

В. С. Корко, И. Б. Дубодел, П. В. Кардашов

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: innadubodel@gmail.com; Korko.S@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Исследованы электрические, энергетические и спектральные характеристики инфракрасных излучателей различных типов, обоснованы требования и технические рекомендации к параметрам источников инфракрасного излучения для термической обработки материалов.

Ключевые слова: инфракрасный излучатель, спектр излучения, длина волны, трубчатый электронагреватель, газокерамический излучатель, кварцевая лампа, напряжение, сила тока, мощность, коэффициент полезного действия, радиационная температура, рабочая температура источника, электрические, энергетические, спектральные характеристики.

V. S. Korko, I. B. Dubodel, P. V. Kardashov

EI "Belarusian State Agrarian Technical University"

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: innadubodel@gmail.com; Korko.S@mail.ru

STUDY OF CHARACTERISTICS OF INFRARED EMITTERS FOR THERMAL TREATMENT OF MATERIALS

Abstract. The electrical, energy and spectral characteristics of infrared emitters of various types were studied, and the requirements and technical recommendations for the parameters of infrared radiation sources for thermal processing of materials were substantiated.

Keywords: infrared emitter, emission spectrum, wavelength, tubular electric heater, gas-ceramic emitter, quartz lamp, voltage, current strength, power, efficiency, radiation temperature, operating temperature of the source, electrical, energy, spectral characteristics.

Введение

Эффективность воздействия инфракрасного излучения (ИК) на обрабатываемые материалы определяется длиной волны и энергией фотона, а также уровнем облученности и продолжительностью процесса. В соответствии с государственным стандартом [1] для практических целей любое электромагнитное излучение в длинноволновом диапазоне 780 нм ...1 мм. Инфракрасный спектр разделен по результатам производимой биологической опасности на три диапазона: инфракрасное излучение А (ИК-А) (*infrared A (IR-A)*) – оптическое излучение, которое распространяется в спектральном интервале от 780 до 1 400 нм; инфракрасное излучение В (ИК-В) (*infrared B (IR-B)*) – оптическое излучение в спектральном интервале от 1 400 до 3 000 нм; инфракрасное излучение С (ИК-С) (*infrared C (IR-C)*) – оптическое излучение в спектральном интервале от 3 000 нм до 1 мм.

Анализ различных литературных источников показывает, что инфракрасный нагрев получил широкое распространение в различных процессах сельскохозяйственного производства (дезинсекция, сушка, нагрев материалов, стерилизация, обеззараживание, обогрев животных и др.) благодаря своим специфическим особенностям и технологическим эффектам. ИК-излучение обладает хорошей проникающей способностью и в процессе теплового преобразования энергия его поглощенного фотона превращается в энергию колебательного движения молекул приемника [2–4]. За счет объемного поглощения ИК-излучения температура внутри материала приемника

может оказаться выше температуры его поверхности, что способствует более интенсивному удалению влаги, чем при контактной и конвективной сушке.

Установки для нагрева, обеззараживания, стерилизации и других технологий обработки сельскохозяйственных материалов относят к облучательным установкам термического действия. Кинетика накопления тепловой энергии материалом при поглощении ИК-лучей, а также распределение температуры в объеме зависят от физических параметров объекта обработки, условий его охлаждения и параметров облучательной установки [3–5].

Тепловое излучение от ИК-нагревателя не поглощается воздухом, поэтому вся энергия от излучателя почти без потерь достигает обогреваемых поверхностей и материалов. Причем теплота выделяется только в зоне его прямого действия, т. е. нагрев носит локальный характер, что и обеспечивает определенные преимущества перед другими нагревательными установками. Например, при использовании ИК-нагревателя практически отсутствует скапливание более теплого воздуха под сводом рабочей камеры, потолком или крышей здания, что характерно, например, для конвективного обогрева. Таким образом, использование ИК-источников приводит к снижению потребления энергии и уменьшению затрат на нагрев по сравнению с традиционными способами [4–6].

Эффективность инфракрасного нагрева зависит от выбора излучателей, которые должны удовлетворять следующим основным требованиям: максимальному соответствию длины волны потока излучения, поглощательной способности объекта нагрева; безопасности в пожарном отношении и в обслуживании; простоте и надежности в работе.

