

## РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ НАГРЕВАТЕЛЯМИ ДЛЯ АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (АТНК)

### Введение

Неразрушающий контроль (НК) качества промышленной продукции является неотъемлемой частью современного производства. Тепловой неразрушающий контроль (ТНК) все шире проникает в сферу производства и эксплуатации, позволяя получать информацию о состоянии контролируемого объекта, недоступную другим методам контроля.

Метод теплового неразрушающего контроля (ТНК) основан на взаимодействии теплового поля объекта с чувствительными термометрическими элементами, преобразовании параметров поля в параметры электрического сигнала и передаче его на регистрирующее устройство (РУ). При этом в зависимости от наличия или отсутствия внешнего источника энергии различают пассивный и активный ТНК. Эти методы обладают рядом характеристик, привлекающих внимание как разработчиков дефектоскопической аппаратуры, так и промышленных потребителей. Это – высокая чувствительность к изменению теплофизических характеристик объектов контроля, наличию источников и утечек тепла, изменению геометрических размеров объектов контроля: дистанционность; уникальная производительность контроля, сравнимая лишь с оптическими методами; безопасность в обслуживании.

Активный ТНК (АТНК) предусматривает воздействие источника теплового возбуждения (ИТВ) на объект контроля (ОК), имеющий в исходном состоянии температуру окружающей среды и регистрацию отклика ОК на внешнее воздействие. В зависимости от взаимного расположения ИТВ и РУ относительно ОК, согласно ГОСТ 23483 – 79 существует несколько способов контроля. Основными из них являются односторонний (а) и двусторонний (б) способы, схематично представленные на рис.1, где показаны: 1 – источник нагрева (ИТВ); 2 – объект контроля (ОК); 3 – устройство регистрации (РУ).

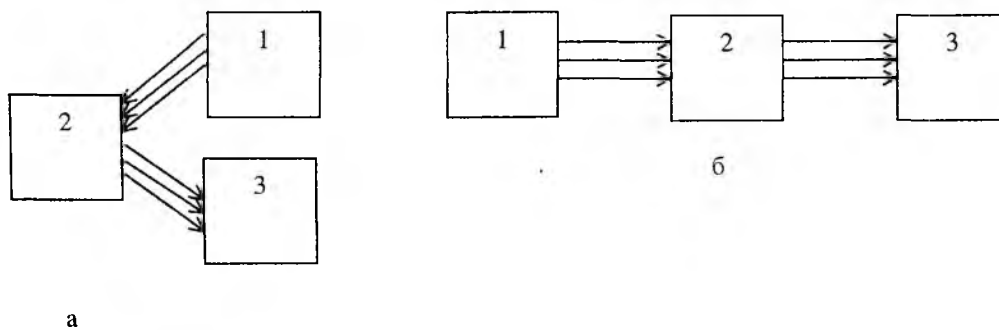


Рис. 1

В свою очередь ИТВ согласно ОСТ 1.42107 – 81 разделяются на 1) точечные; 2) полосовые; 3) площадочные.

В настоящее время существует большое количество различных типов ИТВ (лазеры [1], плазмотроны [2], вихревые трубы [3,4], лампы накаливания [5,6] и т.д.).

Однако, как показывает литературный анализ, вопросы разработки высокостабильных и равномерных полосовых и площадочных излучателей с регулируемым временем нагрева не нашли достаточного отражения. Практически отсутствуют инженерные расчеты параметров таких нагревателей, методика их поверки и аттестации. Решение этих вопросов особенно актуально при разработке и создании систем тепловой дефектометрии. С этой точки зрения наиболее подходящими являются нагреватели, сконструированные на базе трубных галоген-

ных ламп типа КГ и КГТ, снабженных отражателями различного типа [7,8]. Целесообразность и перспективность применения галогенных ламп для формирования заданного температурного поля при тепловой дефектоскопии обусловлена тем, что эти лампы по энергетическим, эксплуатационным и конструктивным параметрам превосходят все известные ИК – излучатели [9 – 11]. Существенными преимуществами использования галогенных ламп являются:

- очень малая тепловая инерционность;
- возможность гибкого управления распределения потоков лучистой энергии по поверхности нагреваемого объекта контроля;
- достаточная для большинства задач теплового контроля плотность облучения нагреваемого объекта: для большинства галогенных ламп удельная плотность излучения с единицы площади тела накала  $R_{Т.н.}$  составляет при номинальном питающем напряжении величину  $0,7 - 1,7 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$ .

