

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПАЛЛАДИЯ И ПЛАТИНЫ В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ПЕРВОГО РОДА

Н.Ю. Косенкова, Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев

АННОТАЦИЯ

Радиационным методом проведено экспериментальное исследование нормальной спектральной излучательной способности ε_λ технических палладия и платины в твердой полированной и жидкой фазах вблизи точек плавления. Измерение ε_λ фиксировалось по полосам пропускания узкополосных фильтров. Получена зависимость ε_λ металлов от длины волны в диапазоне спектра излучения 0,26÷10,6 мкм. Проведен сравнительный анализ с литературными данными других авторов. Дан теоретический расчет ε_λ по классической электромагнитной теории – формула Хагена и Рубенса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

СПЕКТРАЛЬНАЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ, ОБЛАСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ, ПАЛЛАДИЙ, ПЛАТИНА

THE EMISSIVITY OF PALLADIUM AND PLATINUM IN THE REGION OF THE PHASE TRANSITION TEMPERATURE OF THE FIRST KIND

N.Y. Kosenkova, D.V. Kosenkov, V.V. Sagadeev, V.A. Alyaev

ABSTRACT

An experimental study of the normal spectral emissivity of ε_λ technical palladium and platinum in the solid polished and liquid phases near the melting points was carried out by the radiation method. The measurement of ε_λ was recorded by the bandwidth of narrowband filters. The dependence of ε_λ metals on the wavelength in the range of the radiation spectrum of 0.26÷10.6 μm . A comparative analysis with the literary data of other authors is carried out. The theoretical calculation of ε_λ according to the classical electromagnetic theory is given – the formula of Hagen and Rubens.

KEYWORDS

SPECTRAL EMISSIVITY, MELTING POINT REGION, PALLADIUM, PLATINUM

ВВЕДЕНИЕ

Палладий и платина широко применяются как катализаторы в производственных тепловых процессах. Знание теплофизических свойств – излучательной способности в широком волновом диапазоне позволяет производить теплотехнические расчеты лучистого теплообмена [1]. Расчет лучистого теплообмена позволяет интенсифицировать работоспособность и производительность машин и аппаратов различного назначения.

Зависимость излучательной способности металлов в области точки плавления очень интересна с научной точки зрения, поскольку разница между излучательной способностью твердой и жидкой фазах напрямую связано с разницей между электронной структурой твердого тела и состоянием электронного газа – жидкости.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследования проводились радиационным методом на экспериментальной вакуумной установке в диапазоне длин волн от 0,26 до 10,6 мкм (см. табл. 1), представленной в работе [2].

Измерения проводились в атмосфере подготовленного аргона, после предварительного вакуумирования измерительной ячейки. Атмосфера аргона необходима для исключения реакционной способности зеркала жидкого металла, с целью повышения чистоты проведения эксперимента.

В качестве резистивного нагревателя авторами была выбрана танталовая лента, толщиной 2 мм, с углублением в центре. Лента предварительно отжигалась до образования окисной пленки Ta₂O₅ с целью исключения химической реакции жидкого металла с нагревателем.

Методика проведения эксперимента подробно изложена в работе [3].

Оценка погрешности эксперимента, проведенная авторами, составляет от 5 до 8%, в зависимости от температуры.

В исследованиях применялись образцы технических металлов (см. табл. 2).

Таблица 1. Спектральные характеристики узкополосных фильтров

Номер фильтра	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Полоса пропускания фильтра, мкм	0,26	0,42	0,69	0,99	1,63	1,97	4,2	7,3	10,6

Таблица 2. Характеристики исследуемых образцов технических металлов.

Металл	Марка	Химическая чистота, %	T _{пл.} , К
Палладий	ПдА-1	99.95	1828,5
Платина	ПлА-1	99.95	2041,4

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТА С ОБСУЖДЕНИЕМ

Теоретический расчет нормальной спектральной излучательной способности ε_λ рассматриваемых выше металлов выполнен по классической электромагнитной теории (формула Хагена и Рубенса [4]):

$$\varepsilon_\lambda = 0,365(r/\lambda)^{1/2} - 0,0667(r/\lambda) + 0,0091(r/\lambda)^{3/2},$$

где r – удельное сопротивление металла при температуре опыта, λ – длина волны.

В теоретическом расчете ε_λ для каждого металла использовался массив экспериментальных данных по удельному сопротивлению в твердой и жидкой фазах состояния вблизи точки плавления авторов [5, 6].

