



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЧАСТОТНО-СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ He-Ne ЛАЗЕРОВ

П. Воробьев, А. Кондрахин, Г. Мельничук, А. Улитенко, Е. Чуляева,
ОАО "Плазма", Рязань

Основная цель исследований – снизить время готовности He-Ne лазера с терморегулируемой длиной резонатора. Тепловой режим частотно-стабилизированного по равенству интенсивностей ортогонально поляризованных компонентов лазера определяет стабильность характеристик лазерного излучения. Такие лазеры широко применяются в промышленных лазерных интерферометрах, используемых в геоэкологии и машиностроении. Приведено соответствие теоретических расчетов и экспериментальных результатов.

Тепловые процессы в частотно-стабилизированных по равенству интенсивностей ортогонально поляризованных компонентов лазера играют важнейшую роль. Это объясняется тем, что большинство лазеров такого типа, применяемых в высокоточном измерительном оборудовании, используют метод терморегулирования длины резонатора. Управление длиной резонатора осуществляют терморегуляцией с помощью нагревательного элемента, обмотка которого выполнена из медного провода [1]. Тепловой режим определяет стабильность характеристик лазерного излучения, время готовности лазера к процессу точных измерений и подверженность лазера влиянию внешних воздействий.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТЕПЛОБМЕНЕ В ЧАСТОТНО- СТАБИЛИЗИРОВАННОМ ЛАЗЕРЕ

Рассмотрим основные виды теплообмена и необходимость их учета при расчете теплового режима исследуемых лазеров. Начиная исследование, будем опираться на некоторые постулаты. Во-первых, теплопередача – физический процесс передачи тепловой энергии от более горячего тела к более холодному либо непосредственно

(при контакте), либо через разделяющую (тела или среды) перегородку из какого-либо материала. Во-вторых, если физические тела одной системы находятся при разных температурах, то происходит передача тепловой энергии, или теплопередача, от одного тела к другому до наступления термодинамического равновесия. В-третьих, самопроизвольная передача тепла всегда происходит от более горячего тела к более холодному, что является следствием второго закона термодинамики.

Теплообмен излучением

Расчет теплового излучения основывается на законе Стефана-Больцмана. С учетом закона Кирхгофа расчет принимает вид [2]

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot F \cdot T^4,$$

где $\sigma_0 = 5,669 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; F – площадь поверхности теплообмена; T – абсолютная температура поверхности; ε – коэффициент излучения (степень черноты тела).

Теплоотдача излучением наиболее существенно проявляется при температурах выше 400К, поэтому ее учитывают преимущественно при анализе теплового режима внутренних деталей



электровacuумных и газоразрядных приборов. В автономных системах охлаждения электронных приборов теплоотдающие элементы имеют значительно меньшую температуру. Поэтому теплообмен излучением можно рассматривать лишь в качестве дополнительного к основному способу охлаждения. И в данной работе при расчете теплового режима этот способ отвода тепла мы не учитываем.

Теплообмен конвекцией

Конвективный теплообмен – процесс передачи тепла между твердым телом и омывающим его подвижным теплоносителем. Данный вид теплообмена характеризуется относительно высокой эффективностью теплоотдачи при умеренных температурах и является наиболее распространенным способом рассеяния тепловой энергии, выделяющейся в электронных приборах.

Передача тепла конвекцией описывается с помощью уравнения Ньютона-Рихмана [2]:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta T.$$

где α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности теплообмена; ΔT – перепад температуры между поверхностью тела и теплоносителем.

Коэффициент теплоотдачи α имеет сложную функциональную зависимость от характеристик потока теплоносителя, его теплофизических свойств и геометрических параметров охлаждаемого объекта. Как правило, получить точные аналитические решения уравнений, описывающих условия формирования α , невозможно. Поэтому значения коэффициента теплоотдачи оценивают по эмпирическим уравнениям, полученным по результатам обработки экспериментальных данных методом теории подобия [2].

Теплообмен теплопроводностью

Основное соотношение, устанавливающее взаимосвязь между температурным полем в сплошной среде и интенсивностью распределения в ней теплоты, – закон теплопроводности Фурье [3]:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T,$$

где q – вектор плотности теплового потока; λ – коэффициент теплопроводности среды; $\text{grad}T$ – градиент температуры.