### 1. Постановка задачи

Для целей АТНК основными параметрами нагревателя являются: плотность потока энергии  $E$  [ $\text{Вт/м}^2$ ], создаваемая источником на заданной площадке, и неравномерность нагрева на заданной площади. Допустимый уровень неравномерности составляет  $\eta \leq 5 \%$ . Рассматриваются два типа излучателей: 1) полосовой ИТВ излучательного типа, основными параметрами которого являются мощность излучения  $Q$ , длина тела накала  $L$ ; 2) площадочный ИТВ, состоящий из  $N$  трубчатых излучателей (например, галогенных ламп) конструкция которого включает плоский отражатель с закругленными краями. Конструктивные параметры площадочного ИТВ показаны на рис. 2.

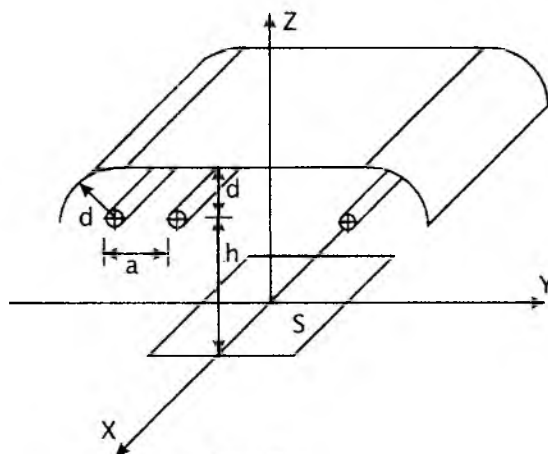


Рис. 2

Задачей проектирования для площадочного ИТВ является определение минимального числа нагревателей и их расположения (параметры  $h$ ,  $a$ ,  $d$  на рис. 2), обеспечивающих требуемые значения плотности потока энергии  $\psi$  и неравномерности на заданной площади  $S$ .

### 2. Моделирование теплового поля, создаваемого полосовым ИТВ

В авиакосмической индустрии, машиностроении и других отраслях весьма часто ставится задача одностороннего АТНК цилиндрических объектов. При контроле объектов цилиндрической формы полную развертку можно получить путем вращения объекта. При этом полоса нагрева, полоса сканирования и ось вращения объекта должны быть параллельны [9,12].

При контроле плоских объектов сканирование поверхности производится путем перемещения всего объекта. При этом полоса нагрева и линия сканирования перпендикулярны

направлению перемещения. В качестве регистрирующего устройства применяется радиометр с одноосевым сканированием (сканер) [13]. Обработка результатов контроля проводится в режиме восстановления кадра.

Полосовые ИТВ создаются на основе одного линейного элемента и служат для тепловой накачки как плоских, так и цилиндрических объектов контроля. Как правило, полосовые ИТВ работают в непрерывном режиме. В качестве полосовых ИТВ используют линейные излучатели на основе спиральных кварцевых ламп, галогенных ламп, спиральных нагревателей с открытым телом накала.

Для целей АТНК основными параметрами нагревателя являются: плотность потока энергии  $E$  [Вт/м<sup>2</sup>] создаваемая источником на заданной площадке, и неравномерность нагрева на заданной площади  $\eta$ , %.

Освещенность, создаваемая одним цилиндрическим излучателем, параллельным плоскости  $xOy$  и оси  $Ox$  с началом в центре координат, выражается формулой (1) [14]:

$$E = \frac{Qh}{8\pi L(h^2 + y^2)} \left( \arctg \frac{L/2 + x}{\sqrt{h^2 + y^2}} + \frac{1}{2} \sin \left( 2 \arctg \frac{L/2 + x}{\sqrt{h^2 + y^2}} \right) + \arctg \frac{L/2 - x}{\sqrt{h^2 + y^2}} + \frac{1}{2} \sin \left( 2 \arctg \frac{L/2 - x}{\sqrt{h^2 + y^2}} \right) \right), \quad (1)$$

где:  $Z_l$  – высота излучателя;  $x, y$  – координаты, в которых вычисляется освещенность;  $L$  – длина излучателя;  $Q$  – мощность излучателя. Величины, входящие в выражение (1), показаны на рис. 3.

