

УДК 621.384.3:638/635

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

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

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный  
технический университет»  
г. Минск, Республика Беларусь

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.

## **STUDY OF CHARACTERISTICS OF INFRARED EMITTERS**

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

Educational institution "Belarusian State Agrarian Technical University"  
Minsk, Republic of Belarus

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 (ИК) излучения на обрабатываемые материалы определяется длиной волны, энергией фотона, уровнем облученности и продолжительностью процесса.

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. Таким образом, использование ИК-источников приводит к снижению потребления энергии и уменьшению затрат на нагрев по сравнению с традиционными способами.

Эффективность инфракрасного нагрева зависит от выбора излучателей, которые должны удовлетворять следующим основным требованиям:

## Техническое и энергетическое обеспечение производства аграрной продукции

максимальному соответствию длины волны потока излучения, поглотительной способности объекта нагрева; безопасности в пожарном отношении и в обслуживании; простоте и надёжности в работе.

В качестве источников инфракрасных лучей обычно используют электрические и газокерамические излучатели. Низкотемпературными электрическими излучателями являются трубчатые электронагреватели (ТЭНы); среднетемпературными – кварцевые трубки с нихромовой спиралью, спирали на керамических основаниях; высокотемпературными – кварцевые лампы (ИКН, КГТ, КГТО и др.), карбидкремневые, металлические стержневые излучатели из силита, дисилицида молибдена, карборунда с температурой до 1873 К, применяющиеся в промышленных нагревательных печах [1...6].

### **Цель, задачи исследования**

Цель настоящей работы состоит в исследовании электрических, энергетических и спектральных характеристик инфракрасных излучателей различных типов (электрического, газового и газокерамического), 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.

### **Материалы и методы**

Схема электрическая принципиальная измерительного стенда приведена на рисунке 1.

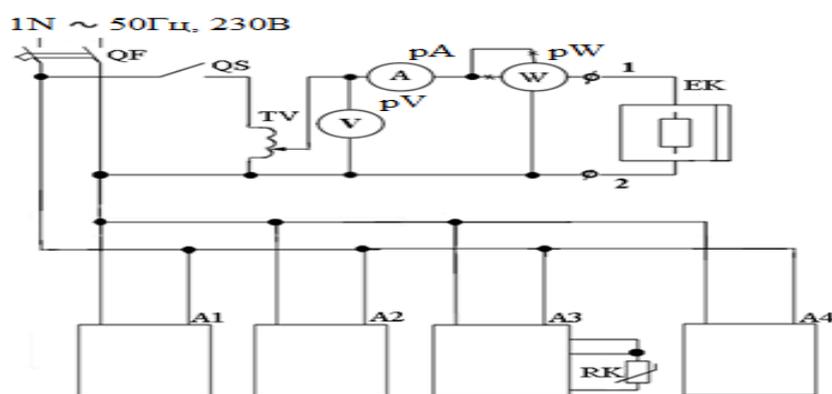


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная измерительного стенда: А1 – универсальный монохроматор; А2 – пирометр; А3 – потенциометр; А4 – тепловизор

Основными энергетическими и электрическими параметрами инфракрасных излучателей являются питающее напряжение, сила тока,

## Техническое и энергетическое обеспечение производства аграрной продукции

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.

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  $T_{ц}$  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 по штативу ближе к излучателю, а затем дальше. Показания снимали при уравнении 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  $\lambda_{\max}$ , её зависимости от питающего напряжения исследовали с помощью пирометра по вышеприведенной методике и рассчитывали по закону Вина (уравнение 2). Зависимость  $\lambda_{\max}$  от напряжения питания  $\lambda_{\max} = f(U)$  находили расчетным путем по значению  $T_{ц} = f(U)$ . 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

## Техническое и энергетическое обеспечение производства аграрной продукции

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 призмного 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 призмный столик вдоль спектра, определяли зависимость показаний милливольтметра от длины волны  $U = f(\alpha)$ . Затем измеряли интенсивность излучения объекта без монохроматора при  $\lambda_{общ}$ . Полученное значение  $U_{\Sigma}$  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