Основным критерием, которым руководствуются специалисты при выборе материала при проектировании теплопередающих и теплорассеивающих элементов индивидуальных систем

охлаждения электронных приборов, является высокий коэффициент теплопроводности. Значения коэффициента теплопроводности веществ определяют экспериментально и оформляют в виде справочного материала. К наиболее эффективным теплопроводящим материалам относятся алюминий ($\lambda=205$ Вт/(м·К)), медь ($\lambda=394$ Вт/(м·К)) и их сплавы. Однако использование даже таких материалов при передаче тепла на значительное расстояние неизбежно связано с увеличением массы и большими перепадами температур по длине теплопередающего тракта. Учитывая зависимости конструктивных особенностей приборов и условий их эксплуатации, считаем, что для решения данной проблемы перспективным направлением является разработка более высокоэффективных теплопередающих элементов [4].

Передача тепла конвекцией

Конвекция (лат. convectio – принесение, доставка) – явление переноса тепла в жидкостях, газах или сыпучих средах потоками самого вещества (неважно, вынужденно или самопроизвольно). Данный вид теплообмена характеризуется относительно высокой эффективностью теплоотдачи при умеренных температурах и является наиболее распространенным способом рассеяния тепловой энергии [5]. В зависимости от причин, вызывающих движение среды, различают естественную и вынужденную конвекцию.

Естественная конвекция возникает в веществе самопроизвольно при его неравномерном нагревании в поле тяготения. При такой конвекции нижние слои вещества нагреваются, становятся легче и всплывают вверх, а верхние слои, наоборот, остывая, становятся тяжелее и погружаются вниз, после чего процесс повторяется снова и снова. При некоторых условиях процесс перемешивания самоорганизуется в структуру отдельных вихрей и получается более или менее правильная решетка из конвекционных ячеек. При вынужденной (принудительной) конвекции перемещение вещества обусловлено действием внешних сил (с помощью насоса, вентилятора). Такой способ применяется, когда естественная конвекция недостаточно эффективна.

Существуют также различные виды сложного переноса тепла, проявляющиеся в сочетании элементарных видов, в которых участвует конвективный теплообмен. Среди них: теплоотдача (конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела); теплопередача (теплообмен от горячей жидкости

к холодной через разделяющую их стенку); конвективно-лучистый перенос тепла (совместный перенос тепла излучением и конвекцией).

Естественная конвекция

Конвективный теплообмен, или теплоотдача, представляет собой процесс передачи тепла между твердой поверхностью и омывающей ее средой. В роли среды могут выступать как жидкости, так и газы. В зависимости от причин, вызывающих движение среды, различают теплоотдачу при естественной и вынужденной конвекции [3]. По природе возникновения, движение при естественной конвекции является свободным движением, т.е. движением, происходящим вследствие разности плотностей нагретых и холодных слоев жидкости (или газа) в гравитационном поле [6].

Тепловые условия процесса, род жидкости (или газа), разности температур, напряженности гравитационного поля и объемы пространства протекающего процесса определяют возникновение и интенсивность этого движения. Для наглядности возьмем пластину с температурой T_1 , обтекаемую воздухом с температурой T_2 . В случае, когда температура поверхности пластины выше температуры окружающей среды $T_1 > T_2$, то слой воздуха вблизи поверхности нагревается за счет поглощения тепловой энергии пластины. Температура слоя возрастает, его плотность уменьшается, и он уходит, заменяясь более холодным. Таким образом, непрерывная циркуляция воздуха обеспечивает отбор и рассеивание тепловой энергии. Если же $T_2 > T_1$ то направление циркуляции меняется на противоположное. Из этого пояснения видно, что естественная конвекция может протекать только в гравитационном поле (рис.1).

Стоит заметить, что независимо от направления циркуляции, теплоотдача при естественной конвекции описывается одними и теми же уравнениями. Всего этих уравнений два: уравнение Ньютона-Рихмана и уравнение Нуссельта [2].

Уравнение, определяющее теплообмен при естественной конвекции, – это уравнение Ньютона-Рихмана [6]:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (T_1 - T_2) \text{ (Вт)},$$

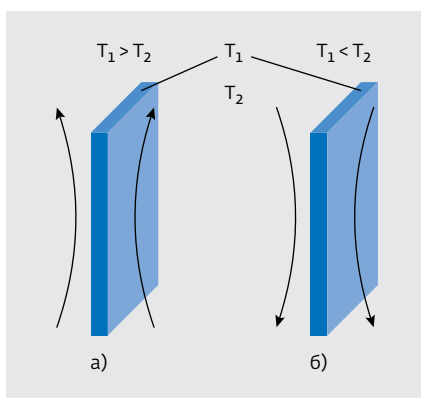


Рис.1. Схема движения воздуха при естественной конвекции: а) – охлаждение; б) – нагрев

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м²·с (α зависит от геометрии системы ее расположения и теплофизических свойств омываемой среды); F – площадь поверхности теплообмена, м²; T_1 – температура поверхности, °С; T_2 – температура окружающей среды, °С.

