

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ  
СГАУ РЕГИСТ. № 23/120-03

*В.В. БИРЮК, А.И. ДОВГЯЛЛО, А.П. ЛОГАШКИН,  
Д.В. САРМИН, Д.А. УГЛАНОВ, Е.С. ЧУРСИН*

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета*

***в качестве методических указаний***

САМАРА  
Издательство СГАУ

2009

УДК 621.37/39 : 536.24

ББК 32.86-5

Г 859

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Е.А. Изжеуров

*В.В. Бирюк*

**Энергетический баланс лазерной установки: методические указания**

/ В.В. Бирюк, А.И. Довгялло, А.П. Логашкин, Д.В. Сармин, Д.А. Угланов,

Е.С. Чурсин – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – с.25: 9 ил.

В методических указаниях представлена информация по исследованию энергетического баланса лазерной установки.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 200202 – «лазерные системы в ракетной технике и космонавтике» по дисциплине «Теория и проектирование проточных газовых лазеров», для студентов, обучающихся по специальности 160301 «Авиационные двигатели и энергетические установки», для специализации «Энергосберегающие технологии» по дисциплинам «Системы охлаждения энергетических установок», «Возобновляемые источники энергии».

УДК 621.37/39 : 536.24

ББК 32.86-5

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2009

## Лабораторная работа №1

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

**Цель работы:** изучение методики и приобретение навыков энергетического обследования лазерной установки; обработка и обобщение результатов обследования; получение энергетического баланса.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Термин лазер является аббревиатурой английского выражения light amplification by stimulated emission of radiation, что означает усиление света с помощью эффекта вынужденного (стимулированного, индуцированного) испускания излучения. Таким образом, лазер является генератором электромагнитного излучения оптического диапазона, основанного на использовании вынужденного излучения. Лазер является уникальным источником когерентного света и обладает свойствами, которые существенно отличают его от обычных источников. Энергия лазерного излучения сосредоточена в узком спектральном интервале, который достигает в предельном случае  $10^{-8}$  мкм (в газовых лазерах). Расходимость лазерного излучения характеризуется плоским или телесным углом, внутри которого распространяется поток энергии излучения. Для лазеров некоторых типов расходимость не превышает десятки угловых секунд. К тому же следует отметить, что некоторые лазеры способны излучать большую энергию за чрезвычайно короткое время вплоть до фемтосекунды.

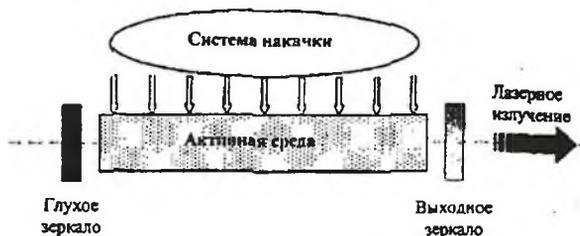


Рисунок 1. Схема устройства лазера

Лазер состоит из трех основных частей (рисунок 1): активной среды, системы накачки и резонатора. Активная среда-это среда, в которой может быть получено состояние инверсии населенности, т. е. населенность верхнего лазерного уровня больше населенности нижнего лазерного уровня. Переход квантовой системы в инверсное состояние осуществляется подведением энергии, которую принято называть энергией накачки. Активная среда, в которой существует инверсия населенности, может служить усилителем излучения, но для этого необходимо начальное инициирующее воздействие. Инициатором процесса вынужденного излучения может быть внешний сигнал или один из квантов спонтанного излучения в самой среде. Значительное усиление излучения может быть достигнуто, если поместить активную среду в системе из двух зеркал - оптический резонатор, как показано на рисунке 1. Одно из зеркал резонатора частично прозрачное (выходное зеркало), что необходимо для вывода излучения. В резонаторе излучение распространяется почти строго в направлении его оси, многократно отражается от зеркал и проходит активную среду, что вызывает усиление излучения. Таким образом, лазерный резонатор предназначен для усиления и формирования направленного излучения.

Наиболее распространенные в настоящее время лазеры можно разделить на группы по различным признакам. По виду лазерного вещества лазеры делят на твердотельные (ТТЛ), газовые (ГЛ), полупроводниковые (ППЛ) и жидкостные (ЖЛ). Лазеры классифицируются также и по виду накачки, которая может осуществляться оптическим излучением, электрическим током, электронным пучком, за счет химических реакций и другими способами. По характеристике режима работы различают лазеры, работающие в непрерывном (CW) и импульсном (P) режиме [1].

Для эффективной работы лазеров требуется обеспечение стабильного температурного режима при их эксплуатации. Одной из систем, входящих в состав лазера, является система охлаждения. КПД современных лазеров, используемых в различных области жизнедеятельности человека, составляет величину не более 5%, что означает необходимость отвода от лазера тепловой

энергии, составляющей величину около 95% от мощности, вкладываемой в него. В зависимости от типа лазера, количества тепла сбрасываемого в систему охлаждения лазера и температурного уровня его работы, который необходимо обеспечить, используются различные виды систем охлаждения. Применяются четыре основных способа теплоотвода: а) жидкостное охлаждение; б) газовое охлаждение; в) контактное охлаждение; г) гетерофазное охлаждение (на фазовых переходах). Наибольшее распространение имеют системы с жидкостным теплоотводом, так как они обладают рядом преимуществ, таких как простота организации процесса отвода тепла и высокие коэффициенты теплоотдачи жидкостных хладагентов, применяемых в них.

На рисунке 2 представлено распределение энергетических потоков от подводимой энергии до выходного излучения. Здесь видно, что очень много энергии рассеивается на балластных резисторах, стабилизирующих разряд постоянного тока в сложном технологическом быстропрокачном лазере на  $\text{CO}_2$ , много энергии переходит в тепло в процессе генерации излучения за счёт самого физического принципа генерации излучения в четырёхуровневой квантовой системе. Видно также, что свою немалую лепту вносят механические устройства — вентилятор, потери напора в теплообменнике и т.д.

