

Научная статья

УДК 537.567; 533.9.07; 537.57; 533.9.08

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВЕЩЕСТВ, ОБРАБОТАННЫХ В РЕАКЦИОННОЙ КАМЕРЕ СВЧ-ПЛАЗМАТРОНА**

✉ Самсалиев Анвар Амантаевич.

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,  
г. Бишкек, Кыргызстан

✉ kazas@mail.ru

*Аннотация.* Исследования температурных и спектральных изменений веществ, обработанных в реакционной камере СВЧ-плазматрона, разработанной и запатентованной автором, позволит обоснованно выбирать технологические режимы обработки неметаллических материалов в твердом виде или жидком состоянии. Приведенные данные изменения температуры и спектра от вида веществ в реакционной камере, располагаемых в ней и переходящих в плазменное состояние, расширит познания в области плазменных технологий.

*Ключевые слова:* экологическая безопасность, энергосберегающие технологии, температуры и спектры веществ, обработанных в реакционной камере, СВЧ-плазматрон, спектрометр, плазменное состояние, обработка неметаллических материалов в твердом и жидком состоянии, термообработка

**Для цитирования:** Самсалиев А.А. Исследование температурных и спектральных изменений веществ, обработанных в реакционной камере СВЧ-плазматрона // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 2 (66). С. 197–205.

Scientific article

## **INVESTIGATION OF TEMPERATURE AND SPECTRAL CHANGES OF SUBSTANCES TREATED IN THE REACTION CHAMBER OF A MICROWAVE PLASMATRON**

✉ Samsaliev Anvar A.

Kyrgyz state technical university named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan

✉ kazas@mail.ru

*Abstract.* Studies of temperature and spectral changes of substances processed in the reaction chamber of the microwave plasmatron, developed and patented by the author, will make it possible to reasonably choose the technological modes of processing non-metallic materials in solid or liquid state. The given data of temperature and spectrum changes depending on the type of substances in the reaction chamber, located in it and passing into the plasma state, will expand our knowledge in the field of plasma technologies.

*Keywords:* environmental safety, energy-saving technologies, temperatures and spectra of substances processed in the reaction chamber, microwave plasmatron, spectrometer, plasma state, processing of non-metallic materials in solid and liquid state, heat treatment

**For citation:** Samsaliev A.A. Investigation of temperature and spectral changes of substances treated in the reaction chamber of a microwave plasmatron // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 2 (66). P. 197–205.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023

## Введение

Как известно, во всем мире работают над разработкой комплексной проблемы энергосберегающих технологий с глубокой переработкой природных ресурсов, использующих физические явления, которые открывают новые возможности повышения энергоэффективности [1]. Разработка теоретической и экспериментальной баз и основ для проектирования промышленных массообменных аппаратов нового класса для таких процессов на основе явления СВЧ плазменных устройств создает возможности уменьшения энергопотребления, значительного повышения экологической безопасности и улучшения условий труда [2–4]. Технология микроволновой плазмы (MWP) в последнее время используется в таких областях, как обработка полупроводников и материалов, осаждение алмазных пленок и восстановление отходов для обработки неметаллических веществ в твердой или жидкой среде. Преимущества СВЧ плазменных технологий включают возможность использования источника с высокой плотностью энергии и высоко реактивной средой, малые эксплуатационные затраты, быстрое время отклика на изменения на входе и новые физико-химические эффекты. Эти аспекты делают MWP многообещающей технологией, альтернативной традиционным термическим химическим реакторам, при условии, что будут преодолены определенные технические и эксплуатационные проблемы, связанные с масштабируемостью [5–7].

В предыдущих исследованиях автора приводятся примеры обработки СВЧ плазменным воздействием твердых и жидких веществ в реакционной камере СВЧ-плазматрона. Описаны принципы действия, схемы подачи твердых и жидких веществ в реакционную камеру. Результаты исследований отражены в публикациях [8–11]. Возникла необходимость исследования и измерения температурных и спектральных изменений веществ, обработанных в реакционной камере.