Вторым уравнением является уравнение Нуссельта, полученное из теории подобия методом анализа размерностей:

$$Nu = C(Re)^m \cdot (Pr)^n \cdot k.$$

Это уравнение для естественной конвекции имеет следующий вид:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \cdot k,$$

где: $Nu = \frac{\alpha \cdot X}{\lambda}$ – критерий Нуссельта;

$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot X^3 \cdot (T_1 - T_2)}{\mu^2}$ – критерий Грасгофа;

$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$ – критерий Прандтля; β – коэффициент

объемного расширения жидкости, g – коэффициент свободного падения, λ , ρ , μ , c_p – параметры омываемой среды при постоянном давлении.

Константы C , n , k определяют геометрию и режим движения омываемой среды. Во всех случаях в качестве определяющей температуры выбирают:

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

Используя приведенные выше уравнения, уравнение Нуссельта можно записать в следующем виде:

$$\frac{\alpha \cdot X}{\lambda} = C \left(\frac{\beta \cdot g \cdot c_p \cdot \rho^2 \cdot X^3 \cdot (T_1 - T_2)}{\mu \cdot \lambda} \right)^n \cdot k.$$

В этом уравнении большинство переменных, заключенных в скобках, зависят от температуры. Тогда введем новые обозначения:

$$b = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot c_p}{\mu \cdot \lambda}, \text{ тогда } \frac{\alpha \cdot X}{\lambda} = C \cdot (b \cdot \rho^2 \cdot X^3 \cdot (T_1 - T_2))^n \cdot k.$$

Это уравнение – общая форма описания теплоотдачи естественной конвекцией при любых

геометрических размерах поверхности и ее положении относительно гравитационного поля.

Анализируя уравнение, обнаруживаем, что произведение $Gr \cdot Pr$ – является критерием для определения характера потока. В случае разных значений параметра $Gr \cdot Pr$ имеем:

$104 < Gr \cdot Pr < 109$ – ламинарная конвекция,

$109 < Gr \cdot Pr$ – турбулентная конвекция,

$Gr \cdot Pr < 104$ – влияние естественной конвекции не учитывается.

Можно ввести также и характерный размер для определения режима движения по поверхности:

$$X_{кр} = \sqrt[3]{\frac{10^9 \cdot \mu \cdot \lambda}{\beta \cdot g \cdot \rho \cdot g \cdot C \cdot (T_1 - T_2)}}.$$

где параметр $h < X_{кр}$ – если режим движения потока вдоль поверхности ламинарный, $h > X_{кр}$ – если режим движения смешанный.

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ГОТОВНОСТИ ЛАЗЕРА

В качестве исследуемого прибора был выбран серийно выпускаемый нашим предприятием частотно-стабилизированный He-Ne лазер ЛГН-303 [7]. Конструкция данного прибора состоит из двух элементов: блока автоподстройки частоты и излучателя, соединяемых между собой посредством двух кабелей. На рис. 2 представлена конструкция излучателя лазера ЛГН-303.

Рассмотрим лазер как термодинамическую систему, в которой выделяется некоторая мощность Q . Одна часть этой мощности Q_1 пойдет на нагрев элементов конструкции, которые обладают определенной теплоемкостью, другая часть – Q_2 будет отводиться от нагретого корпуса в виде тепла путем естественной конвекции. Учитывая, что

$$Q \Delta t = IU \Delta t (Dw), \quad (1)$$

$$Q_1 = cm \Delta T (Dw), \quad (2)$$

$$Q_2 \Delta t = \alpha F (T - T_0) \Delta t (Dw), \quad (3)$$

где I , U – ток и напряжение нагревающей спирали соответственно; c – удельная теплоемкость системы в целом, m – масса системы; α – коэффициент теплоотдачи, F – площадь внешней поверхности, T – ее температура, T_0 – температура окружающей среды, Δt – малый промежуток времени.