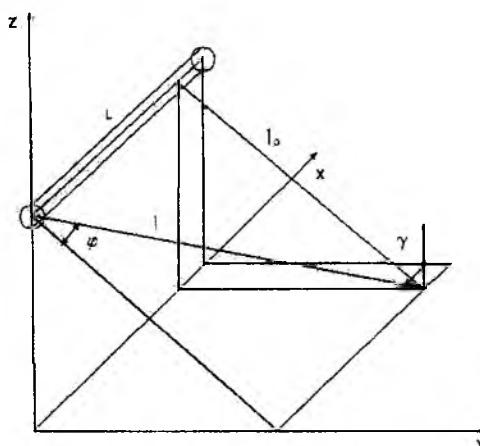


Рис. 3

На рис. 4 показано распределение мощности нагрева на поверхности плоского объекта контроля от полосового излучателя, полученное согласно выражению (1). В качестве полосового излучателя была взята стандартная галогенная лампа КГ-220-425 со следующими характеристиками:  $L = 226$  мм.,  $Q = 425$  Вт., диаметр колбы лампы  $D = 8$  мм. Высота излучателя  $Z_l = 3$  см, отражатель – отсутствует.

Согласно литературным сведениям, введение отражателя (обычно цилиндрического или конического) [15,16] позволяет повысить мощность нагрева ОК до 30%.

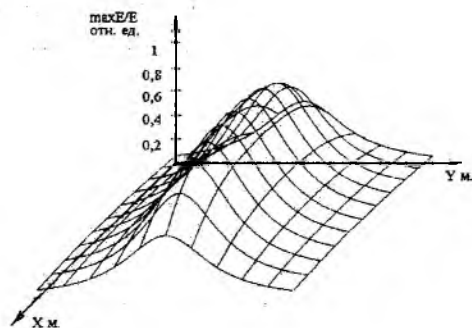


Рис. 4

### 3. Моделирование теплового поля, создаваемого площадочным ИТВ

Площадочный ИТВ создается на основе  $N$  линейных излучателей с отражателем. Поле освещенности  $E$  объекта может быть рассчитано как суперпозиция полей освещенности, создаваемых каждым излучателем (реальным или мнимым) в отдельности.

$$E = \sum_{i=1}^N E(x, a((N+1)/2 - i), h) + k \sum_{i=1}^N E(x, a((N+1)/2 - i), h + h_1) + kE(x, -a(N-1)/2, h) + kE(x, a(N-1)/2, h), \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент отражения поверхности отражателя.

Для решения задачи были выбраны стандартные галогенные лампы КГ-220-360 и КГ-220-425 со следующими характеристиками:  $L_1 = 128$  мм.,  $Q_1 = 360$  Вт;  $L_2 = 226$  мм.,  $Q_1 = 425$  Вт. Диаметр колбы ламп  $D = 8$  мм. Размер площади нагрева –  $10 \text{ см}^2$ .

В таблице 1 показано изменение неравномерности  $\eta$  для точечных источников в зависимости от изменения шага  $a$  и количества  $N$  источников. Было выбрано минимально возможное количество источников излучения  $N = 6$ , обеспечивающих допустимый уровень неравномерности. Как видно из табл.1 при увеличении количества источников можно добиться более низкой неравномерности освещенности поверхности объекта.

Таблица 1

N	2	3	4	5	6
$\eta, \%$	34,8	16,9	8,9	7,6	3,9
$a, \text{ мм}$	60	41	33	29	29

Вычисления были произведены для точечных источников, удаленных от поверхности объекта на расстояние  $h = 20$  мм для расстояний между источниками, обеспечивающих минимальную неравномерность на отрезке длиной  $l = 100$  мм.

Используя выражение (2) для решения задачи с выбранными типами излучателей были получены следующие оптимальные характеристики двух нагревателей с зеркальным отражателем, показанные в таблице 2.

Таблица 2

Тип источника	$h, \text{ мм}$	$a, \text{ мм}$	$d, \text{ мм}$	$E, \text{ кВт/м}^2$	$\eta, \%$
1	150	46	15	10	6,9
2	20	23,5	15	45,6	2,5

Как видно из таб. 2. для первого типа излучателей невозможно получить решение, удовлетворяющее требуемой неравномерности потока энергии. Это связано со значительным

влиянием длины источника излучения на неравномерность освещения при длине источника, сравнимой с длиной освещаемой поверхности.