### Методика обработки веществ в реакционной камере СВЧ-плазматрона

В данной статье для измерения физических параметров рассматривается лабораторная СВЧ-установка с резонаторной камерой призматического типа 3 для обжига неметаллических материалов, внутри которой имеется реакционная камера 5, переводящая вещества в плазменное состояние 4 (рис. 1).

Плазменное состояние веществ 4 возбуждается источником СВЧ-волн – магнетроном 1 с частотой излучения 2 450 МГц и удерживается специальной реакционной керамической конусной формой 5 (рис. 1).

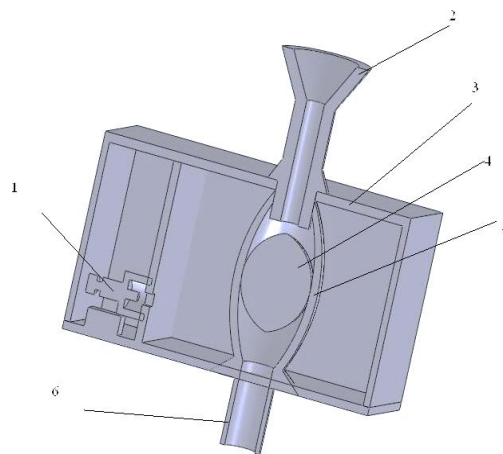


Рис. 1. Конструкция рассматриваемого СВЧ-плазматрона: 1 – магнетрон; 2 – подающая направляющая; 3 – резонаторная камера; 4 – область плазменного состояния веществ; 5 – конусная реакционная камера; 6 – отводящая направляющая

Для исследования температурных изменений различных веществ, помещенных в реакционную камеру, был использован тепловизор FLIR T1020 с диапазоном измерения от 40 до 2 000 °С и чувствительностью 0,02 °С.

### Методика спектрального анализа веществ, обработанных в реакционной камере СВЧ-плазматрона

Для проведения исследований по спектральному анализу веществ, располагаемых в реакционной камере, автором изготовлен спектрометр из подручных материалов. Прежде в конструкциях использовали призмы для разделения луча света на его составляющие и поворотный окуляр для измерения углового отклонения каждой составляющей длины волны. Однако совсем недавно призма была заменена дифракционной решеткой, которая служит той же цели, что и призма, а окуляр заменен массивом электронных фоторецепторов или видеокамерой, подключенным к компьютеру.

Была изготовлена конструкция спектрометра, собранная по следующей схеме (рис. 2). Корпус можно сделать из любого картона. Внутренняя поверхность не должна отражать свет, так как картинка будет засвечена, можно закрасить внутреннюю поверхность черным маркером. Затем скотчем или клеем соединяем части, чтобы получилась коробка.

Для начала устройство следует откалибровать. Надо поставить спектрометр на уровне источника света на расстоянии примерно 15 см. Затем в качестве эталона берем светодиодную лампу (лучше брать люминесцентную лампу, с ней можно более точно откалибровать), на экране можно увидеть его спектр, выделяем область, из которой мы хотим построить график (желтый прямоугольник), и ставим пиковые значения на свои места.