В соответствии с этой схемой полный КПД лазера можно представить в виде:

$$\eta = \frac{W}{W_{\Sigma}} = \frac{W_H}{W_{\Sigma}} \frac{W_{\text{ЭЛ}}}{W_H} \frac{W_0}{W_{\text{ЭЛ}}} \frac{W_K}{W_0} \frac{W_P}{W_K} \frac{W_{\Pi}}{W_P} \frac{W}{W_{\Pi}} = \eta_V \eta_H \eta_{\text{ЭЛ}} \eta_K \eta_{\text{КВ}} \eta_P \eta_{\text{ОБ}} =$$

$$= \eta_V \eta_H \eta_{\text{ЭЛ}} \eta_{\text{ЭО}} \quad (1.1),$$

где  $W$  — мощность излучения лазера;  $W_{\Sigma}$  — полная электрическая мощность, подведенная к лазеру;  $W_H$  — мощность, расходуемая на питание системы накачки;  $W_{\text{ЭЛ}}$  — мощность, подведенная к электродам ГРК;  $W_0$  — мощность, вкладываемая в рабочую смесь;  $W_K$  — мощность, запасенная в нижних колебательных степенях свободы молекул  $\text{N}_2$  и уровня  $001\text{CO}_2$ ;  $W_P$  — мощность, которая может быть получена в виде излучения при 100%-ной эффективности

резонатора, полностью охватывающего весь объем газоразрядной камеры (ГРК);  $W_{\Sigma}$  — мощность излучения реального резонатора при полном заполнении излучением объема ГРК;  $\eta_B = W_H/W_{\Sigma} = 1 - P_B/W_{\Sigma}$  КПД, учитывающий потери мощности во вспомогательных системах лазера ( $P_B$ );  $\eta_H = W_{Эл}/W_H = 1 - (P_{инп} + P_B)/W_{\Sigma}$  — КПД, учитывающий потери мощности в источнике питания ( $P_{инп}$ ) и балластной нагрузке ( $P_B$ );  $\eta_{Эл} = W_0/W_{Эл} = 1 - P_{Эл}/W_{Эл}$  — КПД, учитывающий потери мощности в приэлектродных слоях разряда ( $P_{Эл}$ );  $\eta_K = W_K/W_0 = 1 - P_{пн}/W_0$  — колебательный КПД, учитывающий потери мощности, вложенной в рабочую смесь, на прямой нагрев, химические преобразования и т. д. ( $P_{пн}$ );  $\eta_{КВ} = W_P/W_K = 1 - P_{рел}/W_K$  — квантовый КПД, который учитывает релаксационные потери ( $P_{рел}$ );  $\eta_P = W_{\Pi}/W_P = 1 - P_P/W_P$  — КПД резонатора ( $W_P$  — потери мощности в резонаторе);  $\eta_{Об} = P_{\Pi}/W_{\Pi} = 1 - P_{Об}/W_{\Pi}$  — объемный КПД ( $P_{Об}$  — потери мощности вследствие неполного заполнения излучением объем ГРК);  $\eta_{ЭО} = \eta_K \eta_{КВ} \eta_P \eta_{Об} = W/W_0$  — электрооптический КПД.

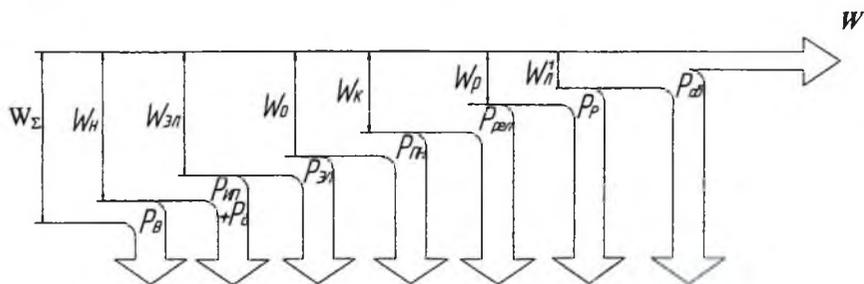


Рисунок 2. Схема основных каналов потери энергии технологического лазера.

В данной работе исследуется энергетический баланс технологического  $\text{CO}_2$ -лазера ЛГН-703, схема которого приведена на рисунке 3.

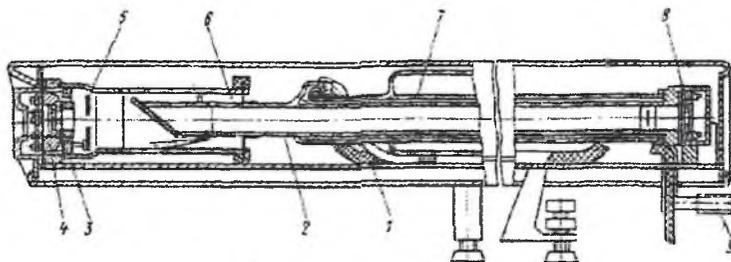


Рисунок 3. Конструктивная схема излучателя лазера ЛГН-703 ( $\text{CO}_2$ -лазер):  
1 — основание; 2 — активный элемент; 3 — выходное зеркало резонатора; 4 — узел юстировки резонатора; 5 — диафрагма; 6 — резервный баллон; 7 — рубашка охлаждения; 8 — глухое зеркало резонатора; 9 — штуцер.

### ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На рисунке 4 представлена схема лабораторной установки, которая содержит следующие основные элементы:

- испытуемый лазерный излучатель ЛГН-703;
- насос прокачки хладагента с регулятором расхода;
- блок питания лазера;
- системы замера, контроля и регистрации параметров;
- теплообменник охлаждения жидкостного теплоносителя;
- вспомогательные системы.