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

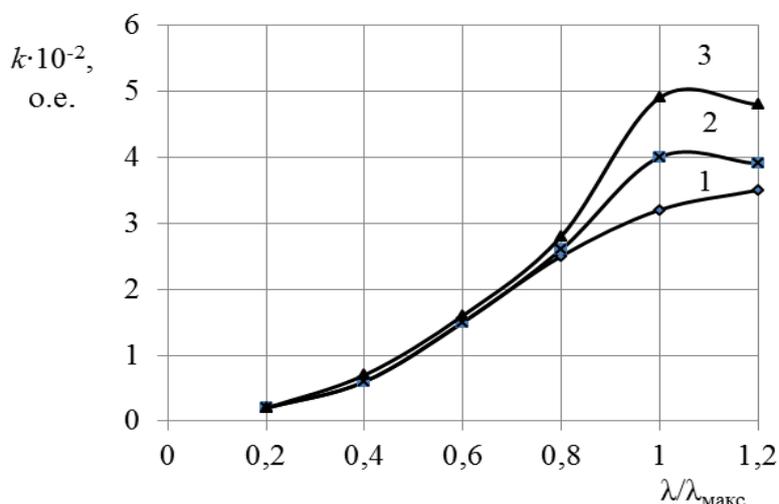


Рисунок 2 – Относительная спектральная зависимость распределения лучистого потока электрического излучателя КГТ–1500 при напряжениях питания: 1 – 170В; 2 – 200В; 3 – 220В

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

**Техническое и энергетическое обеспечение  
производства аграрной продукции**

красного цвета спектра при  $\lambda = 0,72 \text{ мкм}$  в пределах изменения напряжения 220...170 В (25%) изменяется в пределах 3...5%. Значения изменения более высоких частот спектра еще меньше.

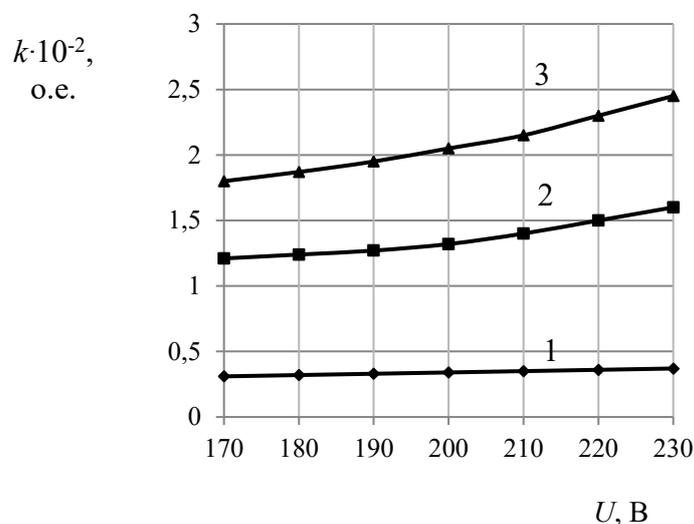


Рисунок 3 – Зависимость изменения относительной интенсивности монохроматического излучения электрического излучателя КГТ–1500 от напряжения питания при длине волны  $\lambda$ : 1 – 0,72 мкм; 2 – 0,56 мкм; 3 – 0,3 мкм

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.

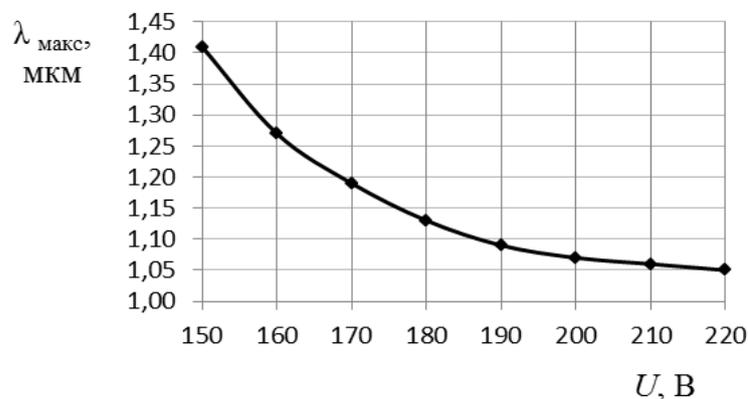


Рисунок 4 – Зависимость длины волны излучения максимальной интенсивности электрического излучателя КГТ–1500 от напряжения питания