Цель настоящей работы состоит в исследовании электрических, энергетических и спектральных характеристик инфракрасных излучателей различных типов (электрического, газового и газо-керамического), выработке требований и технических рекомендаций к параметрам источников инфракрасного излучения для установок термической обработки сельскохозяйственных материалов.

Задачи исследования включали разработку методики и измерительного стенда, исследование электрических, энергетических и спектральных характеристик инфракрасных излучателей, обоснование требований по электрическим и энергетическим параметрам для технологических установок термической обработки.

Основная часть

Максимального эффекта нагрева ИК-лучами достигают при соответствии спектра излучения спектру поглощения обрабатываемого материала. Наибольшая поглощательная способность большинства веществ лежит в инфракрасной области. При этом каждое вещество имеет свой ярко выраженный максимум поглощения и пропускания в определенном диапазоне волн. Так, при дезинсекции зерна наилучший эффект достигается при длине волны 2,7–3,7 мкм, при сушке зерна – 3,7–5,5 мкм и т. д. [2–3].

Излучающая способность тел ($Вт/м^2$) зависит от температуры по закону Стефана – Больцмана [3]:

$$E = 5,7\varepsilon \left(\frac{T_{\text{ц}}}{100} \right)^4, \quad (1)$$

где ε – степень черноты тела; $T_{\text{ц}}$ – цветовая температура излучающей поверхности, К.

Положение максимума излучения соответствует закону смещения Вина:

$$\lambda_{\text{макс}} = \frac{2896}{T_{\text{ц}}}. \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{макс}}$ – длина волны излучения, мкм.

Связь между излучательной и поглощательной способностями тел определяют по закону Кирхгофа. Для серого тела отношение излучательной способности e_T к его поглощательной способности α_T является функцией длины волны и температуры

$$\frac{e_T}{\alpha_T} = f(\lambda, T). \quad (3)$$

Как видно из приведенных уравнений (1–3), излучающая способность тел прямо пропорциональна температуре тела в четвертой степени, длина волны излучения обратно пропорциональна этой температуре. Излучательная и поглощательная способности тел зависят от температуры и длины волны.

В зависимости от температуры источника инфракрасных лучей (тела накала) излучатели подразделяют на низкотемпературные ($T = 673 \dots 973$ К; $\lambda_{\text{макс}} = 3 \dots 4$ мкм); среднетемпературные ($T = 973 \dots 1473$ К; $\lambda_{\text{макс}} = 2 \dots 3$ мкм) и высокотемпературные ($T = 1473 \dots 2773$ К; $\lambda_{\text{макс}} = 1 \dots 2$ мкм) [2–4].

В качестве источников инфракрасных лучей обычно используют электрические и газокерамические излучатели. Низкотемпературными электрическими излучателями являются трубчатые электронагреватели (ТЭН); среднетемпературными – кварцевые трубки с нихромовой спиралью, спирали на керамических основаниях; высокотемпературными – кварцевые лампы (ИКН, КГТ, КГТО и др.), карбидокремниевые, металлические стержневые излучатели из силита, дисилицида молибдена, карборунда с температурой до 1873 К, применяющиеся в промышленных нагревательных печах [5–10].

Измерительный стенд для проведения исследований должен обеспечить включение и работу электрических излучателей, варьирование режимов в технологически обусловленных пределах, доступность измерения электрических, энергетических и спектральных характеристик и т. д. Схема электрическая принципиальная измерительного стенда приведена на рисунке 1.

Автоматический выключатель QF обеспечивает коммутацию электрической сети, защиту от короткого замыкания. Выключатель QS позволяет оперативно коммутировать нагрузку, лабораторный автотрансформатор TV – изменять питающее напряжение, подаваемое на ИК-излучатели, измерительные приборы вольтметр pV , амперметр pA и ваттметр pW – фиксировать соответствующие параметры. К выходным зажимам 1 и 2 подключают источники ИК-излучения. Основными энергетическими и электрическими параметрами инфракрасных излучателей являются питающее напряжение, сила тока, мощность, коэффициент полезного действия, рабочая температура источника, длина волны максимального излучения, распределение радиационной температуры на обогреваемой поверхности, величина зоны равномерной плотности излучения и др. Эти параметры в основном определяют области наиболее эффективного использования каждого типа инфракрасного излучателя.