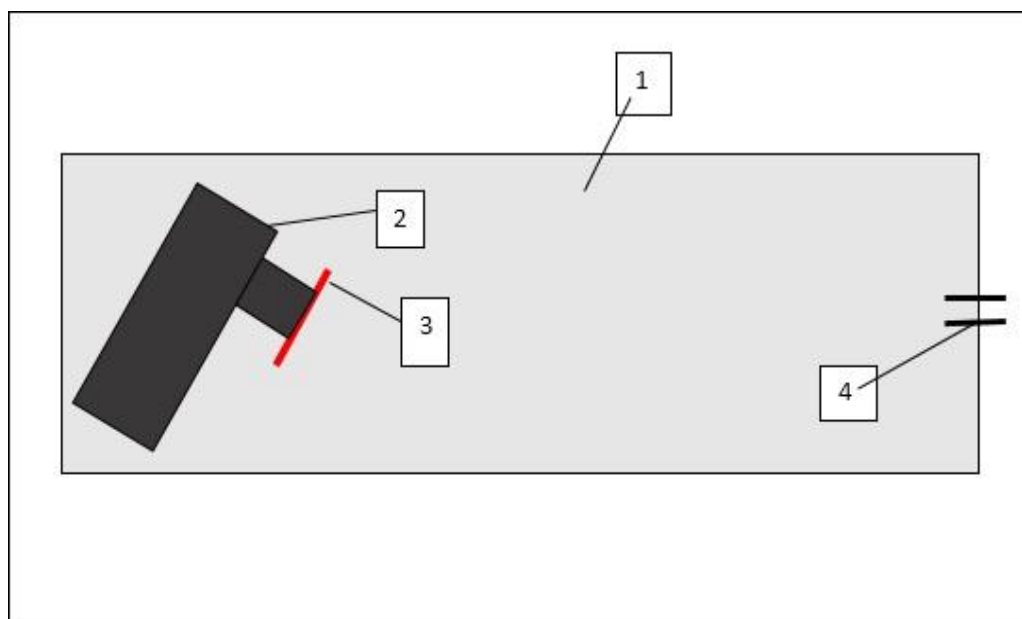


Рис. 2. Схема спектрометра: 1 – корпус спектрометра; 2 – веб-камера;  
3 – дифракционная решетка; 4 – щель

Далее в эксперименте была использована программа Theremino Spectrometer, скачанная с сайта [www.theremino.com](http://www.theremino.com). На рис. 3 приведена настройка приложения Theremino Spectrometer на компьютере.

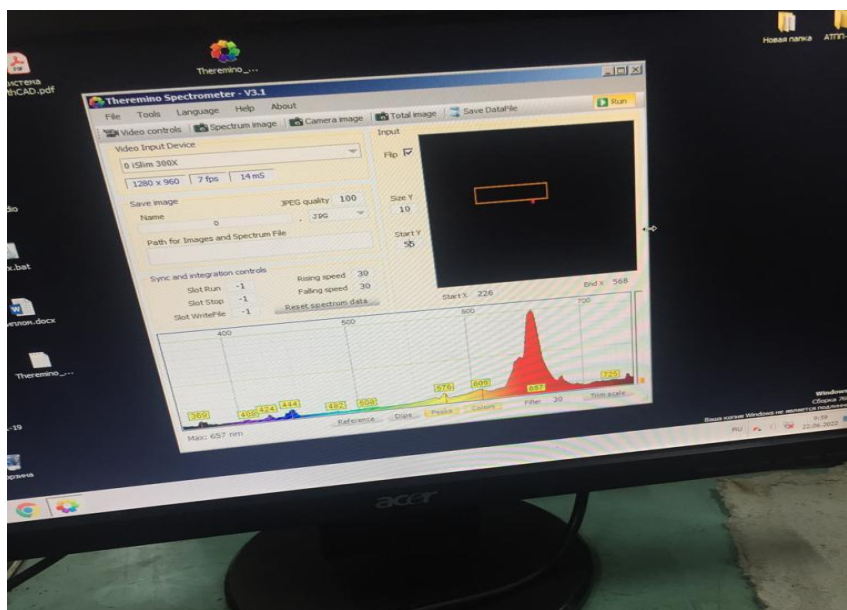


Рис. 3. Настройка приложения Theremino Spectrometer на компьютере

Для эксперимента по спектрометрии веществ в реакционной камере был использован как источник спектра СВЧ-плазmatрон и для фиксации – спектрометр, рассмотренный выше (рис. 4).