## Техническое и энергетическое обеспечение производства аграрной продукции

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 [1, 7]. Вместе с тем, эта мера уменьшит долю отдачи энергии излучением, которая при номинальных условиях составляет 72...86%, и увеличит конвективную составляющую [6].

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.

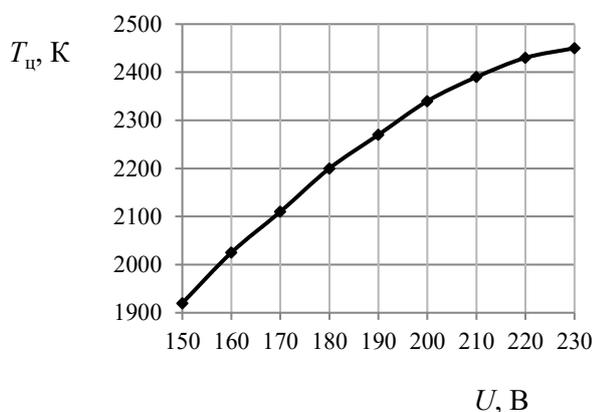


Рисунок 5 – Зависимость цветовой температуры электрического ИК-излучателя КГТ–1500 от напряжения питания

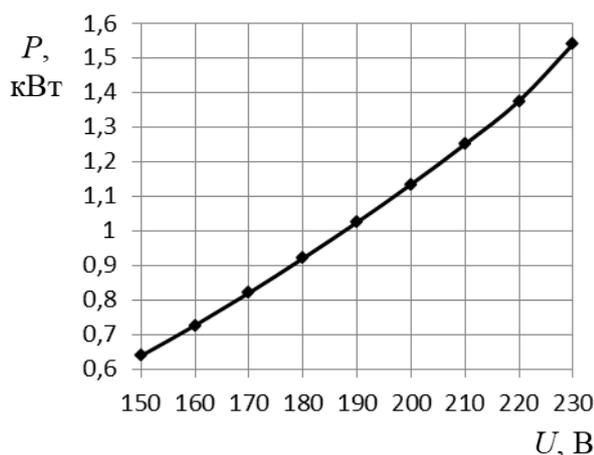


Рисунок 6 – Зависимость мощности электрического ИК-излучателя КГТ–1500 от напряжения питания

Естественно, при уменьшении напряжения потребуются увеличение количества ламп для создания технологически необходимой мощности

**Техническое и энергетическое обеспечение  
производства аграрной продукции**

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  $\lambda_{\text{макс}}$  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, как показано на рисунке 7.

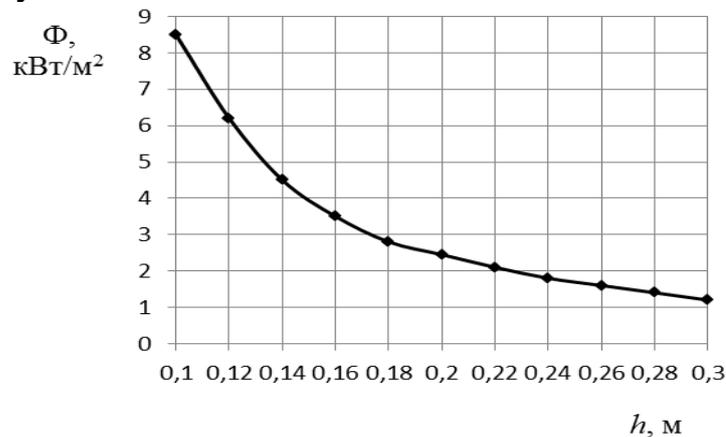


Рисунок 7 – Зависимость удельной облученности поверхности от расстояния до ИК-излучателя КГТ–1500

В технологически реальных пределах изменения высоты подвеса 0,1...0,15 м энергетическая облученность находится в пределах 4...8,5 кВт/м<sup>2</sup>.