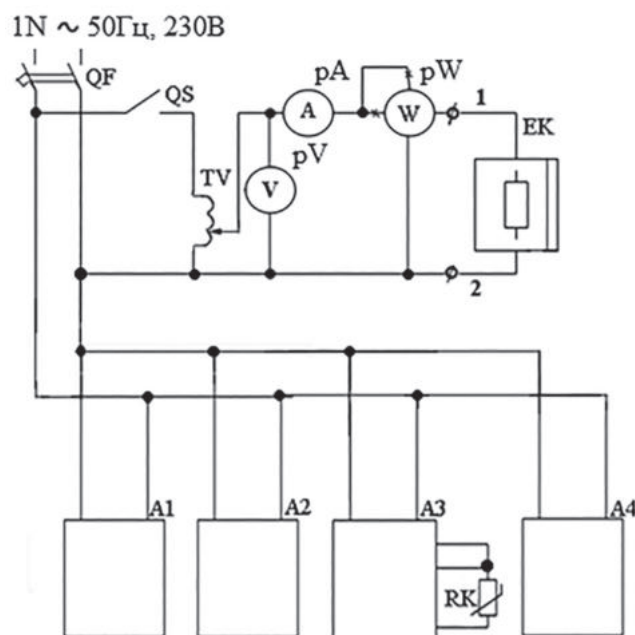


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная измерительного стенда:
 $A1$ – универсальный монохроматор; $A2$ – пирометр; $A3$ – потенциометр; $A4$ – тепловизор

Для определения рабочей температуры тела излучения инфракрасный излучатель размещали на измерительном стенде, выбирали требуемый режим работы, определяемый величиной питающего напряжения (для электрического излучателя) или количеством газокислородной смеси (для газового излучателя), включали в работу и выдерживали до установившейся температуры. Условия работы могут быть обусловлены наличием или отсутствием отражателя, различной высотой размещения излучателей, их числом и взаимным расположением над рабочей поверхностью.

Измерения цветовой температуры T_c производили с помощью визуального общепромышленного пирометра «Проминь», установленного на штативе. С помощью перемещения окуляра добивались резкой видимости нити в поле зрения. Наводку параметров на резкость производили передвижением объектива. Фотометрирование выполняли, перемещая пирометр на штативе ближе к излучателю, а затем дальше. Показания снимали при уравнивании яркостей изображения объекта с яркостью нити пирометрической лампы. Истинную температуру тела излучателя получали как сумму показаний прибора и поправки в зависимости от спектральной излучательной способности объекта измерения. Измерение цветовой температуры тела нагрева производили при различном питающем напряжении источника инфракрасного излучения.

Длину волны максимального излучения $\lambda_{\text{макс}}$, ее зависимости от питающего напряжения исследовали с помощью пирометра по вышеприведенной методике и рассчитывали по закону Вина (уравнение 2). Зависимость $\lambda_{\text{макс}}$ от напряжения питания $\lambda_{\text{макс}} = f(U)$ находили расчетным путем по значению $T_c = f(U)$. Энергетическую характеристику поля инфракрасного излучения, распределение радиационной температуры на обогреваемой поверхности, величину зоны равномерной плотности излучения исследовали с помощью термостолбика, перемещая его по рабочей поверхности стенда, начиная от центра по взаимно перпендикулярным направлениям, затем по линиям, параллельным осевой линии излучателя на расстоянии 100 мм друг от друга. Визуальное распределение температурных полей на рабочей поверхности исследовали с помощью тепловизора ТВ-03.

Камеру тепловизора направляли на рабочую поверхность и с помощью фотокамеры регистрировали телевизионное изображение объекта. Порядок работы с тепловизором приведен в инструкции по его эксплуатации. Все осуществляли с пятикратной повторностью. Обработку результатов производили по общепринятой методике статистической обработки.

Зависимость изменения потока излучения ИК-излучателя от напряжения питания $\Phi = f(U)$ и расстояния от ИК-излучателя до поверхности нагрева $\Phi = f(h)$ определяли термостолбиком при его расположении в центре рабочей поверхности.