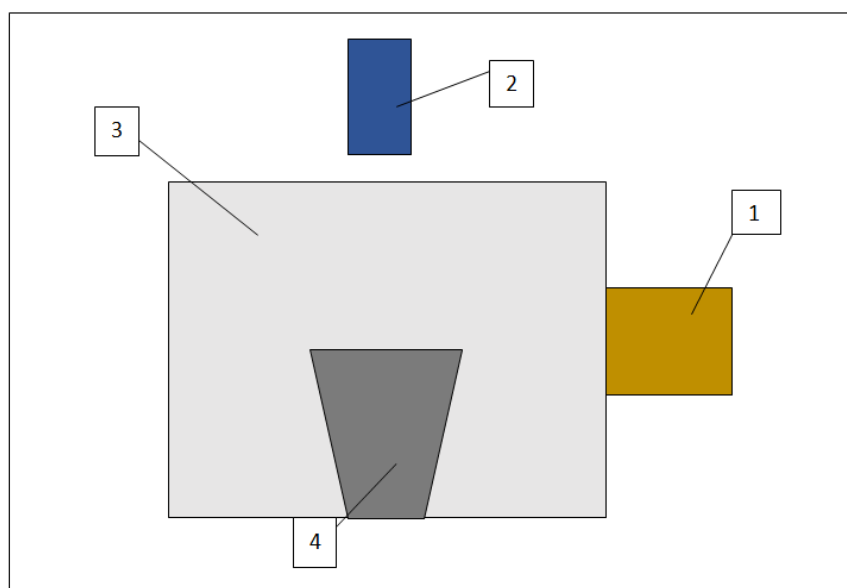


Рис. 4. Схема расположения СВЧ-плазматрона и спектрометра: 1 – магнетрон; 2 – спектрометр; 3 – резонаторная камера; 4 – реакционная камера для нагрева образца

### Результаты исследования температурных изменений веществ, обработанных в реакционной камере СВЧ-плазматрона

Первый эксперимент проведен с древесным углем, с помощью тепловизора измерили температуру внутри реакционной камеры. Как видно из рис. 5, самое высокое значение температуры вблизи ядра составило 887,1 °С.

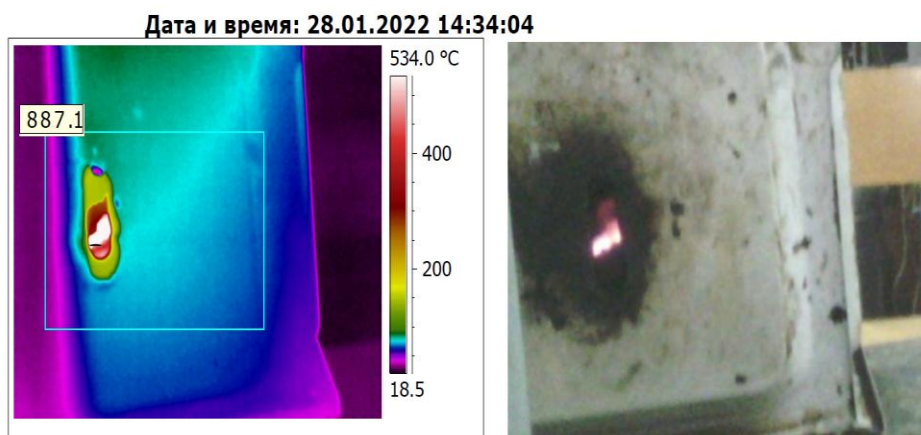


Рис. 5. Исследование температуры древесного угля в реакционной камере СВЧ-плазматрона

Второй эксперимент провели с бурым углем месторождения Кара-Кече, с помощью тепловизора измерили температуру внутри реакционной камеры. Как видно из рис. 6, высокое значение температуры вблизи ядра составило 1 182,4 °С.