$\text{CO}_2$ -лазер ЛГН-703 [52] имеет следующие основные технические характеристики:

- длина волны лазерного излучения  $\lambda=10,6\text{мкм}$ ;
- мощность лазерного излучения  $W=20..45\text{Вт}$ ;
- рабочая смесь:  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} - 1:1:5$ ;
- общее давление  $\approx 20 \pm 2$  мм.рт.ст.;
- диаметр пучка лазерного излучения  $d=5\text{мм}$ .

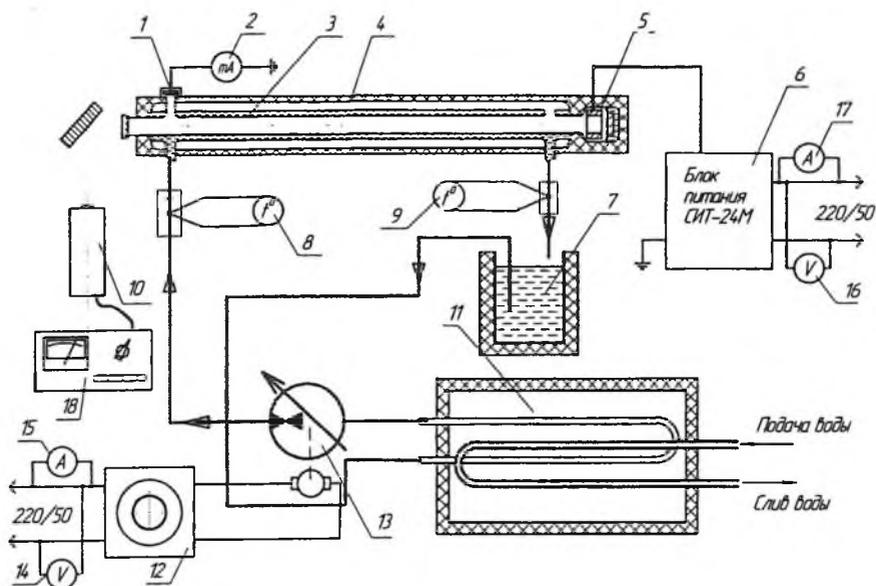


Рисунок 4. Схема лабораторной установки.

1 - катод, 2 - миллиамперметр, 3 - разрядная трубка, 4 - корпус лазера, 5 - анод, 6 - блок питания, 7 - бак, 8, 9 - измерители температуры, 10 - калориметр, 11 - теплообменник, 12 - привод насоса, 13 - насос, 14 - вольтметр насоса и блока питания, 15 - амперметр насоса, 16 - вольтметр блока питания, 17 - амперметр блока питания, 18 - Измеритель температуры.

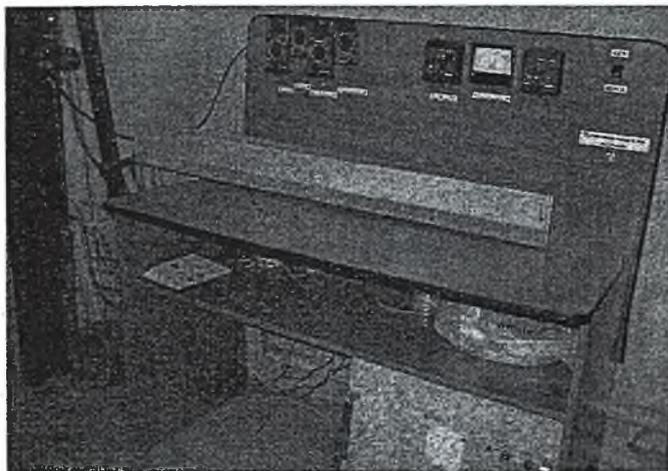


Рисунок 5. Внешний вид лабораторной установки.

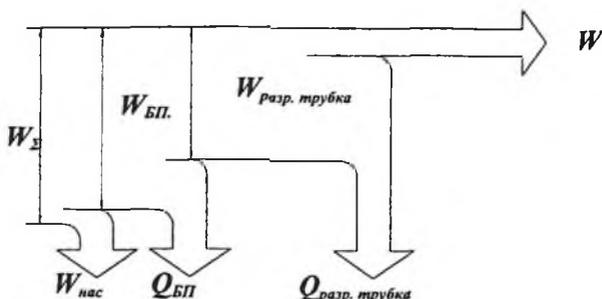


Рисунок 6. Энергетический баланс лазера ЛН-703 .

Экспериментальная установка дает возможность: генерировать мощность излучения; изменять расход хладагента от 1 до 2 л/мин; регистрировать температуру в различных точках системы охлаждения лазера (3 термодпары хромель-копелевых); измерять значения мощности излучения лазерной установки и ее основных систем;

На рисунке представлена схема энергетического баланса лазерной установки, из которой следует, что преобразование электрической энергии, поступающей от сети ( $W_{\Gamma}$  – полная мощность установки), в когерентное электромагнитное излучение происходит с потерями в ее основных устройствах. Часть энергии потребляемой лазерной установкой используется для работы насоса первого контура системы охлаждения ( $W_{нас}$  – мощность насоса). Значительная часть энергии теряется в блоке питания ( $W_{БП}$  – потребляемая мощность блока питания,  $Q_{БП}$  – потери энергии в блоке питания), уходящая в виде тепла в окружающую среду. Также в разрядной трубке возникают потери энергии ( $W_{разр. трубка}$  – мощность энергии, вкладываемой в активную среду в разрядной трубке лазера,  $Q_{разр. трубка}$  – потери энергии в блоке питания), которые отводятся системой охлаждения.

Для измерения мощности, потребляемой лазерной установкой и каждой ее отдельной системой используются вольтметры и амперметры (рисунок 5, 6, 9).