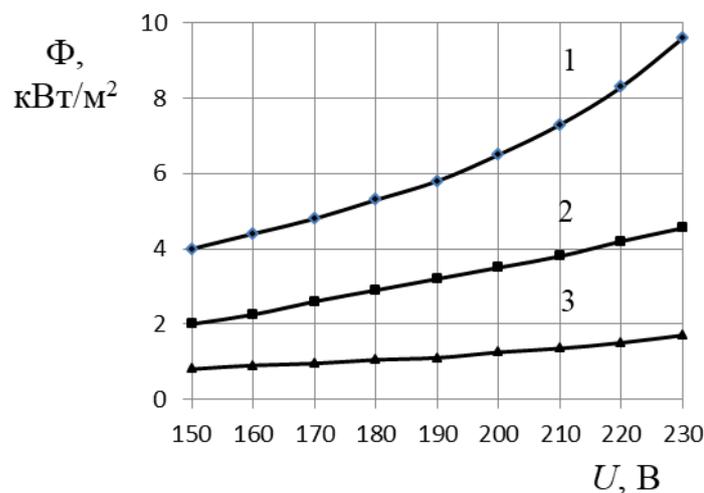


Рисунок 8 – Зависимость удельной облученности поверхности от напряжения питания электрического излучателя КГТ–1500 при расстоянии до источника: 1 –  $h = 0,08$ ; 2 –  $h = 0,15$ ; 3 –  $h = 0,25$  м

## Техническое и энергетическое обеспечение производства аграрной продукции

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

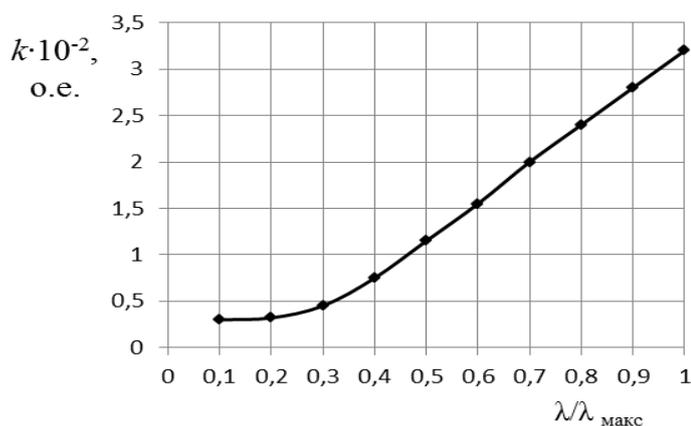


Рисунок 9 – Относительная спектральная зависимость распределения лучистого потока электрического излучателя КГТ–1500 с трубчатым керамическим регенератором

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

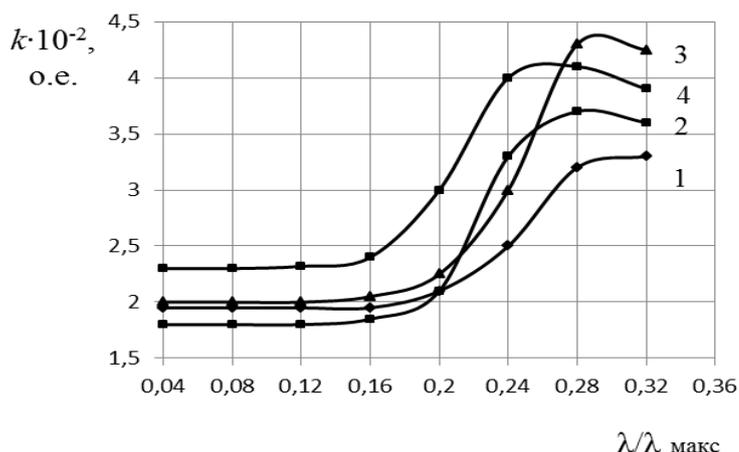


Рисунок 10 – Относительная спектральная зависимость распределения лучистого потока газовых ИК-излучателей: 1 – «Звездочка»; 2 – «Звездочка экспериментальная»; 3 – «ГИИВ-1 экспериментальная»; 4 – ГИИМ-12.7