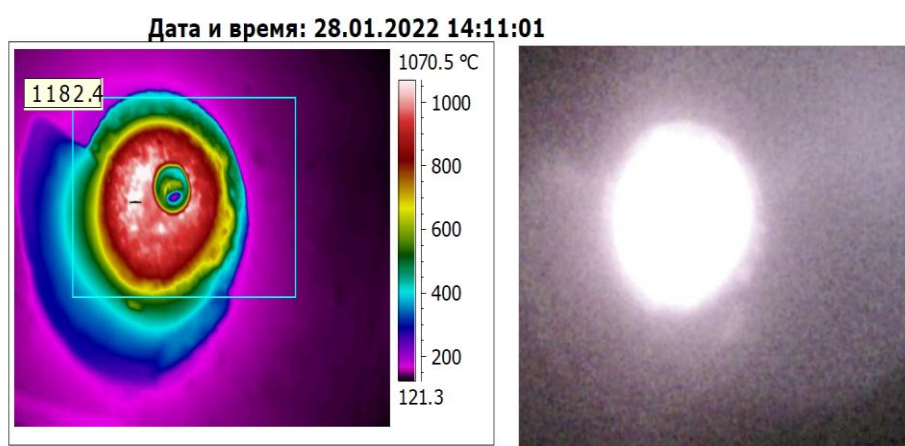


Рис. 6. Исследование температуры бурого угля в реакционной камере СВЧ-плазматрона

Третий эксперимент провели со смесью древесного угля с песком, с помощью тепловизора измерили температуру внутри реакционной камеры. Как видно из рис. 7, высокое значение температуры вблизи ядра составило 1 271,1 °С.

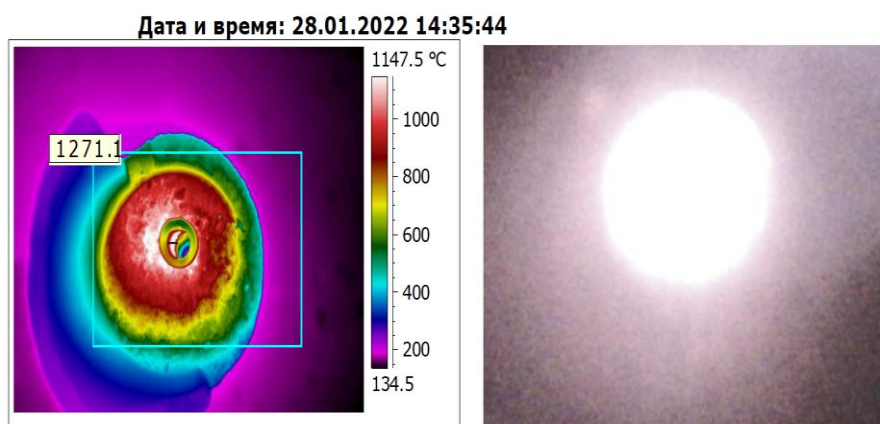


Рис. 7. Исследование температуры смеси древесного угля с песком в реакционной камере СВЧ-плазматрона

## Результаты анализа спектральных характеристик веществ, обработанных в реакционной камере СВЧ-плазматрона

Эксперимент был проведен с древесным углем, с помощью спектрометра зафиксировали спектр света, исходящий от раскаленного древесного угля (рис. 8, 9).