В первом контуре (закрытом) системы охлаждения циркулирует дистиллированная вода, которая осуществляет теплосъем диссипативного тепла, образующегося при работе лазера. В этом контуре температура контролируется в следующих точках: на входе в лазер (1), на выходе из него (2), на входе(5) и выходе из насоса(6) . Во втором открытом контуре происходит подача в теплообменник воды из сети.

В качестве средства измерений средней мощности лазерного излучения использовалась система регистрации, состоящая из калориметра и датчиков температуры, представляющего собой 2 термопары ХК ГОСТ 3044-77, 0,5мм с регистрирующим прибором в виде измерителя-регулятора ТРМ12А.

Калориметр (рисунок 7) представляет собой «ловушку» для излучения 1, выполненную из меди, с запаянными в ней двумя термопарами 2, которые присоединены к измерителю-регулятору ТРМ12А 3. Принцип действия основан на определении количества энергии, поглощенной массой калориметра. В данном случае уравнение энергетического баланса будет выглядеть следующим образом:

$$W \cdot \tau = \Delta I_{\text{л}} + \Delta Q_{\text{окр. ср.}} \quad (1),$$

где  $W$  – мощность излучения лазера,  $\tau$  – время нагрева калориметра лазерным излучением,  $\Delta I_{\text{л}}$  - изменение энтальпии калориметра за время нагрева  $\tau$ ,  $\Delta Q_{\text{окр. ср.}}$ - суммарное тепло, отдаваемое калориметром в окружающую среду за счет естественной конвекции, лучистого теплообмена, а также отражения части излучения лазера, выходящего из отверстия 4.

В свою очередь изменение энтальпии калориметра за время нагрева  $\tau$  определяется по формуле:

$$\Delta I_{\text{л}} = c_p \cdot m \cdot (T_{\text{л}} - T_{\text{ло}}) \quad (2),$$

где  $c_p$  – теплоемкость меди, из которой изготовлен калориметр ( $c_p=388 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ ),  $m$  – масса калориметра,  $T_L$  – температура нагрева калориметра через контрольный промежуток время измерения,  $T_{Л0}$  – начальная температура калориметр

Таким образом, первое слагаемое в формуле 1  $\Delta I_L$  может быть определено по формуле 2. Второе слагаемое  $\Delta Q_{окр.ср}$  в формуле 1, как уже было выше сказано представляет собой суммарное тепло, отдаваемое калориметром в окружающую среду за счет естественной конвекции, лучистого теплообмена, а также отражения части излучения лазера, выходящего из отверстия 4 (рис.4). Эта балансовая составляющая определялась по следующей формуле:

$$\Delta Q_{окр.ср.} = \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (T_L - T_{окр.ср.}) \cdot dt \quad (3),$$

где  $\alpha_{\Sigma}$  – общий коэффициент теплоотдачи,  $F$  – площадь поверхности калориметра,  $T_L$  – температура калориметра,  $T_{окр.ср.}$  – температура окружающей среды,  $dt$  – элементарный промежуток времени нагрева калориметра лазерным излучением. Общий коэффициент теплоотдачи определяется экспериментально с применением метода регулярного режима при выключении лазера и охлаждения калориметра естественным образом. Сам эксперимент проводится сразу же после нагрева калориметра лазерным излучением.

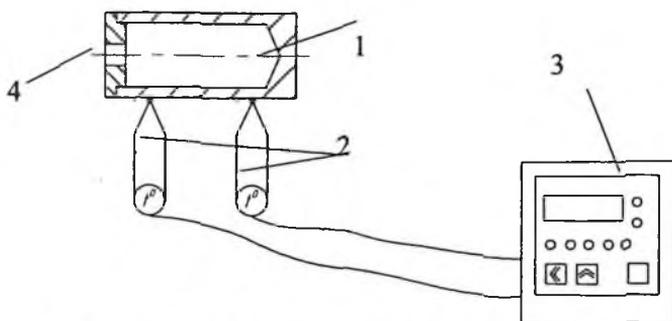


Рис. 7. Специальный калориметр для измерения мощности излучения.

К телу, остывающему в изобарных условиях, применимо аналитическое выражение первого начала термодинамики, в форме, которая устанавливает связь между теплотой и энтальпией:

$$dQ = -m \cdot di \quad (4),$$

Выражение 4 справедливо для равновесных и неравновесных процессов. Как уже было сказано выше для калориметра  $dQ$  в левой части выражается суммой:

$$dQ = dQ_{ест. конв.} + dQ_{отп.} + dQ_{изл.} \quad (5),$$

где  $dQ_{ест. конв.}$  - тепло, отдаваемое за счет естественной конвекции,  $dQ_{изл.}$  - тепло, отдаваемое за счет лучистого теплообмена,  $dQ_{отп.}$  - тепло, отдаваемое за счет отражения части излучения лазера, выходящего из отверстия 4 (рис.7). Для определения энтальпии  $di$  используем следующую формулу:

$$di = c_p \cdot dT \quad (6).$$

Подставляя формулы 4, 6 в формулу 3 получается:

$$-m \cdot c_p \cdot dT = \alpha_\Sigma \cdot F \cdot (T_{л.} - T_{окр. ср.}) \cdot \tau \quad (7).$$

Принимая  $T_{л.} - T_{окр. ср.} = v$  и из условия  $T_{окр. ср.} = const$  следует, что  $dv = dT$ .

