметров ЛИ на калориметре, были проведены измерения при установке Ophir L1500W-LP-V1-ROHS в положение 2.

Результаты измерений параметров ЛИ при различных режимах работы установки и при увеличении пятна ЛИ оптической схемой представлены в табл. 2 и на рис. 7.

Обобщенный коэффициент потерь на оптической схеме определялся из формулы:

$$\chi = \frac{P_{\text{факт}}}{P_0} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Таблица 2

Соотношение мощности, задаваемой в программе управления лазером с фактической мощностью на образце

Параметры, задаваемые в программе управления лазером			Фактические параметры		
$P_0$ , Вт	$t$ , с	$E_0$ , Дж	$E_{\text{Ophir}}$ , Дж	$P_{\text{факт}}$ , Вт	$\chi$ , %
130	1	130	112,6	112,6	86,6
140	1	140	121,3	121,3	86,6
150	1	150	130	130	86,7
160	1	160	138,7	138,7	86,7
170	1	170	147,4	147,4	86,7
180	1	180	156,3	156,3	86,8
190	1	190	165,3	165,3	87,0
200	1	200	174	174	87,0
210	1	210	182,8	182,8	87,0
220	1	220	191,2	191,2	86,9
230	1	230	199,9	199,9	86,9

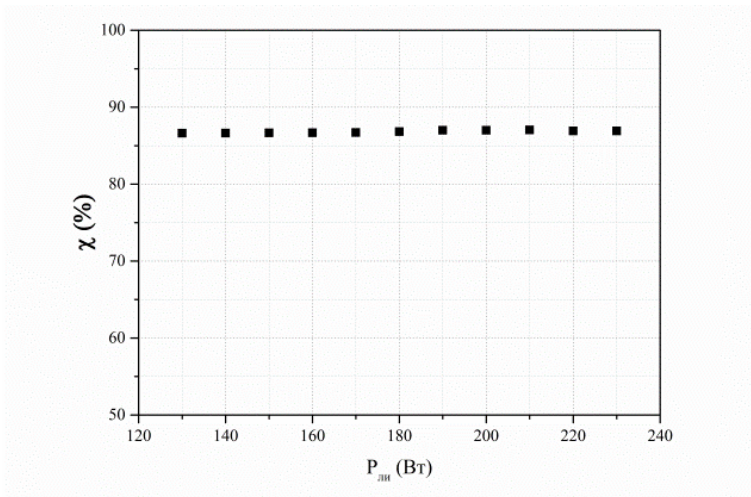


Рис. 7. Зависимость пропускания оптической схемы от уровня мощности

Из табл. 2 и рис. 7 видно, что суммарные потери энергии на оптической схеме, составляют величину  $\chi \sim 13\%$ .

### Измерение температуры приемного элемента калориметра

Измерения температуры диска осуществлялись путем регистрации значений входных электрических сигналов, пропорциональных изменениям термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) на выходе хромель-алюмелевых термопар, установленных в приемном элементе.

Схема измерения температуры диска термопарами приведена на рис. 8.

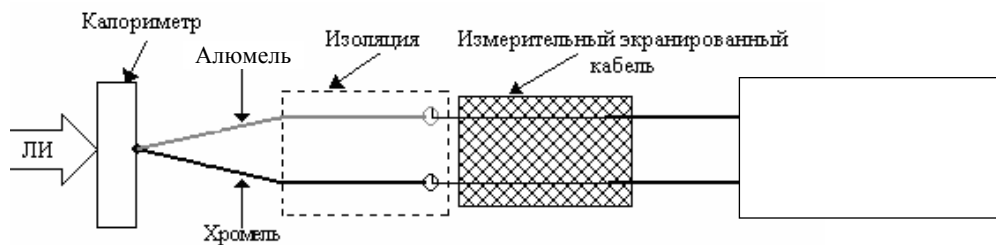


Рис. 8. Схема измерения температуры термопарой

Температура свободных концов термопары  $T_{св}$ , измеренная с помощью цифрового мультиметра Mastek MAS838, использовалась для внесения поправки в измеренное значение температуры  $T$  °С:

$$T \text{ } ^\circ\text{C} = \Delta T + T_{св}, \quad (2)$$

где  $\Delta T$  – измеренная термопарой избыточная температура приемного элемента.