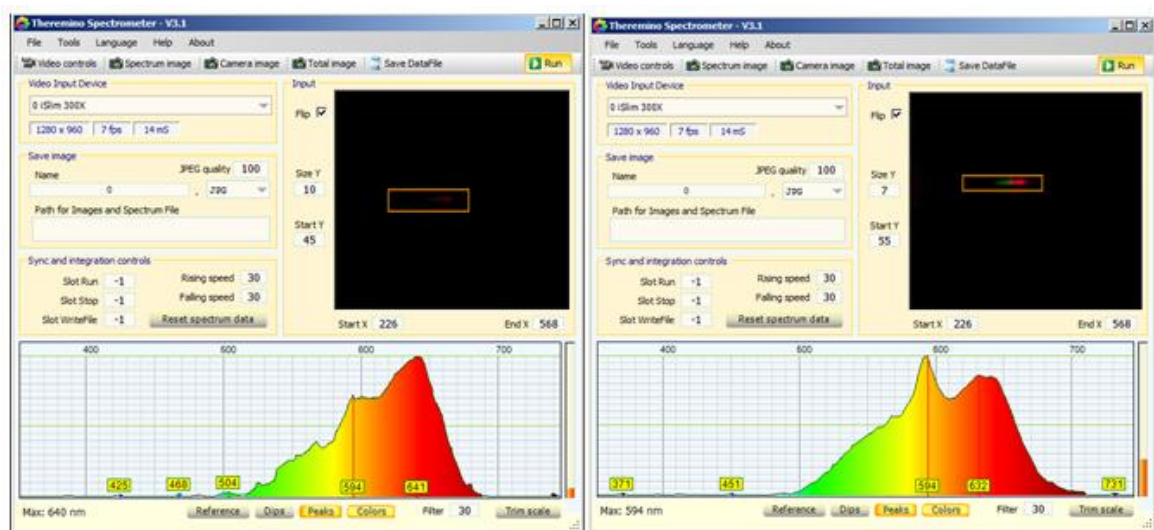


Рис. 8. Спектры излучения угля в начале нагрева

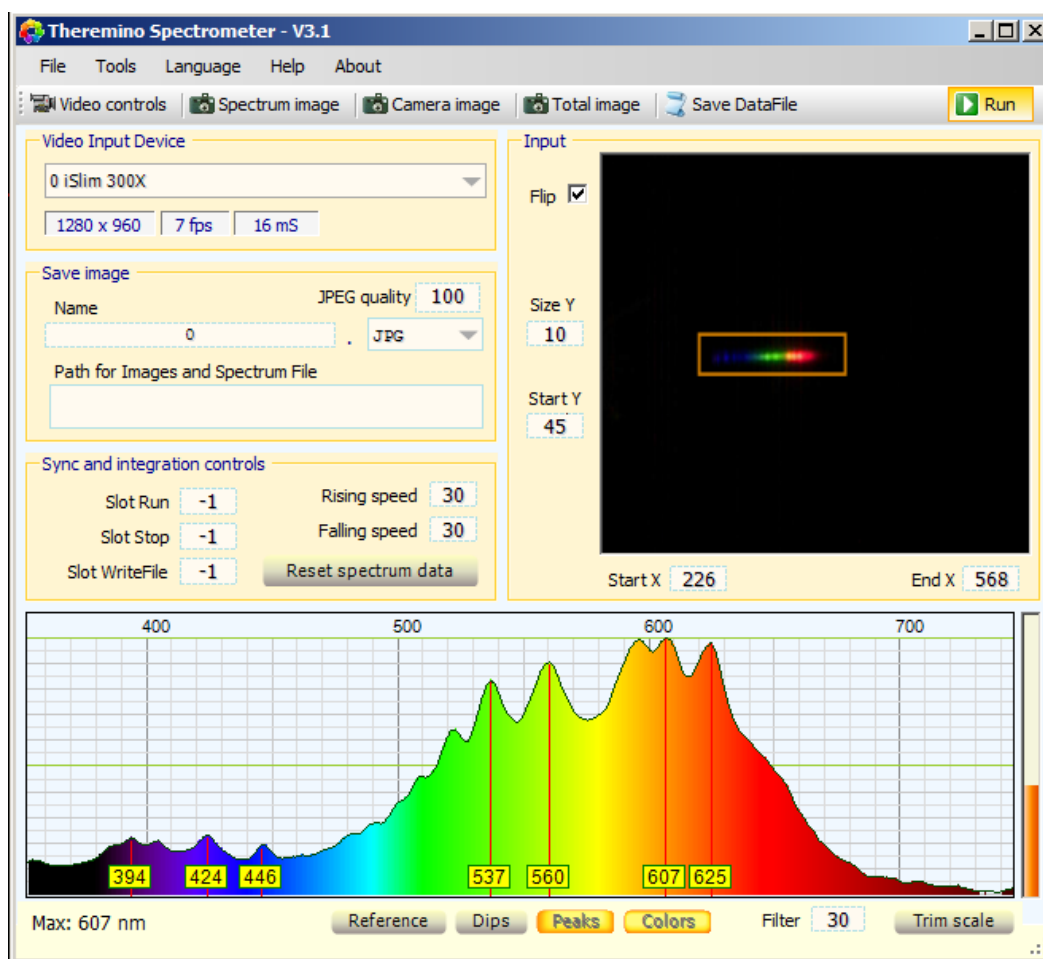


Рис. 9. Спектр излучения древесного угля в раскаленном состоянии  $\approx 900\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рис. 10 можно четко увидеть пики спектра и выявить вещества, исходящие от древесного угля. Точность составляет примерно  $\pm 30$  нм.