Рис.2. Излучатель лазера ЛГН-303

Переходя к бесконечно малым, можем записать:

$$Q dt = cm dT + \alpha F (T - T_0) dt.$$

Разделим обе части выражения на dt :

$$Q = \frac{cm dT}{dt} + \alpha F (T - T_0).$$

После разделения переменных, получаем:

$$\frac{dT}{Q - \alpha F (T - T_0)} = \frac{dt}{cm} \quad (4)$$

Введем новую переменную:

$$U = Q - \alpha F (T - T_0), \quad \frac{dU}{dT} = -\alpha F.$$

Тогда выражение (4) примет вид:

$$-\frac{dU}{U} = \frac{\alpha F dt}{cm}.$$

Проинтегрировав, получим:

$$-\ln(U_{t=t} - U_{t=0}) = \frac{\alpha F t}{cm},$$

$$\ln Q - \ln(Q - \alpha F (T - T_0)) = \frac{\alpha F t}{cm}.$$

Преобразуем как разность логарифмов:

$$\ln \frac{Q}{Q - \alpha F (T - T_0)} = \frac{\alpha F t}{cm},$$

$$e^{\frac{\alpha F t}{cm}} = \frac{Q}{Q - \alpha F (T - T_0)}.$$

Отсюда получаем выражение для температуры системы в любой момент времени:



$$T = T_0 + \frac{Q}{\alpha F} \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{\alpha F t}{cm}}} \right). \quad (5)$$

Время установления теплового режима в зависимости от подводимой мощности можно получить из выражения (5):

$$t_y = -\frac{cm}{\alpha F} \ln \left(1 - \frac{\alpha F}{Q} (T - T_0) \right) \quad (6)$$

Теоретическая зависимость температуры от времени (6) имеет экспоненциальный характер, следовательно, температура будет меняться с течением времени вплоть до бесконечности.

Из выражения (6) видно, что необходимо определить теплофизические постоянные системы с и α .

Тогда, исходя из закона сохранения энергии, воспользовавшись формулами (2) и (3), можно записать:

$$cm dT = -\alpha F (T - T_0) dt, \quad (7)$$

$$\frac{\alpha F}{cm} = -\frac{dT}{dt(T - T_0)}.$$

Сняв динамическую характеристику остывания экспериментального образца, которая представляет собой зависимость температуры системы от времени остывания от рабочей температуры до температуры окружающей среды, можно определить величины $\frac{dT}{dt}$ и $(T - T_0)$. Таким образом, существует возможность экспериментальным путём определить отношение $\frac{\alpha F}{cm}$. Его знаменатель cm представляет собой постоянную величину, не меняется с течением времени и не зависит от температуры. Числитель αF - напротив, зависит от времени остывания за счет непостоянства коэффициента теплопередачи при изменении температуры системы. Однако этим можно пренебречь в том случае, если приращение температуры относительно приращения времени остывания образца невелико, в этом случае изменение коэффициента теплоотдачи будет незначительно.

Используя график экспериментальных данных процесса охлаждения установки (рис.3), построим линию тренда данной зависимости и получим уравнение:

Используя график экспериментальных данных процесса охлаждения установки (рис.3), построим линию тренда данной зависимости и получим уравнение:

Используя график экспериментальных данных процесса охлаждения установки (рис.3), построим линию тренда данной зависимости и получим уравнение:

Используя график экспериментальных данных процесса охлаждения установки (рис.3), построим линию тренда данной зависимости и получим уравнение:

$$T = 2 \cdot 10^{-7} \cdot t^5 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot t^4 - 3 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 + 0,1248 \cdot t^2 - 2,9622 \cdot t + 58,865.$$

Продифференцировав по времени, получаем:

$$\frac{dT}{dt} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{t^4}{5} + 4 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{t^3}{4} - 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{t^2}{3} + 0,1248 \cdot \frac{t}{2} - 2,9622,$$

$$\frac{dT}{dt} + 2,9622 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{t^4}{5} + 4 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{t^3}{4} - 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{t^2}{3} + 0,1248 \cdot \frac{t}{2}. \quad (8)$$

Правой частью уравнения (8) можно пренебречь, тогда:

$$\frac{dT}{dt} \approx -2,9622.$$

Площадь поверхности излучателя лазера можно рассчитать, зная внешний диаметр системы, через которую происходит теплопередача ($d_n = 35 \cdot 10^{-3}$ (м)), и длину активного элемента ($L = 0,25$ (м)) [5]:

$$F = \frac{\pi \cdot d_n \cdot L}{4} = \frac{\pi \cdot 35 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25}{4} \approx 0,07 (m^2).$$