Определение спектральной плотности излучения осуществляли универсальным монохроматором. При повороте призменного столика монохроматора в его окуляр направляются лучи различной длины волны. Выходной окуляр направлен на приемный окуляр фотосопротивления ФСД-Г2, выходные концы которого подсоединены к селективному микровольтметру типа В6 – 9. Перемещая призменный столик вдоль спектра, определяли зависимость показаний милливольтметра от длины волны $U = f(\lambda)$. Затем измеряли интенсивность излучения объекта без монохроматора при $\lambda_{\text{общ}}$. Полученное значение U_{Σ} милливольтметра являлось базовым. Относительное значение интенсивности излучения определяли как $k = U_{\Sigma}/U_{\lambda}$.

Граничные пределы изменения питающего напряжения лампы определяли исходя из пределов работоспособности лампы – от 170 В до 220 В.

Результаты исследований

При выборе спектрального состава источников излучения для термической обработки материала необходимо учитывать соотношение между спектральными характеристиками излучателя и объекта облучения.

При номинальных параметрах температура излучателя в кварцевой галогенной лампе может находиться в пределах 1 650...2 800 К и $\lambda_{\text{макс}} = 1,5...1,03$ мкм, что не соответствует спектру поглощения органических материалов.

На рисунке 2 приведены относительные спектральные характеристики электрического излучателя КГТ-1500.

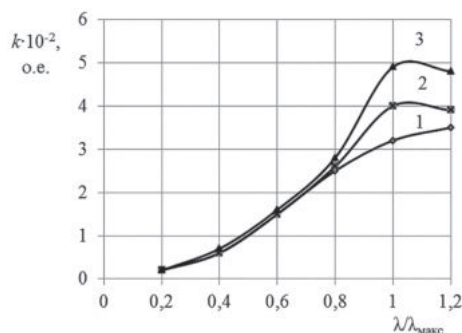


Рисунок 2 – Относительная спектральная зависимость распределения лучистого потока электрического излучателя КГТ-1500 при напряжениях питания: 1 – 170 В; 2 – 200 В; 3 – 220 В

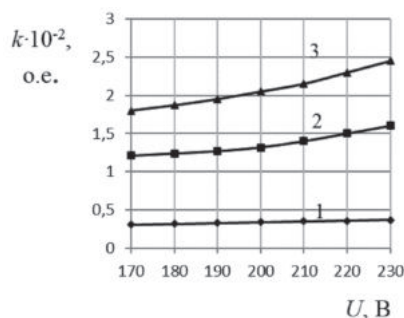


Рисунок 3 – Зависимость изменения относительной интенсивности монохроматического излучения электрического излучателя КГТ-1500 от напряжения питания при длине волны λ : 1 – 0,72 мкм; 2 – 0,56 мкм; 3 – 0,3 мкм

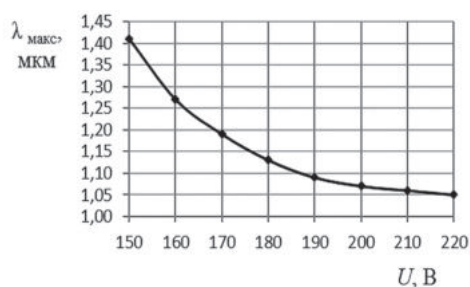


Рисунок 4 – Зависимость длины волны излучения максимальной интенсивности электрического излучателя КГТ-1500 от напряжения питания

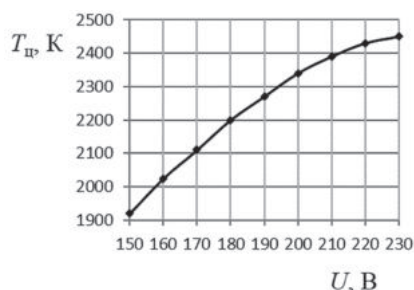


Рисунок 5 – Зависимость цветовой температуры электрического ИК-излучателя КГТ-1500 от напряжения питания

Интенсивность монохроматического излучения зависит в некоторой степени от питающего напряжения (рисунок 3).

Из рисунков 2 и 3 видно, что изменение напряжения несущественно сказывается и на изменении соотношения потоков монохроматического излучения в спектре лампы. К примеру, монохроматическое излучение красного цвета спектра при $\lambda = 0,72$ мкм в пределах изменения напряжения 220...170 В (25 %) изменяется в пределах 3...5 %. Значения изменения более высоких частот спектра еще меньше.