Поля плотности потока энергии на поверхности ОК, создаваемые разработанными площадочными ИТВ, показаны на рис. 5, где а) – 1-й; б) – 2-й ИТВ.

Вычислительный эксперимент показал, что при варьировании расстояния между отражателем и источниками излучения можно добиться уменьшения неравномерности на 0,5% при уменьшении освещенности на 20%.

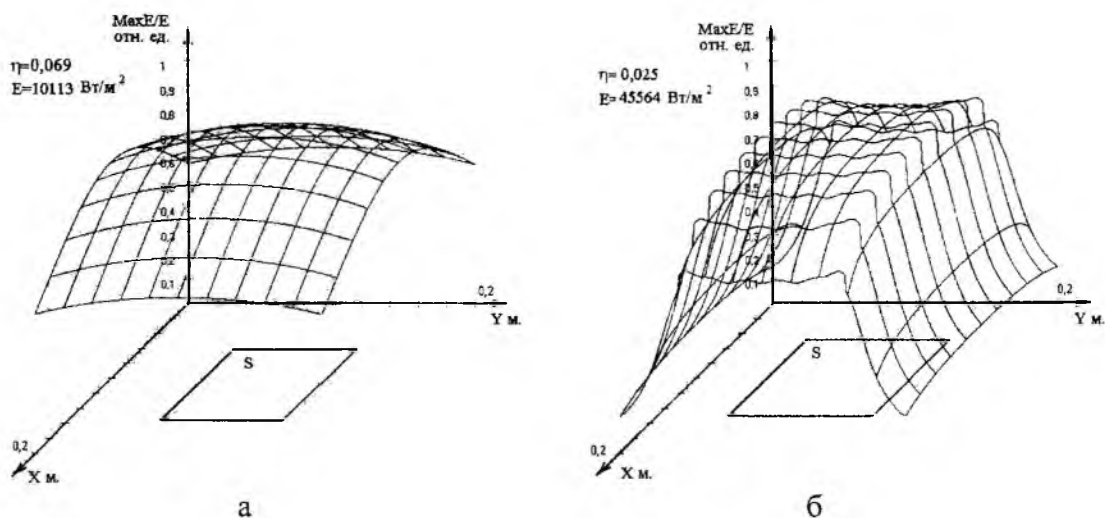


Рис. 5

Для повышения производительности АТНК представляет практический интерес конфигурация теплового поля, создаваемого плоским ИТВ на поверхности цилиндрических объектов [17]. На рис. 6 показана конфигурация теплового поля, формируемого разработанным ИТВ (2-й ИТВ из таблицы 2) на объекте цилиндрической формы с радиусом 40 мм, при  $Z_1 = 3$  см.

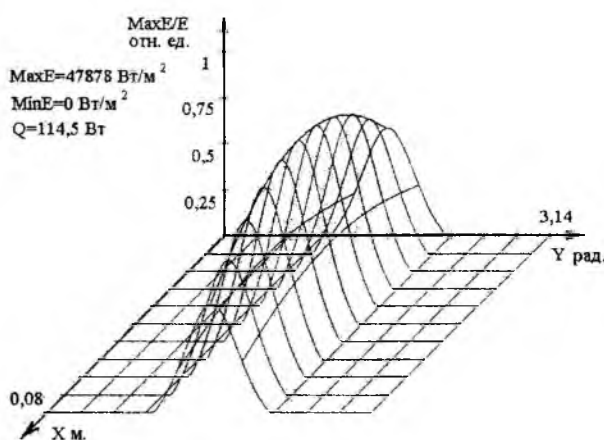


Рис. 6

Из рис. 6 следует, что нагрев площадочными ИТВ цилиндрических объектов является существенно неравномерным. При проведении тепловой дефектометрии и томографии это необходимо учитывать, что и делается программными методами по специальным методикам [18].