Калибровочные зависимости используемой хромель-алюмелевой термопары (ТХА) брались в виде аппроксимирующего полинома 9-й степени [3]. По этим зависимостям программа регистрации системы сбора и обработки экспериментальной информации пересчитывала электрические сигналы термопар во временные зависимости температуры. Эти данные в цифровом формате сохранялись на жестком диске компьютера в виде файлов, позволяющих производить их численный обработку и анализ.

Калибровочные зависимости используемых хромель-алюмелевых термопар (ТХА) представлены в табл. 3.

Калибровочные зависимости ТХА термомпары [3]

Тип термомпары	Диапазон температуры, °С	Диапазон ТЭДС, мВ	Полином
ТХА	0–500	0–20,6	$T = \sum_{i=0}^9 C_i \cdot E^i$ $C_0 = 0, C_1 = 2,508355 \cdot 10^{-1}, C_2 = 7,860106 \cdot 10^{-2}, C_3 = -2,503131 \cdot 10^{-3},$ $C_4 = 8,315270 \cdot 10^{-4}, C_5 = -1,228034 \cdot 10^{-4}, C_6 = 9,804036 \cdot 10^{-5},$ $C_7 = -4,413030 \cdot 10^{-5}, C_8 = 1,057734 \cdot 10^{-6},$ $C_9 = -1,052755 \cdot 10^{-8}$

В табл. 4 представлена погрешность измерения температуры хромель-алюмелевой термомпары [3].

Таблица 4

Погрешность измерения температуры термомпарой (ТХА)

Тип термомпары	Диапазон, °С	Суммарная относительная погрешность измерения Т, %
ТХА	0–333	±5,0
	333–1370	±4,9

Система сбора и обработки экспериментальной информации размещалась в рабочей станции на базе промышленного компьютера под управлением специально разработанного программного обеспечения.

### Определение связи между нагревом калориметра и падающей на него энергии ЛИ

Каждому значению энергии, поданному на калориметр  $E_{ЛИ}$ , соответствует некоторая доля поглощенной энергии  $E \square kE_{ЛИ}$ , приводящая к приросту температуры приемного элемента на величину  $\Delta T$ .

Уравнение теплопроводности при таком нагреве калориметра ЛИ имеет вид:

$$c\rho \frac{dT}{dt} = (1-R)I_{ЛИ} + \lambda \nabla^2 T - \alpha(T - T_0) \quad (3)$$

где  $c$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  – теплоемкость, плотность и теплопроводность графита,  $R$  – коэффициент отражения поверхности графита,  $\alpha$  – коэффициент конвективного охлаждения,  $(1-R)I_{ЛИ}$  – распределение интенсивности ЛИ на поверхности образца.

Решение этого уравнения достаточно сложно и требует привлечения численных методов решения уравнений в частых производных. Однако существует связь между поглощенной энергией ЛИ и максимальным нагревом приемного элемента. Выражение для поглощенной энергии на момент выравнивания температуры по объему ( $\nabla^2 T = 0$ ) графитового диска-абсорбера можно получить, проинтегрировав выражение (3) до момента выравнивания температуры по объему графитового диска:

$$cm\Delta T_{cp} = (1-R)E_{ЛИ} - S\alpha \cdot f(\Delta T_{cp}) \quad (4)$$

где  $\Delta T_{cp}$  и  $S$  – средняя температура и площадь поверхности абсорбера,  $f(\Delta T_{cp})$  – некоторая функция, связанная с интегралом температуры от времени. В приближении линейного роста температуры от времени второй член уравнения (4) имеет квадратичную зависимость от средней температуры. Выражая из уравнения (4), энергию ЛИ получим:

$$E_{\text{ЛИ}} = (C_p \cdot m \cdot \Delta T_{\text{ср}} + \alpha \cdot S \cdot f(\Delta T_{\text{ср}})) / (1 - R) \quad (5)$$

или введя константы  $K_1 = C_p \cdot m / (1 - R)$  и  $K_2 = \alpha \cdot S / (1 - R)$ :

$$E_{\text{ЛИ}} = K_1 \cdot \Delta T_{\text{ср}} + K_2 \cdot (\Delta T_{\text{ср}})^2 \quad (6)$$

Как видно из формулы (6), поглощенная энергия  $E_{\text{ЛИ}}$  квадратично зависит от средне-интегрального приращения температуры  $\Delta T_{\text{ср}}$ . Теплофизические характеристики материала абсорбера и параметры его конвективного охлаждения находятся из справочников или определяются в специально поставленных экспериментах. В данной работе эти константы уравнения (6) были определены эмпирически при калибровке калориметра.