Распределение интенсивностей излучения в спектре неравномерное. Наблюдается центральный максимум, соответствующий циклической частоте колебаний источника излучения. С изменением питающего напряжения в пределах 170...220 В (определяемого обеспечением йодного цикла галогенной лампы) этот максимум смещается в значительных пределах. Положение максимума излучения интегрального потока ИК-излучения (рисунок 4) изменяется пропорционально изменению цветовой температуры (рисунок 5) и в указанных пределах изменения питающего напряжения $\lambda_{\text{макс}}$ увеличивается от 1,03 до 1,36 мкм, $T_{\text{ц}}$ уменьшается на 650 К.

Очевидно, что положение максимума ИК-излучения лампы зависит от температуры излучателя, которая, в свою очередь, определяется значением питающего напряжения и условиями охлаждения лампы в технологической установке. Улучшение охлаждения лампы возможно путем обдува воздухом [4, 5]. Вместе с тем эта мера уменьшит долю отдачи энергии излучением, которая при номинальных условиях составляет 72...86 %, и увеличит конвективную составляющую [10].

При росте питающего напряжения улучшаются, с точки зрения термической обработки материала, спектральные характеристики лампы КГТ-1500 (рисунки 2–5), но ухудшаются энергетические показатели.

Как видно из рисунков 6 и 8, почти в квадратичной зависимости от питающего напряжения изменяется мощность нагревателя, а также энергетическая облученность.

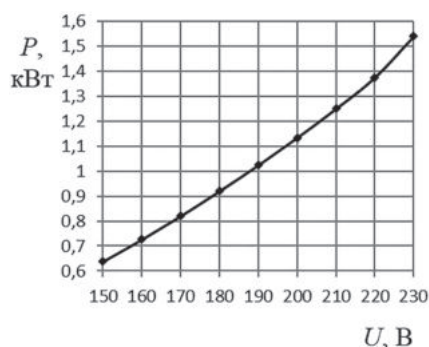


Рисунок 6 – Зависимость мощности электрического ИК-излучателя КГТ–1500 от напряжения питания

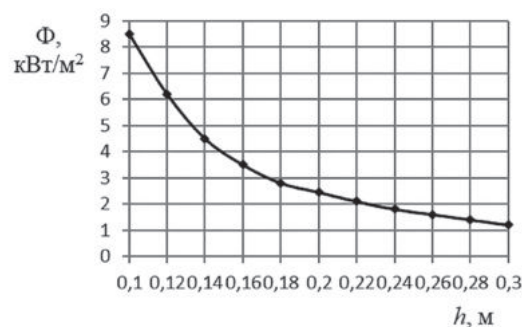


Рисунок 7 – Зависимость удельной облученности поверхности от расстояния до ИК-излучателя КГТ–1500

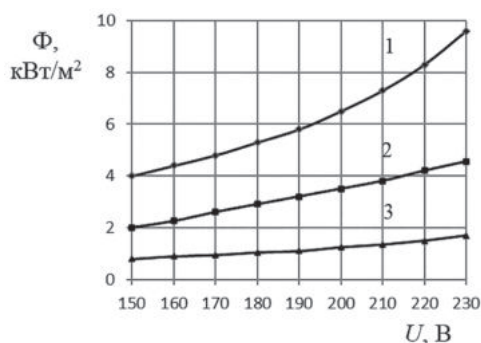


Рисунок 8 – Зависимость удельной облученности поверхности от напряжения питания электрического излучателя КГТ–1500 при расстоянии до источника: 1 – $h = 0,08$; 2 – $h = 0,15$; 3 – $h = 0,25$ м

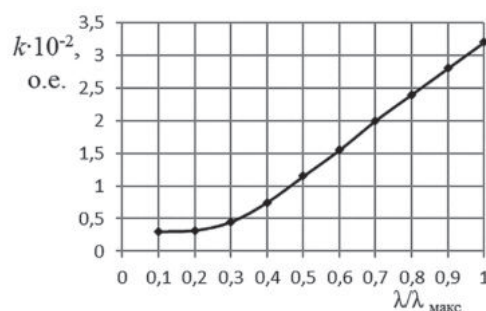


Рисунок 9 – Относительная спектральная зависимость распределения лучистого потока электрического излучателя КГТ–1500 с трубчатым керамическим регенератором

Естественно, при уменьшении напряжения потребуется увеличение количества ламп для создания технологически необходимой мощности установки. В конкретных условиях это не всегда возможно и экономически нецелесообразно, так как потребует применения специальных устройств для преобразования напряжения. Кроме того, уменьшение напряжения питания лампы ограничено минимальной температурой нити накала для обеспечения йодного цикла, и даже при минимальном значении напряжения питания значение частоты максимального излучения не достигает оптимального значения, соответствующего максимуму поглощения зерна (1,8...2,5 мкм).