## Выводы

1. Разработана методика расчета пространственно– энергетических характеристик теплового поля, создаваемого одиночным полосовым ИТВ.
2. Разработана методика расчета пространственно– энергетических характеристик теплового поля, создаваемого площадочным ИТВ, образованным из  $N$  полосовых элементов.
3. Разработано экспериментальное площадочное ИТВ на основе стандартных галогенных ламп КГ-220-425 с показателем неравномерности нагрева  $\eta = 2,5 \%$  и мощностью  $E = 45,6 \text{ кВт/м}^2$ .
4. На основе разработанных методик проведено моделирование теплового поля, создаваемого площадочным ИТВ на поверхности плоского и цилиндрического объектов.

**Список литературы:** 1. Бекешко И.А., Упадышев А.Б. Выявление дефектов в тонкостенных трубах по распределению тепловых полей поверхности // Дефектоскопия. 1970. № 2. С. 106 – 110. 2. Бекешко И.А. Тепловой дефектоскоп для контроля изделий цилиндрической и конической формы // Дефектоскопия. 1978. № 1. С. 111 – 112. 3. Гавинский Ю.В., Ворожцов Б.И. и др. Принципы построения системы теплового контроля с применением вихревых труб // Дефектоскопия. 1984. № 11. С. 35 – 41. 4. Гавинский Ю.В. Устройство для теплового зондирования материалов и конструкций с применением тепловой трубы // Дефектоскопия. 1981. № 2. С. 60 – 64. 5. Щербаков В.Г., Плохов Ю.П. и др. Тепловой метод неразрушающего контроля крупногабаритных изделий из углепластика // Дефектоскопия. 1983. № 6. С. 58 – 60. 6. Попов Ю.А., Карпельсон А.Е. и др. Тепловой контроль качества многослойных изделий // Дефектоскопия. 1976. № 3. С. 76 – 81. 7. Рапопорт Д.А., Будадин О.Н. Модель автоматизированного неразрушающего теплового контроля // Дефектоскопия. 1983. № 12. С. 65 – 72. 8. Рапопорт Д.А., Щитцов В.С. и др. Тепловизионная система неразрушающего контроля качества изделий // Дефектоскопия. 1978. № 2. С. 67 – 71. 9. Рапопорт Д.А., Будадин О.Н. Тепловизионная механизированная система для неразрушающего контроля малогабаритных изделий из полимерных материалов // Дефектоскопия. 1981. № 5. С. 102 – 104. 10. И.А. Бекешко И.А., Лепарский А.Н. и др. Исследование скрытых неоднородностей в плоских диэлектрических материалах тепловыми методами // Дефектоскопия. 1976. № 6. С. 128 – 130. 11. Попов Ю.А., Кеткович А.А. и др. Обнаружение отслоений в трехслойных изделиях с использованием быстродействующего тепловизора // Дефектоскопия. 1975. № 6. С. 62 – 67. 12. Стороженко В.А., Денисов С.С. и др. Тепловой дефектоскоп для неразрушающего контроля цилиндрических изделий // Дефектоскопия. 1978. № 4. С. 102 – 103. 13. Стороженко В.А., Рапопорт Д.А. и др. Тепловизор с одноосевым оптико – механическим сканированием. // Оптико – механическая промышленность. 1977. № 12. С. 23 – 24. 14. Мешков С.Н., Гаптракипов А.А. Площадочный нагреватель для теплового неразрушающего контроля (АТНК) // Неруйнівний контроль конструкційних та функціональних матеріалів: Зб. наук. праць/ Фіз. – мех. ін – т ім. Г.В. Карпенка НАНУ. Львів, 2002. С. 172 – 174 (Фіз. методи контролю середовищ, матеріалів та виробів; Вип. 7). 15. Бураковский Т., Гизинский Е. и др. ИК излучатели: Пер. с польского Л.: Энергия, 1978. 408 с. 16. Стороженко В.А., Денисов С.С. Полосовой нагреватель / Материалы семинара «Тепловые и капиллярные методы и средства неразрушающего контроля неметаллических и металлических материалов. 1978. г. Азов. С. 88 – 89. 17. Мешков С.Н., Мельник С.И. Тепловой контроль и диагностика объектов с поверхностью тел вращения, (см. 14). С. 169 – 171. 18. J. F. Pelletier, E. Grinzato и др. Shape and uneven heating correction for NDT on cylinders by thermal methods, Conference QIRT 96 – Eurotherm Series 50, Stuttgart, Germany, September 2-5. 1996. pp. 263 – 268.