На рис. 9 приведены временные зависимости показаний термопар, полученные в одном из опытов.

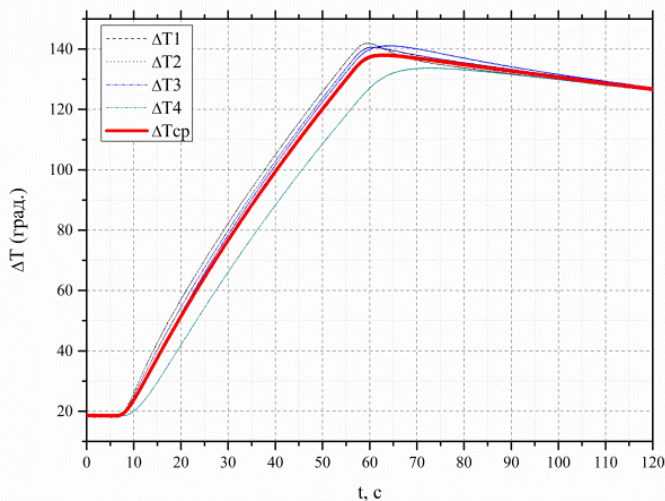


Рис. 9. Зависимости от времени средней температуры и температуры, измеренной термопарами

В зачетных измерениях средняя температура  $\Delta T_{\text{ср}}$  определялась по формуле:

$$\Delta T_{\text{ср}} = (\Delta T1 + \Delta T2 + \Delta T3 + \Delta T4) / 4, \quad (8)$$

где  $\Delta T1$ ,  $\Delta T2$ ,  $\Delta T3$ ,  $\Delta T4$  – приращение температуры, измеряемое термопарами №№ 1, 2, 3 и 4, соответственно.

### Калибровочная зависимость

Калибровка разработанного калориметра проводилась при различных уровнях мощности ЛИ равных 650, 850, и 1250 Вт с различным временем воздействия ЛИ на приемный элемент калориметра. Таким образом, были получены зависимости падающей на калориметр энергии ЛИ и средней температуры  $\Delta T_{\text{ср}}$ .

По полученным данным был построен калибровочный график, представленный на рис. 10. В программной среде Origin была подобрана аппроксимирующая функция и построена аппроксимирующая кривая зависимости поглощенной калориметром энергии ЛИ от усредненной температуры приемного элемента.

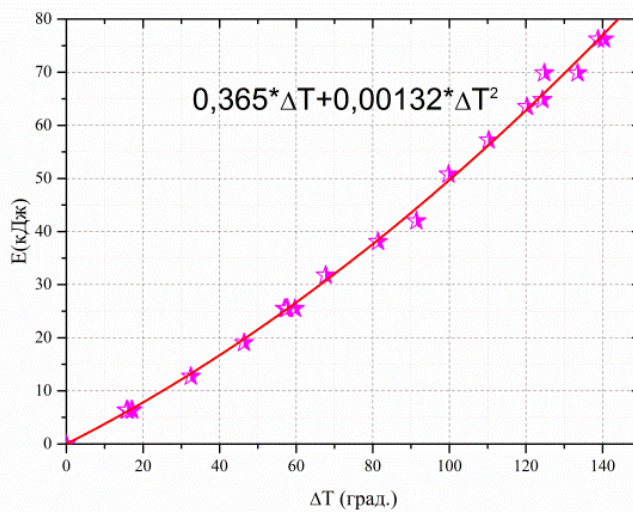


Рис. 10. Калибровочная кривая зависимости поглощенной калориметром энергии ЛИ от температуры приемного элемента

Полученные экспериментальные данные с точностью  $\pm 5\%$  аппроксимируются зависимостью  $E(\Delta T) = 0,365 \cdot \Delta T + 0,00132 \cdot \Delta T^2$ .