Исследования показали, что при минимальном значении питающего напряжения лампы КГТ значение λ_{max} не поднимается выше 1,17 мкм.

Энергетическая облученность поверхности при номинальных параметрах источника питания излучателя КГТ–1500 изменяется в зависимости от высоты его расположения над облучаемой поверхностью (рисунок 7).

В технологически реальных пределах изменения высоты подвеса 0,1...0,15 м энергетическая облученность находится в пределах 4...8,5 кВт/м².

На рисунке 9 представлена спектральная характеристика электрического излучателя с лампой КГТ и керамическим цилиндрическим регенератором излучения. Использование последнего позволило эффективно сместить спектр в область ИК-излучения.

Длина волны максимального излучения в данном случае составляет 2,47 мкм, т. е. верхний предел спектра поглощения органических материалов при значительном снижении интенсивности излучения в видимой части спектра (0,3...0,7 мкм). Однако такая конструкция излучателя требует изучения и расчета теплового режима работы лампы.

Результаты исследования спектральных и энергетических характеристик различных газокерамических источников ИК-излучения приведены на рисунках 10 и 11.

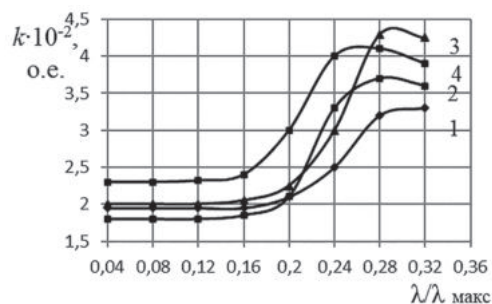


Рисунок 10 – Относительная спектральная зависимость распределения лучистого потока газовых ИК-излучателей: 1 – «Звездочка»; 2 – «Звездочка» экспериментальная; 3 – «ГИИВ-1» экспериментальная; 4 – ГИИМ-12.7

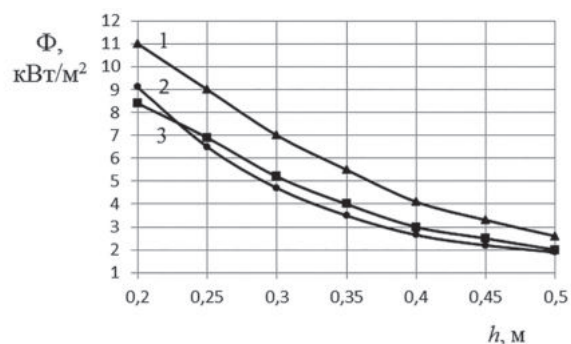


Рисунок 11 – Зависимость удельной облученности от расстояния до газового ИК-излучателя: 1 – «Звездочка»; 2 – «Звездочка» экспериментальная; 3 – «ГИИВ-1» экспериментальная

По условиям опытов спектральные и энергетические характеристики исследовались при сопоставимых параметрах. В частности, подбирались такие режимы, чтобы температура излучающей поверхности была по возможности одинаковой. Так, в опытах для горелок «Звездочка», «Звездочка экспериментальная», «ГИИВ-1 экспериментальная» температура металлической сетки составляла 1231...1273 К, температура керамики – 1293...1363 К.

Для указанных горелок величина $\lambda_{\text{макс.ср}}$ соответственно составляла 2,19; 2,24; 2,24 мкм, для горелки с металлической сеткой ГИИМ-12.7 температура поверхности составляла 1103...1133 К, $\lambda_{\text{макс.ср}} = 2,59$ мкм.

Общий анализ зависимостей (рисунки 10, 11) показывает, что эти характеристики в основном идентичны характеристикам электрического излучателя.