С учетом дополнительных обозначений получаем форму дифференциального уравнения нестационарного теплообмена:

$$\frac{dv}{v} = -\frac{F\alpha_\Sigma}{m \cdot c_p} \cdot d\tau \quad (8).$$

Введя обозначение:

$$M = \frac{F\alpha_\Sigma}{m \cdot c_p} \quad (9),$$

и интегрируя уравнение 9 получаем:

$$\ln v = -M\tau + const \quad (10).$$

Из уравнения 9 следует, что логарифм натуральный избыточной температуры  $v$  является линейной функции времени  $\tau$ . При выводе уравнения 9 сделаны следующие допущения:

- температурное поле по всему объему калориметра равномерно

- $\alpha_{\Sigma} = const$ , величина радиационного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_R$ , входящая в состав  $\alpha_{\Sigma}$  зависит как от  $\nu$ , так и от абсолютных значений температур  $T_L$  и  $T_{окр.ср.}$ . Поскольку  $\alpha_R$  входит слагаемым в состав  $\alpha_{\Sigma}$  и составляет от  $\alpha_{\Sigma}$  величину порядка 5%, то полное изменение  $\alpha_{\Sigma}$  за время измерения мощности излучения не превышает 0,5%.

В теории регулярного режима величина  $M$  именуется «темпом охлаждения» [3]. Любые исследования, связанные с применением регулярного режима, всегда сводится к определению  $M$ . В данном случае по значению величины  $M$  из соотношения 9 определяется  $\alpha_{\Sigma}$ .

Эксперимент начинается сразу же после того, как специальный калориметр нагрелся лазерным излучением и отключен лазер. Запускается секундомер и происходит замер температуры калориметра при его остывании. Измерения производятся через одну минуту в течение 5-10 мин. Находится значения избыточной температуры,  $T_L - T_{окр.ср.} = \nu$ , затем строится график  $ln \nu = f(\tau)$ . Через точки графика проводится осредняющая прямая. По ее наклону определяется темп охлаждения:

$$M = \frac{\ln \nu_1 - \ln \nu_2}{\tau_2 - \tau_1} \quad (11).$$

Индексы 1 и 2 относятся к любым двум точкам, находящимся на осредняющей прямой (рис. 8). Суммарный коэффициент теплоотдачи определяется из уравнения 9:

$$\alpha_{\Sigma} = M \frac{m \cdot c_p}{F} \quad (12).$$

Приведенный на рис.8. в качестве примера один из графиков серии экспериментов свидетельствует о линейности функции  $ln \nu = f(\tau)$ , что подтверждает наличие регулярного режима и, следовательно, правильность применения метода.

В данном случае  $m = 0.155 \text{ кг}$ ,  $c_p = 385 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ ,  $M \approx 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $F = 51 \text{ см}^2$  и при различных температурах  $T_L$  и  $T_{окр.ср.}$  расчет дает значение суммарного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\Sigma} = 10.12 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ .

Таким образом, зная  $\alpha_{\Sigma}$  и все остальные параметры и характеристики, а также произведя замеры температуры калориметра  $T_{\text{Л}}$  в течение времени его нагрева лазерным излучением через определенные интервалы времени  $\Delta t$  из формулы 1, преобразовав ее в соответствии с формулами 2 и 3 получаем следующее выражения для мощности излучения:

$$W = \frac{c_p \cdot m \cdot (T_{\text{Л}2} - T_{\text{Л}1}) + \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (T_{\text{Л}2} - T_{\text{окр.ср}}) \cdot \tau}{\tau} \quad (13)$$

На рисунке 8 приведен вид графика охлаждения калориметра регулярным режимом.

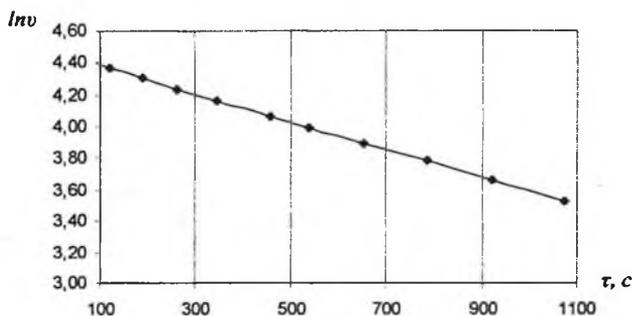
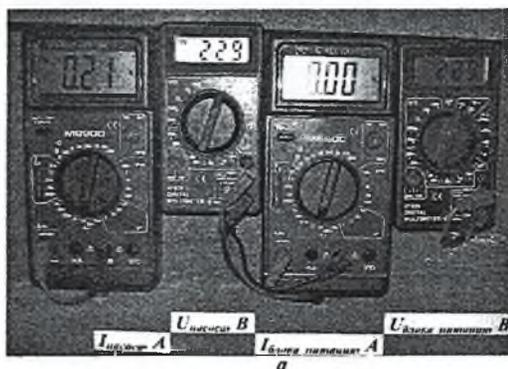


Рисунок 8. График охлаждения калориметра при постоянном значении осредненного коэффициента теплоотдачи на поверхности.

## ПОРЯДОК ВЫПОНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Температура окружающей среды  $T_{\text{окр}}$  определяется комнатным термометром.
2. Включить насос системы охлаждения лазера и выбрать требуемый уровень расхода хладагента.
3. Включить блок питания лазерной установки (нажатием красной кнопки).
4. Включить измерители силы тока (рисунок 9) нажатием кнопки 1 «AUTO POWER INFO» и перевести его переключатель 2 в следующее положение: *A~20*.
5. Включить измеритель напряжения с помощью поворота его переключателя 1 в следующее положение: *V~750* (рисунок).

6. В течение 1-2 мин дать установке выйти на рабочий режим.
7. Записать показания приборов в протокол №1, измеряющих следующие величины:  $I_n, U_n, I_{БП}, U_{БП}, I_{р.тр.}, T_{ex}, T_{вых}$ .
8. Записать начальную температуру калориметра  $T_{n1}$ , и его конечную температуру  $T_{n2}$  через промежуток времени 30 – 60с.
9. Выключается питание лазера и фиксируется значение температуры калориметра. Дальнейшие измерения этого параметра производятся через одну минуту в течение 5 - 10 мин.
10. Все измеренные данные заносятся в протокол №1.
11. Выключаются насос и все измерительные приборы.