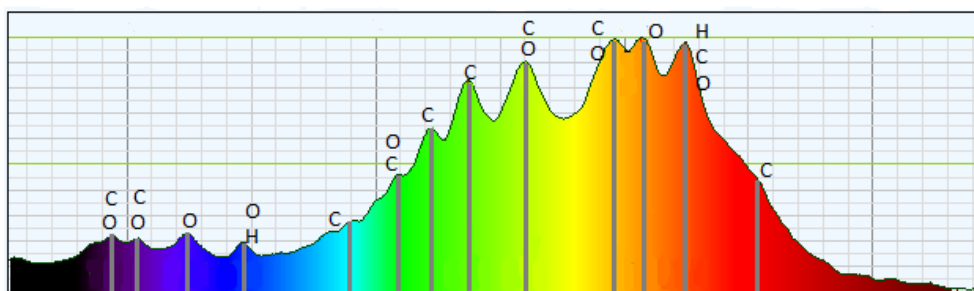


Рис. 10. Спектр излучения древесного угля

Также можно увидеть примерное расположение пиков спектров атомов углерода, водорода и кислорода. Отмечаем, что они здесь присутствуют. Следовательно, при горении древесного угля излучаются и фиксируются характерные сигналы атомов кислорода, водорода, углерода.

### Заключение

Приведенные данные температурных и спектральных изменений веществ, обработанных в реакционной камере, позволят в дальнейшем использовать полученные результаты при проектировании плазмохимических реакторов для обжига неметаллических материалов в сухом твердом виде или для спекания тугоплавких материалов. Знания физических значений изменений веществ в реакционной камере позволят проектировать плазмохимические реакторы для многоступенчатого фракционного разделения жидких веществ.

### Список источников

1. Туманов Ю.Н., Туманов Д.Ю. Плазменные технологии в формировании нового облика промышленного производства в XXI столетии // Новые промышленные технологии. 2006. № 1. С. 14–28.
2. Буров В.Ф., Стрижко Ю.В. СВЧ-плазмотрон со свободно парящим плазмоидом // Горение твердого топлива: сб. докл. VI Всерос. конф. Новосибирск: ИТ СО РАН, 2006.
3. Индуктивно связанная плазма низкого давления – источник ионов для масс-спектрометрии / М.А. Карташева [и др.] // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 13. С. 91–98.
4. Разработка детектора ионов на основе время-проекционной камеры низкого давления для ускорительной масс-спектрометрии / А.Е. Бондарь [и др.] // Ядерная физика. 2021. Т. 84. № 1. С. 67–72.
5. Microwave plasma technology for sustainable energy production and the electromagnetic interaction within the plasma system: A review / A. Zamri [et al.] // Environmental research. 2021. Vol. 197(15):111204. ISSN 0013-9351. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111204.
6. Microwave plasma emerging technologies for chemical processes / Javier F de la Fuente [et al.] // Journal of chemical technology & biotechnology. 2017. Vol. 92. Iss. 10. P. 2495–2505.
7. Brandenburg J.E., Kline J., Sullivan D. The microwave electro-thermal (MET) thruster using water vapor propellant // IEEE transactions on plasma science. 2005. Vol. 33. № 2. P. 776–781.
8. Самсалиев А.А., Кожонов А., Топоркова Ю.И. Исследования по СВЧ-плазменной обработке хвостов пенной флотации // Твердотельные явления. Явления твердого тела. 2020. Vol. 299. С. 1044–1051. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.299.1044.