Регистрация сигнала с термопар калориметра осуществлялась с помощью модуля АЦП NI 9205, установленного в Ethernet адаптере NIDAQ9188. Для удобства работы с калориметром была разработана программная оболочка на основе штатной программы-регистратора «Signal Express» [2]. Внешний вид оболочки представлен на рис. 10.

По алгоритму работы программы входной аналоговый сигнал с термопар с помощью АЦП преобразуется в цифровой, затем по заданному типу термопар через полином (см. табл. 3) сигнал пересчитывается в значения температур. Временные зависимости температур с каждой термопары фильтруются. Затем сигналы 4-х термопар усредняются и определяется максимальное приращение температуры за все время процесса регистрации  $\Delta T_{cp}$ . Далее по полученной калибровке значение температурного приращения пересчитывается в энергию ЛИ, которая выводится на экран. Готовность калориметра к следующим измерениям отображается в окне с лампочкой, и определяется временем остывания калориметра до температуры окружающей среды.

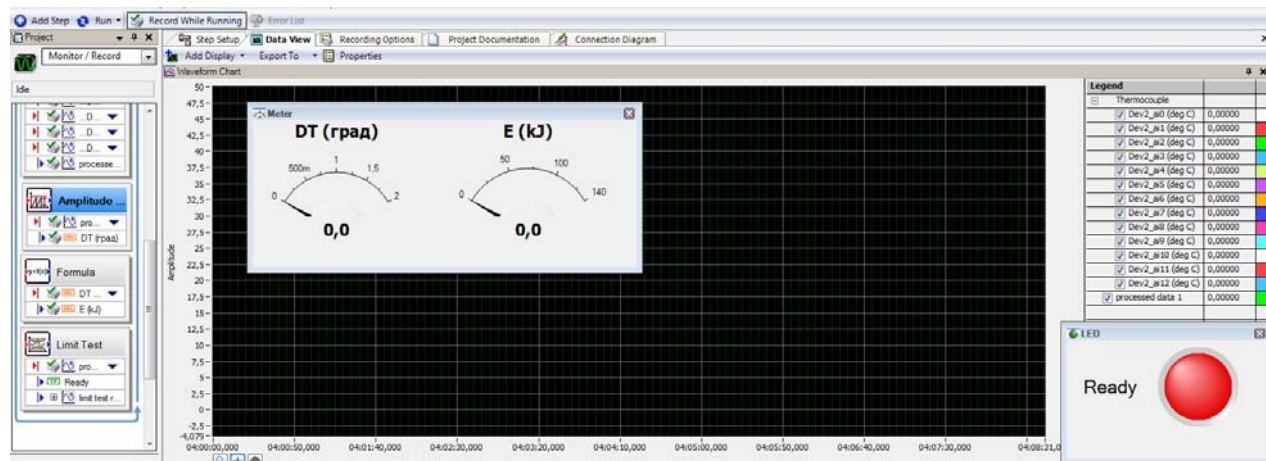


Рис. 10. Внешний вид программной оболочки



## **Заключение**

В результате выполнения работы был создан калориметр, работающий в широком энергетическом диапазоне с максимальной измеряемой энергией ЛИ до 100 кДж.

В процессе отработки конструкции была выбрана оптимальная схема размещения термопар. Эти термопары использовались для определения энергии ЛИ, падающей на калориметр.

Калориметр был откалиброван и получена зависимость падающей на калориметр энергии от его температуры. Тестирование показало, что с помощью полученной калибровочной зависимости и учетом погрешности аппаратной части энергия ЛИ измеряется с суммарной погрешностью до 10 %.

## **Список литературы**

1. Каталог приборов фирмы Ophir, 2012. С. 255.
2. Техническое описание регистратора электрических сигналов фирмы NI. 2008 г, 52 с.
3. ГОСТ Р 8.585-2001 ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. ГОСТ РФ, М., 2001.