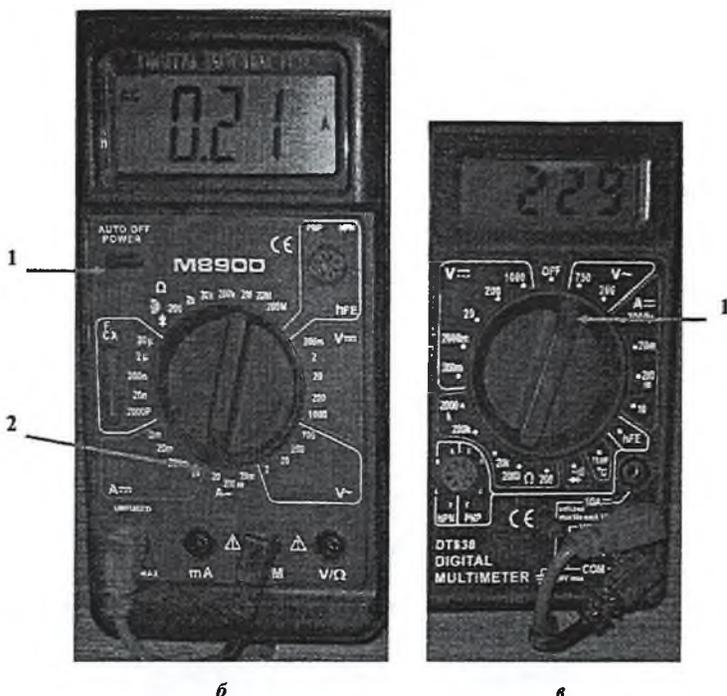


Рисунок 9. Измерители силы тока и напряжения.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Рассчитывается избыточная температура калориметра  $\nu = T_{л} - T_{окр.ср.}$ , определяются значения  $ln\nu$  с точностью до третьего знака после запятой. На миллиметровой бумаге строится график  $ln\nu = f(\tau)$  в следующем масштабе: одна логарифмическая единица равна 500 мм., одна минута - 10...15 мм.
2. Определяется коэффициент теплоотдачи тепла  $\alpha_{\Sigma}$  от калориметра окружающей среде по формуле 12.

3. Определить мощность энергии, подводимой к блоку питания лазера  $P_{БП}$ :

$$P_{БП} = I_{БП} U_{БП}. \quad (14)$$

4. Определить мощность энергии, подводимую к насосу  $P_{н}$ :

$$P_{н} = I_{н} U_{н}. \quad (15)$$

5. Определить мощность лазера  $W$  по формуле 13.  
 6. Определить тепловую энергию, отводимую от лазера в единицу времени

$Q_{p,mp}$ :

$$Q_{p,mp} = c G_v \rho (T_{вых} - T_{вх}). \quad (16)$$

где  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  - плотность воды;  $c = 4190 \text{ Дж/(кг K)}$  - теплоемкость воды.

7. Определить мощность энергии, подводимой к разрядной трубке лазера  $P_{p,mp}$  и напряжение на электродах разрядной трубки  $U_{p,mp}$ :

$$P_{p,mp} = Q_{p,mp} + W, \quad (17)$$

$$U_{p,mp} = P_{p,mp} / I_{p,mp}. \quad (18)$$

8. Определить мощность энергии, теряемой в блоке питания лазера  $Q_{БП}$ :

$$Q_{БП} = P_{БП} - P_{p,mp}. \quad (19)$$

9. Определить мощность энергии, подводимой к лазерной установке  $P_{\Sigma}$ :

$$P_{\Sigma} = P_{БП} + P_n. \quad (20)$$

10. Определить КПД преобразования энергии в блоке питания  $\eta_{БП}$  и разрядной трубке  $\eta_{p,mp}$ :

$$\eta_{БП} = P_{p,mp} / P_{БП}. \quad (21)$$

$$\eta_{p,mp} = W / P_{p,mp}. \quad (22)$$

11. Определить процентный показатель отношений потерь энергии в блоке питания  $\zeta_{БП}$  и разрядной трубке  $\zeta_{p,mp}$ , а также отношение мощности насоса к полной мощности лазерной установки  $\zeta_n$ .

$$\zeta_{БП} = Q_{БП} / P_{\Sigma}, \quad (23)$$

$$\zeta_{p,mp} = Q_{p,mp} / P_{\Sigma}, \quad (24)$$

$$\zeta_n = P_n / P_{\Sigma}. \quad (25)$$

12. Определить КПД лазера  $\eta$ :

$$\eta = W / P_{\Sigma}. \quad (26)$$

13. Построить энергетический баланс лазерной установки, аналогично рисунку 6.

Протокол №1. Значения измеренных величин

№	$G_v,$ л/мин	$I_n,$ А	$U_n,$ В	$I_{БП},$ А	$U_{БП},$ В	$I_{р.тр.},$ А	$T_{вх},$ °С	$T_{вых},$ °С	$T_{л1},$ °С	$T_{л2},$ °С	$\tau_{л},$ с	$\tau,$ мин	$T_{л},$ °С	$v,$ °С	$l_{gv}$	$M,$ мин <sup>-1</sup>

Протокол №2. Значения подсчитанных величин

$\alpha_{\Sigma},$ Вт	$P_n,$ Вт	$P_{БП},$ Вт	$Q_{БП},$ Вт	$P_{р.тр.},$ Вт	$Q_{р.тр.},$ Вт	$U_{р.тр.},$ В	$W,$ Вт	$P_{\Sigma},$ Вт	$\eta$

Лабораторная работа №2

### ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: оценить погрешность измерения мощности лазера, полученной в первой работе.