Мощность, выделяемая системой:

$$Q = I_c \cdot U_c + I_{sp} \cdot U_{sp},$$

где I_c и U_c - сила тока и напряжение активного элемента; I_{sp} и U_{sp} - сила тока и напряжение на спирали.

$$Q = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 1500 + 0,4 \cdot 12 = 10,8 (Вт).$$

В случае работы прибора в установившемся рабочем режиме вся выделяемая мощность отводится от него путем конвекции. Используя формулы (1) и (3), запишем:

$$Q = \alpha F (T - T_0). \quad (9)$$

Выразим из уравнения (9) коэффициент теплопередачи:

$$\alpha = \frac{Q}{(T - T_0) \times F},$$

где $(T - T_0)$ - разница температур между поверхностью излучателя и окружающей средой, равная $18^\circ C$ (экспериментальные данные). Тогда:

$$\alpha = \frac{10,8}{18 \cdot 0,07} = 8,57 \left(\frac{Вт}{m^2 \cdot ^\circ C} \right).$$

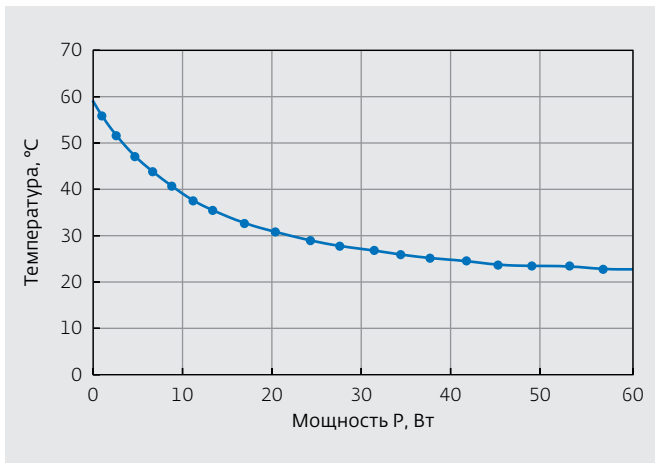


Рис.3. Экспериментальная характеристика изменения температуры спирали при охлаждении в зависимости от времени

Далее, используя уравнение (7), определяем коэффициент удельной теплоемкости системы:

$$c = -\frac{\alpha F(T - T_0)}{\frac{dT}{dt} m} = \frac{9,07 \cdot 0,07 \cdot 18}{-2,9622 \cdot 0,5} = 7,29 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right).$$

Используя формулу (6), построим график зависимости времени установления теплового режима от подаваемой мощности нагрева (рис.4). На графике кривые F1, F2 и F3 соответствуют поверхностям излучателя разной площади. Так, F1 соответствует площади поверхности излучателя, в два раза меньшей, чем площадь поверхности излучателя лазера ЛГН-303; F2 - площади поверхности излучателя лазера ЛГН-303; F3 - площади поверхности, большей в два раза, чем поверхность излучателя лазера ЛГН-303.

На графике изображены зависимости времени установления теплового режима в трех разных условиях - различных площадях поверхности излучателя. Площадь излучателя лазера ЛГН-303 эквивалентна площадке F2. Как видно из графика, при увеличении подводимой мощности время установления теплового режима существенно уменьшается. Как показывает график, можно получить время готовности 7 мин, если дополнительно увеличить подводимую мощность на время прогрева примерно на 5 Вт. Таким образом, в результате расчетных исследований было предложено внести в конструкцию лазера дополнительную нагревательную спираль, обладающую сопротивлением 15 Ом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис.5. На стеклянную трубку резонатора намотана дополнительная нагревательная спираль, для увеличения мощности нагрева. Она питается от отдельного источника питания (+15 В). Излучатель соединен с блоком автоподстройки частоты (АПЧ) с помощью сигнального кабеля. Блок АПЧ снабжен диагностическим выводом, к нему подключены два цифровых мультиметра, один из которых измеряет силу тока на регулирующей спирали, а другой - напряжение на ней. Цифровые мультиметры модели АРРА-207 измеряют нужный параметр каждые 0,5 с и регистрируют получаемые данные в памяти персонального компьютера.