По условиям опытов спектральные и энергетические характеристики исследовались при сопоставимых параметрах. В частности, подбирались такие режимы, чтобы температура излучающей поверхности была по

## Техническое и энергетическое обеспечение производства аграрной продукции

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 и 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.

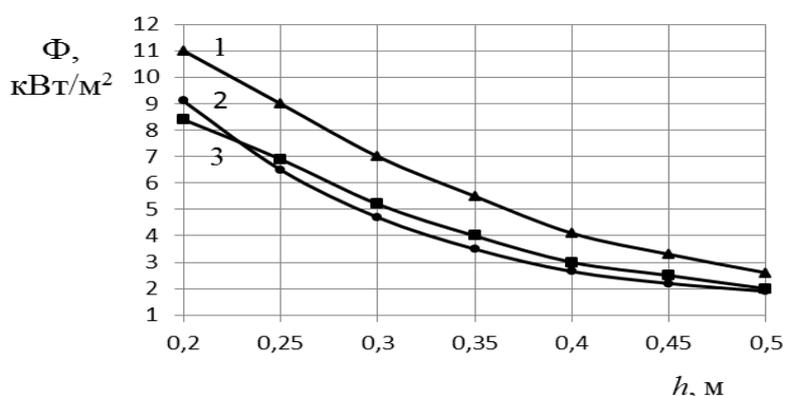


Рисунок 11 – Зависимость удельной облученности от расстояния до газового ИК-излучателя: 1 – «Звездочка», 2 – «Звездочка экспериментальная», 3 – «ГИИВ-1 экспериментальная»

Горелка "Звездочка" и "Звездочка экспериментальная" имеет 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, т.к. 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".

## Техническое и энергетическое обеспечение производства аграрной продукции

### **Выводы**

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-І экспериментальная» обеспечивают температуру поверхности в пределах 1233...1363 К, что соответствует  $\lambda_{\text{макс.ср}} = 2,1...2,3$  мкм, а горелка ГИИМ-І обеспечивает  $T = 1103...1133$  К и  $\lambda_{\text{макс.ср}} = 2,59$  мкм. Лучшие энергетические показатели характерны для горелки «ГИИВ-І экспериментальная».

### **Список литературы**

1. Техническая термодинамика [Текст]: учебник для вузов / В.И. Крутов [и др.]; под ред. В.И. Крутова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1991. – 384 с.: ил. Теплотехнический справочник, т.1, 2. // Под общ. ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева.– Москва: Энергия, 1975 – 1976.
2. Справочная книга по светотехнике. / Под общ. ред. Ю.Б. Айзенберга. – Москва: Энергоатомиздат, 1995. – 528 с.
3. Керамические инфракрасные излучатели. <https://electro-nagrev.by/keramicheskie-infrakrasnyj/> Дата доступа 10.07.2023г.
4. Инфракрасные нагреватели. <https://www.promnagrev.ru/infrakrasnye-nagrevateli/karbonovye-nagrevateli/> Дата доступа 11.07.2023г.
5. Карбоновые нагревательные инфракрасные лампы. <https://polymernagrev.ru/catalog/trubchatye-ik-izluchateli/karbonovye-lampy/> Дата доступа 11.07.2023г.
6. Козловская, В.Б. Электрическое освещение: справочник / В.Б. Козловская, В.Н. Радкевич, В.Н. Сацукевич. – 2-е изд. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 271 с.