Конечный параметр, определяемый в ходе экспериментальных работ, получают или с помощью прямых измерений (измерение массы тела с помощью весов), или с помощью косвенных измерений (например, измерение мощности электрического прибора с помощью вольтметра и амперметра). Для каждого из этих методов существует собственная методика обработки, полученных данных.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Имея результаты  $N$  измерений величины  $X$ :

1. Находят среднеарифметическое измерений

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i. \quad (27)$$

2. Находят абсолютные погрешности измерений  $\Delta_i = X_i - \bar{X}$  и возводят их в квадрат. Иногда проверяют, выполняется ли закон нормального распределения (упрощенная проверка:  $\sum_{i=1}^N \Delta_i$  должна быть примерно равна нулю, подробнее см. в [4]).

3. Определяют среднее квадратичное отклонение отдельного измерения

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta_i^2}{N-1}}. \quad (28)$$

4. Проверяют с помощью специальных критериев наличие промахов. Если промахи имели место, то они исключаются, а вычисления по пп. 1-3 повторяются.

5. В соответствии с заданной предварительно надежностью по квантилю нормального распределения ( $N > 20$ ) или квантилю Стьюдента ( $N < 20$ ), приведенным в соответствующих таблицах, находится доверительный интервал. В последнем случае

$$\Delta x = t(P, N) \frac{S}{\sqrt{N}}, \quad (29)$$

для нормального распределения  $\Delta x = U_p S$ .

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пусть косвенное измерение  $y$  связано с  $m$  прямыми измерениями известной зависимостью

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (30)$$

причем каждое из них проведено  $n$  раз.

Очевидно,  $m$  погрешностей, например, первого измерения  $\Delta x_{11}, \Delta x_{21} \dots \Delta x_{m1}$  вызовут определенную погрешность косвенного измерения  $\Delta y_1$ . Обычно величины  $\Delta x_y$  весьма малы, а прямые измерения  $x$  можно считать независимыми. Тогда связь прямых и косвенных погрешностей в первом измерении определяется известным выражением полного дифференциала функции нескольких переменных:

$$dy_1 = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_{11} + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_{21} + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_m} dx_{m1}.$$

Аналогичные выражения можно записать и для остальных  $n$  измерений:

$$dy_2 = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_{12} + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_{22} + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_m} dx_{m2};$$

.....

$$dy_n = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_{1n} + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_{2n} + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_m} dx_{mn}.$$

Возведем эти выражения в квадрат, пренебрегая смешанными членами типа  $dx_y dx_u$ , и разделим на  $(n-1)$ . Тогда в левой части получим квадрат среднего квадратичного отклонения косвенного измерения, в правой части, после простых преобразований, - соответствующие параметры прямых измерений:

$$S_y^2 = \left( \frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 S_{x_1}^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 S_{x_2}^2 + \dots + \left( \frac{\partial y}{\partial x_m} \right)^2 S_{x_m}^2. \quad (31)$$

Аналогичную связь можно получить и между другими параметрами точности прямых и косвенных измерений.

Найдем, например, погрешность среднеарифметического значения, рассматривая его как косвенное, а  $X_1, X_2, \dots, X_n$  как прямые с одинаковым средним квадратичным отклонением  $S$ . Их связь определяется выражением:

$$\bar{X} = \frac{X_1}{N} + \frac{X_2}{N} + \dots + \frac{X_N}{N}.$$

Но  $\frac{\partial \bar{X}}{\partial X_1} = \frac{\partial \bar{X}}{\partial X_2} = \dots = \frac{\partial \bar{X}}{\partial X_N} = \frac{1}{N}$  - и в соответствии с (31) получаем:

$$S_{\bar{x}} = S/\sqrt{N}. \quad (32)$$

Часто встречается случай, когда косвенное измерение представляет произведение или частное прямых измерений. Например, при определении плотности вещества цилиндра

$$\rho = 4m/\pi d^2 h. \quad (33)$$

Найдем соответствующие производные

$$\frac{\partial \rho}{\partial m} = \frac{4}{\pi d^2 h}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial d} = -\frac{8}{\pi d^3 h}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial h} = -\frac{4m}{\pi d^2 h^2},$$

подставим их в (31) и разделим на (33):

$$\delta^2 \rho = \left( \frac{S_{\rho}}{\rho} \right)^2 = \delta^2 m + (2\delta d)^2 + \delta^2 h, \quad (34)$$

где  $\delta m, \delta d, \delta h$  - относительные погрешности прямого измерения массы, диаметра и высоты цилиндра.

Таким образом, если косвенное измерение представляет собой частное и произведение прямых, то следует складывать квадраты не средних квадратичных отклонений  $S^2$ , а относительных погрешностей  $\delta^2$ , причем коэффициент перед относительной погрешностью равен показателю степени соответствующего прямого измерения (см. формулы (33), (34)).

Мощность излучения лазера определяется с помощью ряда косвенных измерений. Основным измеряемым параметром для оценки мощности излучения в экспериментах является температура нагрева калориметра в результате воздействия на него лазерного излучения. Анализ формулы 13 говорит, о том, что на точность определения мощности генерации лазера при использовании специального калориметра воздействуют следующие измеряемые и определяемые параметры:

$c_p$  – теплоемкость калориметра;

$T_{\text{л}} - T_{\text{окр. ср}} = \nu$  - избыточная температура нагрева калориметра;

$F$  - площадь поверхности калориметра;

$\alpha_{\Sigma}$  - коэффициент теплоотдачи, получаемый экспериментально;

$\tau$  - время нагрева калориметра;

$m$  – масса калориметра;

Относительная погрешность определения мощности излучения определяется в соответствии с [4] следующим выражением:

$$\delta_W = \frac{\sigma_W}{W}, \quad (35)$$

где  $\sigma_W$  - среднее квадратичное отклонение (СКО) косвенных измерений мощности излучения.