Для детального исследования динамики прогрева и захвата системы АПЧ необходимы точные значения измерений температуры активного элемента и регулирующей спирали. Используя зависимость сопротивления меди от температуры

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)],$$

где R_0 , T_0 - значения сопротивления и температуры в начальный момент времени; T - температурный коэффициент для меди, выразим температуру через сопротивление

$$T = \frac{R - R_0}{R_0 \alpha} + T_0.$$

Для выбора электрических параметров, определяющих сопротивление регулирующей спирали при изменении температуры, используем закон Ома:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Значения напряжения и силы тока в заданный момент времени записываются с помощью цифровых мультиметров.

Исследование динамики прогрева и захвата системы АПЧ в лазере

Чтобы обеспечить стабильность излучения при изменениях температуры окружающей среды, необходимо с высокой точностью поддерживать постоянство температуры поверхности нагретого тела (в данном случае - поверхности активного элемента в корпусе). Для этого при изменении температуры внешней среды соответственно должна изменяться мощность, подводимая

к управляющему элементу – подогревателю. Если изменение температуры окружающей среды составляет

$$\Delta T_{\text{ср.}} = T_{\text{ср.макс.}} - T_{\text{ср.мин.}}$$

то для поддержания постоянной температуры $T_{\text{пов.}}$ рассеиваемая мощность должна составлять:

$$P_{\text{рас.макс.}} = \alpha F (T_{\text{пов.}} - T_{\text{ср.мин.}}),$$

$$P_{\text{рас.мин.}} = \alpha F (T_{\text{пов.}} - T_{\text{ср.макс.}}).$$

Откуда подводимая к нагревателю мощность, необходимая для компенсации изменения температуры внешней среды, должна удовлетворять условию

$$P_{\text{под.макс.}} = P_{\text{рас.макс.}} - P_{\text{рас.мин.}} = \alpha F \cdot \Delta T_{\text{ср.}}$$

Учитывая, что изменение температуры окружающей среды задано в диапазоне $\pm 5^\circ\text{C}$, необходимо подвести дополнительную мощность и нагреть излучатель до более высокой температуры – примерно до 65°C . Тогда, если отключить дополнительную спираль при достижении температуры 65°C и поддерживать ее постоянной, то при изменении температуры окружающей среды на $\pm 5^\circ\text{C}$ длина резонатора останется постоянной. Будет происходить либо прогрев, либо охлаждение активного элемента. Критерием перевода прибора из режима прогрева в режим поддержания температуры является наперед заданная скорость перестройки оптической частоты резонатора.

С помощью экспериментальной установки были проведены исследования динамики прогрева и захвата лазера ЛГН-303. После обработки был построен график зависимости температуры регулирующей спирали от времени (рис.6). На графике обозначены: А – прогрев лазера с дополнительной спиралью; Б – прогрев лазера без дополнительной спирали; В – прогрев лазера без дополнительной спирали и без перехода в режим стабилизации; Г – прогрев лазера без дополнительной и основной спирали.

Из анализа графической зависимости становится ясно, что температура установления термодинамического баланса при прогреве лазера без дополнительной спирали достигает приблизительно 65°C . Если же использовать дополнительную спираль, то температура практически остается такой же. Однако время готовности за счет ввода дополнительного элемента значительно

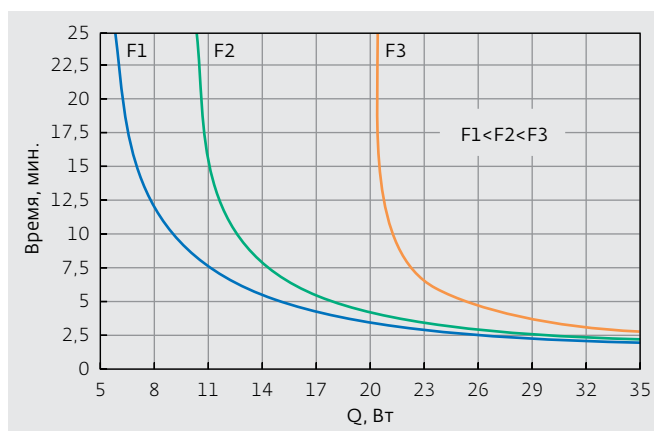


Рис.4. Зависимость времени установления теплового режима от подводимой мощности нагрева

снижается. Если при прогреве лазера без дополнительной спирали время выхода прибора на рабочий режим составило примерно 15 мин, то при подаче дополнительной мощности оно сокращается до 7 мин 45 с, что практически в два раза меньше. Таким образом, экспериментально получено подтверждение теоретических расчетов, согласно формуле (6), для времени установления теплового режима в зависимости от подводимой мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. П.Воробьев, Е.Чуляева. Частотно-стабилизированные лазеры для точных измерений. – Вестник РГТУ, 2012, вып.39, №1, с.26-33.
2. Дульнев Г.Н., Тарановский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. – Л.:

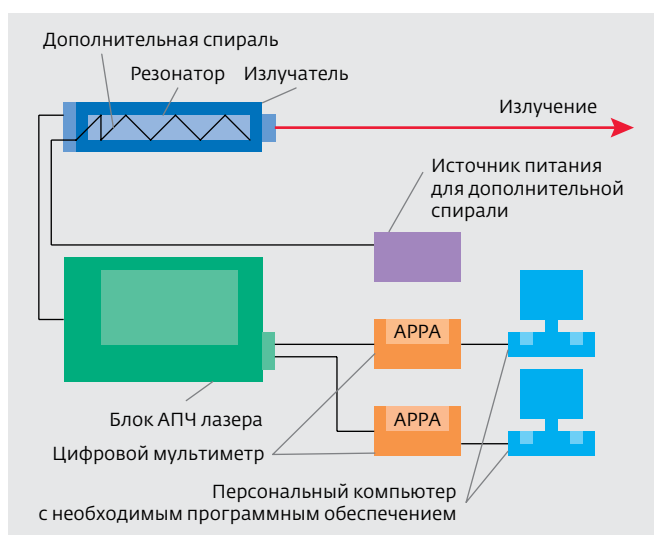


Рис.5. Схема экспериментальной установки

Энергия, 1971.

3. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977.
4. **Уонг Х.** Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. / Справочник. – М.: Атомиздат, 1979.
5. **Краус А.Д.** Охлаждение электронного оборудования. – Л.: Энергия, 1971.
6. **Дульнев Г.Н.** Методы расчета теплового режима приборов – М.: Радио и связь, 1990.
7. URL: <http://www.plasmalabs.ru>

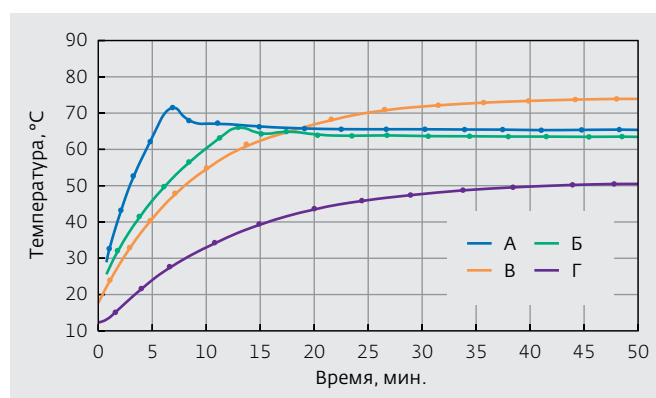


Рис. 6. Экспериментальное исследование динамики прогрева и стабилизации системы АПЧ



УКЛАДЫВАЕМ УГЛЕВОЛОКНО. ПРОФЕССИОНАЛЬНО

Американская компания INGERSOLL впервые в России представляет машину для автоматической выкладки углеродного волокна. Использование углеволоконных композитных материалов в гражданском авиастроении началось еще несколько лет назад. Однако оно было ограничено изготовлением лишь простых деталей, т.к. производство велось вручную. Данная технология не обеспечивала должной повторяемости и постоянства. Сегодня ведущие аэрокосмические предприятия все чаще внедряют автоматизированные станки для выкладки лент препрега (ATL) и углеволоконных жгутов (AFP). Они позволяют изготавливать множество деталей с гораздо большей эффективностью.

Для того чтобы понять отличие в оборудовании этих двух типов, лучше начать с описания самого выкладываемого материала. Волокном (жгутом) называют тонкую ленту однонаправленного композита ограниченной ширины. Жгуты большей ширины принято называть лентами. Процесс автоматической выкладки лент препрега, который фирма INGERSOLL совершенствует уже много лет – это один из вариантов технологии изготовления деталей из композитных материалов. Для ее успешного применения необходимо учитывать геометрию детали. Изготовление деталей выпуклой формы возможно только при условии соблюдения минимального радиуса кривизны и точного слежения за направлением выкладки ленты.

Как выкладываем – так и летим

Рассмотрим пример выбора оборудования для изготовления обшивки самолетного крыла. Традиционный метод выкладки ленты на эту, казалось бы, плоскую поверхность не удовлетворял высоким аэродинамическим требованиям в зоне соединения крыла с фюзеляжем.