Как видно из относительных спектральных характеристик газокерамических излучателей (рисунок 10), положение максимума интенсивности излучения в основном соответствует $\lambda_{\text{макс}}$, полученному по цветовой температуре по закону Вина. Вместе с тем следует отметить, что в зоне $\lambda_{\text{макс.ср}}$ интенсивность монохроматического излучения неодинакова для различных горелок. Наибольшую интенсивность монохроматического излучения обеспечивает горелка «ГИИВ-1 экспериментальная», затем ГИИМ-12.7, «Звездочка экспериментальная» и «Звездочка».

Энергетические характеристики газовых горелок в зависимости от высоты подвеса приведены на рисунке 11.

Горелки «Звездочка» и «Звездочка экспериментальная» имеют приблизительно идентичные характеристики. Значительно более высокую энергетическую облученность в сопоставимых условиях обеспечивает горелка «ГИИВ-1 экспериментальная». На графике не представлена соответствующая характеристика для горелки ГИИМ-12.7, так как она отличается от газокерамических горелок своими размерами и температурой поверхности. Для указанных выше условий работы горелка ГИИМ-12.7 обеспечивает энергетическую облученность примерно в 2 раза выше, чем газокерамические горелки типа «Звездочка».

Заключение

При напряжении питания 220 В и в естественных условиях (температура воздуха 20 °С, без принудительного обдува) температура нити накала галогенной лампы типа КГТ достигает 3200 К и обеспечивается снижением питающего напряжения до 180 В. При этом смещается $\lambda_{\text{макс}}$ до 1,5 мкм.

Уменьшение питающего напряжения приводит к снижению в квадратичной зависимости мощности лампы и энергетической облученности. С целью повышения КПД лампы, обеспечения длины волны максимума излучения, соответствующего максимуму поглощения зерна, рекомендуется использовать керамический регенератор излучения в виде плоской стенки, что позволяет получить $\lambda_{\text{макс}} = 1,7...2,5$ мкм.

Газокерамические излучатели типа «Звездочка», «Звездочка экспериментальная», «ГИИВ-I экспериментальная» обеспечивают температуру поверхности в пределах 1 233...1 363 К, что соответствует $\lambda_{\text{макс.ср}} = 2,1...2,3$ мкм, а горелка ГИИМ-I обеспечивает $T = 1\,103...1\,133$ К и $\lambda_{\text{макс.ср}} = 2,59$ мкм. Лучшие энергетические показатели характерны для горелки «ГИИВ-I экспериментальная».

Наиболее рациональным для малогабаритных установок термической обработки сельскохозяйственных материалов является использование электрических ИК-излучателей, отличающихся стабильностью характеристик, простотой работы, обслуживания, ремонта и др.

Список использованных источников

1. Безопасность лазерной аппаратуры. Компиляция максимально допустимой экспозиции некогерентного оптического излучения : ГОСТ Р МЭК/ТО 60825-9-2009. – М. : Стандартинформ, 2011. – Ч. 9, 28 с.
2. Степанцов, В. П. Технологическое использование оптического излучения : учеб.-метод. пособие / В. П. Степанцов. – Минск : БГАТУ, 2012. – 208 с.
3. Степанцов, В. П. Светотехника : учеб. пособие / В. П. Степанцов. – Минск : БГАТУ, 2017. – 436 с.
4. Козловская, В. Б. Электрическое освещение : справочник / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сацукевич. – 2-е изд. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 271 с.
5. Теплотехнический справочник : в 2 т. ; под общ. ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. – М. : Энергия, 1976.
6. Справочная книга по светотехнике ; под общ. ред. Ю. Б. Айзенберга. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 528 с.
7. Керамические инфракрасные излучатели. – URL: <https://electro-nagrev.by/keramicheskie-infrakrasnyi> (дата обращения: 10.07.2023).
8. Инфракрасные нагреватели. – URL: <https://www.promnagrev.ru/infrakrasnye-nagrevateli/karbonovye-nagrevateli> (дата обращения: 11.07.2023).
9. Карбоновые нагревательные инфракрасные лампы. – URL: <https://polymernagrev.ru/catalog/trubchatye-ik-izluchateli/karbonovye-lampy> (дата обращения: 11.07.2023).
10. Теплотехника : учебник / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер, С. Г. Нечаев ; под ред. В. Н. Луканина. – 4-е изд., испр. – М. : Высш. шк., 2003. – 671 с.