Предварительные исследования показали [2], что СКО измерения теплоемкости материала калориметра составляет величину  $\sigma_{cp} = 3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ , относительная погрешность измерения массы калориметра составила  $\delta_m = 0,005 \text{ кг}$ .

Погрешность измерителя-регулятора ТРМ12 («Овен»), используемого для определения избыточной температуры калориметра, нормирована по паспорту и составляет величину  $\delta_v = 3 \text{ К}$ .

Значение относительная погрешность измерения, возникающее при определении суммарного коэффициента теплоотдачи связана с измерением и определением следующих параметров, входящих в состав формулы 9.

$F$  – площадь поверхности калориметра;

$m$  – масса калориметра;

$c_p$  – теплоемкость калориметра;

$M$  – «температура охлаждения».

Величина СКО суммарного коэффициента теплоотдачи принимает значение  $\sigma_{\alpha} = 0,95 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

Значения относительных погрешностей определения площади поверхности калориметра и измерения времени с помощью механического секундомера составили соответственно величины  $\delta_F = 0.0001 \text{ м}^2$  и  $\delta_{св} = 0.5 \text{ с}$ .

В соответствие с (31) относительной погрешности определения мощности излучения определяется выражением:

$$\delta^2_W = \left( \frac{\partial W}{\partial c_p} \right)^2 (\sigma_{c_p})^2 + \left( \frac{\partial W}{\partial m} \right)^2 (\delta_m)^2 + \left( \frac{\partial W}{\partial v} \right)^2 (\delta_v)^2 + \left( \frac{\partial W}{\partial \alpha} \right)^2 (\sigma_\alpha)^2 + \left( \frac{\partial W}{\partial F} \right)^2 (\delta_F)^2 + \left( \frac{\partial W}{\partial \tau} \right)^2 (\delta_\tau)^2 \quad (36).$$

### ПОРЯДОК ВЫПОНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Температура окружающей среды  $T_{окр}$  определяется комнатным термометром.
2. Включить насос системы охлаждения лазера и выбрать требуемый уровень расхода хладагента.
3. Включить блок питания лазерной установки (нажатием красной кнопки).
4. В течение 1-2 мин дать установке выйти на рабочий режим.
5. Записать начальную температуру калориметра  $T_{л1}$ , и его конечную температуру  $T_{л2}$  через промежуток времени 30 – 60с.
6. Выключается питание лазера и фиксируется значение температуры калориметра. Дальнейшие измерения этого параметра производятся через одну минуту в течение 5 - 10 мин.
7. Все измеренные данные заносятся в протокол №3.
8. Выключаются насос и все измерительные приборы.

Протокол №3. Значения измеренных величин

№	$T_{л1},$ °C	$T_{л2},$ °C	$\tau_{л},$ с	$\tau,$ мин	$T_{л},$ °C	$v,$ °C	lgv	$M,$ мин <sup>-1</sup>


Протокол №4. Значения подсчитанных величин

$W,$ Вт	$\frac{\partial W}{\partial c_p}$	$\frac{\partial W}{\partial m}$	$\frac{\partial W}{\partial v}$	$\frac{\partial W}{\partial \alpha}$	$\frac{\partial W}{\partial F}$	$\frac{\partial W}{\partial \tau}$	$\delta_W$

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

1. Рассчитывается избыточная температура калориметра  $v = T_L - T_{\text{окр. ср.}}$ , определяются значения  $\ln v$  с точностью до третьего знака после запятой. На миллиметровой бумаге строится график  $\ln v = f(\tau)$  в следующем масштабе: одна логарифмическая единица равна 500 мм., одна минута - 10...15 мм.
2. Определяется коэффициент теплоотдачи тепла  $\alpha_L$  от калориметра окружающей среде по формуле 12.
3. Определить мощность лазера  $W$  по формуле 14.
4. Найти частные производные каждого слагаемого формулы 36 и получить их численные значения. Результаты расчета заносятся в протокол №4.
5. Рассчитать по формуле 36 погрешность измерения мощности излучения лазера, значение которой получено с помощью ряда косвенных измерений. Результат расчета занести в протокол №4.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите способы охлаждения лазеров?
2. Что такое активная среда лазера?
3. Какие вещества могут использоваться в активной среде лазера?
4. Какие виды основных потерь энергии в лазерной установке ЛГН-703 имеют место?
5. Каков физический смысл коэффициента теплоотдачи?
6. Каков физический смысл темпа охлаждения?
7. Что такое тепловой регулярный режим?
8. Какова разница между прямыми и косвенными измерениями?
9. Какие факторы влияют на точность измерения мощности лазера в данной работе?
10. Что такое средне квадратичное отклонение?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Физические основы технологических лазеров – М.: Высш. шк., 1995 -191с.
2. В. Н. Гришанов, Е. А. Изжеуров, Д. А. Угланов. Системы охлаждения мощных лазеров: учеб. пособие:– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 140 с.
3. В.В. Бирюк, Н.Д. Кольшев, А.П. Меркулов, Н.Н. Огородников. Исследование конвективного теплообмена и теплового излучения: Методические указания к лабораторным работам. – Куйбышев: КуАИ, 1990, 36 с.
4. В.Г. Заботин, А.Н. Первышин. Теплотехнические измерения в двигателях летательных аппаратов: – Куйбышев: КуАИ, 1983, 70 с.

Учебное издание

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ**

Методические указания

Составители:

*Бирюк Владимир Васильевич,  
Довгялло Александр Иванович,  
Логашкин Андрей Павлович,  
Сармин Дмитрий Викторович,  
Угланов Дмитрий Александрович,  
Чурсин Евгений Сергеевич*

Самарский государственный  
аэрокосмический университет  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.