В результате в некоторых наиболее искривленных участках наблюдалось коробление ленты. Это привело к необходимости изменения технологии и возврату к ручной выкладке материала.

Для решения этой задачи станки INGERSOLL для автоматической выкладки волокна (жгутов) просто необходимы! Технология гарантирует получение однородной по структуре детали и высочайшую повторяемость процесса. А значит, и качество. При нанесении покрытия на сотовые и слоистые структуры данный метод обеспечивает непрерывность выкладки волокна даже при изменении направления движения рабочей головки станка.

Конструкция и форма задают тон

Детали, которые будут производиться путем выкладки волокна, должны изначально разрабатываться с учетом особенностей данной технологии. Это позволит повысить производительность и качество, существенно снизить вес готовой детали и ее стоимость. Конструктору необходимо особо учитывать ее изгиб, изменения направления выкладки, уменьшение и увеличение количества выкладываемых жгутов, геометрию поверхности. Он может также изменить направление выкладки жгутов, что позволяет с большей степенью точности учесть все сложности, возникшие при работе детали.

Необходимо также учитывать и тип формы, на которой будет производиться выкладка детали. Традиционные подвижные формы имеют ограничения в применении. Они должны отвечать строгим динамическим требованиям, что делает их конструкцию сложной и дорогой. Конструкция с ненадежными характеристиками способна снизить производительность и точность работы станка. Поэтому целесообразно применять

неподвижные формы. Портальные станки INGERSOLL для выкладки волокна (жгутов) имеют шесть одновременно управляемых осей, что позволяет им работать с изяществом художника, пишущего на холсте.

Работа на высокий результат

Большая часть перечисленных технологических нюансов уже учтена в современных станках INGERSOLL. Модульная конструкция позволила создать целые семейства станков, как с горизонтальным, так и с вертикальным расположением оси главного движения. При этом и те и другие могут оснащаться всей номенклатурой рабочих головок различных типов. Таким образом, модульная конструкция позволяет достичь высокой производительности при изготовлении деталей малых размеров, высокой гибкости и скорости для производства крупногабаритных изделий.

Последние разработки INGERSOLL в этом направлении позволили повысить компетенции компании благодаря возможности применять улучшенную систему контроля прогрева и полноценную двунаправленную рабочую головку. Технология применения сжимаемого ролика также модернизирована. Это позволяет наносить материал на вогнутые поверхности и сотовые структуры. Для производительности системы большое значение имеет возможность выбора ширины выкладываемых жгутов, поскольку в этом случае нет необходимости комплектовать станок несколькими роликами разных размеров для выполнения различных видов работ. Обращайтесь в компанию "Пумори-инжиниринг инвест" и получите подробную информацию об оборудовании INGERSOLL.

Н.Манько

www.pumori-invest.ru, pin@pumori.ru

Автоматическое трехмерное измерение и анализ асферических линз и компонентов сложной оптики

Система измерения асферических линз / форм Talysurf PGI 3D Optics

Идеальное сочетание сверхвысокой точности с универсальностью измерений и полной автоматизацией.

При наличии возможности измерять практические вертикальные уклоны при отсутствии ограничений в отклонении асферических линз, прибор PGI 3D Optics обладает гибкостью, необходимой для измерения огромного количества оптических компонентов, применяемых в различных отраслях промышленности. Наличие нового (полностью автоматического) пользовательского интерфейса и трехмерной индикации результатов обеспечивает обязательное выполнение комплексной оценки погрешности формы детали и неравномерности кривизны поверхности для большинства литых, шлифованных деталей или деталей после алмазной обработки.

PGI 3D Optics – идеальное средство измерения

Асферические оптические системы являются одними из самых востребованных на сегодняшний день программ измерения формы со сверхвысокой точностью. Новая система измерения формы Form Talysurf PGI 3D Optics отвечает самым жестким метрологическим требованиям к новым и уже существующим видам линз, предлагая широкий спектр областей применения:

- ИК-оптика (в оборонных, медицинских и разведывательных системах и т. д.)
- Объектив проектора
- Светодиоды высокой мощности
- Линзы цифровых фотоаппаратов
- Фотокамеры сотовых телефонов
- Blu-ray (и стандартная) DVD-оптика

Автоматизация

Полностью автоматизированное действие обеспечивается за счет нового производственного интерфейса, отлично подходящего для применения в цеховых условиях. Срабатывающий «по одному щелчку», прибор PGI 3D Optics можно использовать после минимальной подготовки.