9. Самсалиев А.А. Устройство и способ плазменного обжига неметаллических материалов. Бишкек: Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2013. № 29. С. 171–173.
10. Самсалиев А.А. Устройство и способ регулирования плазменного воздействия на жидкое состояние веществ. Бишкек: Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2013. № 29. С. 174–177.
11. Самсалиев А.А. Способ и устройство регулирования плазменного воздействия на неметаллические твердые материалы. Бишкек: Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2013. № 2. С. 145–149.

### References

1. Tumanov Yu.N., Tumanov D.Yu. Plazmennye tekhnologii v formirovani novogo oblika promyshlennogo proizvodstva v XXI stoletii // Novye promyshlennye tekhnologii. 2006. № 1. S. 14–28.
2. Burov V.F., Strizhko Yu.V. SVCH-plazmotron so svobodno paryashchim plazmoidom // Gorenje tverdogo topliva: sb. dokl. VI Vseros. konf. Novosibirsk: IT SO RAN, 2006.
3. Induktivno svyazannaya plazma nizkogo davleniya – istochnik ionov dlya mass-spektrometrii / M.A. Kartasheva [i dr.] // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2004. № 13. S. 91–98.
4. Razrabotka detektora ionov na osnove vremya-proekcionnoj kamery nizkogo davleniya dlya uskoritel'noj mass-spektrometrii / A.E. Bondar' [i dr.] // Yadernaya fizika. 2021. T. 84. № 1. S. 67–72.
5. Microwave plasma technology for sustainable energy production and the electromagnetic interaction within the plasma system: A review / A. Zamri [et al.] // Environmental research. 2021. Vol. 197(15):111204. ISSN 0013-9351. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111204.
6. Microwave plasma emerging technologies for chemical processes / Javier F de la Fuente [et al.] // Journal of chemical technology & biotechnology. 2017. Vol. 92. Iss. 10. P. 2495–2505.
7. Brandenburg J.E., Kline J., Sullivan D. The microwave electro-thermal (MET) thruster using water vapor propellant // IEEE transactions on plasma science. 2005. Vol. 33. № 2. P. 776–781.
8. Samsaliev A.A., Kozhonov A., Toporkova Yu.I. Issledovaniya po SVCH-plazmennoj obrabotke hvostov pennoj flotacii // Tverdotel'nye yavleniya. Yavleniya tverdogo tela. 2020. Vol. 299. S. 1044–1051. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.299.1044.
9. Samsaliev A.A. Ustrojstvo i sposob plazmennogo obzhiga nemetallicheskih materialov. Bishkek: Izvestiya KGTU im. I. Razzakova. 2013. № 29. S. 171–173.
10. Samsaliev A.A. Ustrojstvo i sposob regulirovaniya plazmennogo vozdejstviya na zhidkoe sostoyanie veshchestv. Bishkek: Izvestiya KGTU im. I. Razzakova. 2013. № 29. S. 174–177.
11. Samsaliev A.A. Sposob i ustrojstvo regulirovaniya plazmennogo vozdejstviya na nemetallicheskie tverdye materialy. Bishkek: Vestnik KGUSTA im. N. Isanova. 2013. № 2. S. 145–149.



**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 20.02.2023; одобрена после рецензирования: 13.03.2023;  
принята к публикации: 04.04.2023

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 20.02.2023; approved after review: 13.03.2023;  
accepted for publication: 04.04.2023

*Информация об авторах:*

**Самсалиев Анвар Амантаевич**, заведующий кафедрой автоматизации, робототехники и мехатроники Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (720044, Кыргызстан, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, д. 66), кандидат технических наук, доцент, e-mail: kazas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0007-2413>

*Information about the authors:*

**Samsaliev Anvar A.**, head of the department of automation, robotics and mechatronics of the Kyrgyz state technical university named after I. Razzakov (720044, Kyrgyzstan, Bishkek, Ch. Aitmatov ave, 66), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: kazas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0007-2413>