Результаты проведенного расчета представлены в виде линий на рис. 1 – рис. 4.

Расчет ε_λ по палладию дает хорошее согласование от длины волны, как в твердой так и в жидкой фазах. Расчет ε_λ по платине, как в жидкой так и твердой фазах, показал количественное расхождение по интенсивности излучения с экспериментом и оказался завышенным. Возможная несостоятельность применения классической теории к расчету интенсивности по платине в рассмотренном диапазоне спектра может быть объяснена

физико-химическими свойствами металла с самой высокой плотностью в группе Периодической системы.

Результаты экспериментов, графически представленные на рис.1 - рис.4, являются средними значениями нескольких независимых измерений.

Твердый полированный палладий исследовался при температуре 1812 К (см. рис. 1). Спектральная излучательная способность палладия удовлетворительно сопоставлялась с аналогичными замерами авторов [7, 12 - 14] в спектральном диапазоне от 0,26 до 1,5 мкм.

Жидкая фаза палладия исследовалась при средней температуре эксперимента 1837 К. Сопоставление с исследованиями [13 - 16] показало схожесть поведения ϵ_λ в доверительном коридоре оценки погрешности начиная с 0,26 мкм вплоть до 1,5 мкм (см. рис. 2). Исследования авторов проведены, как и в предыдущих случаях до 10,6 мкм.

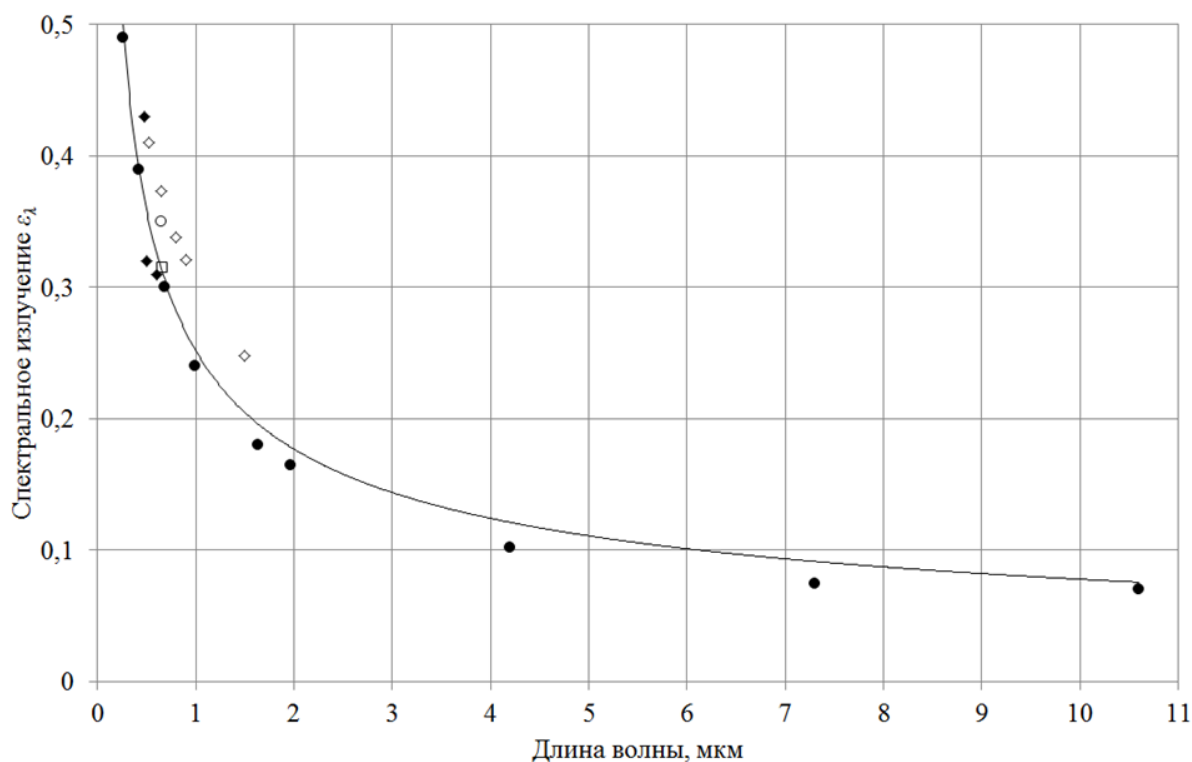


Рис.1 Палладий (твердая фаза): □ - [7]; ◇ - [13]; ○ - [14]; ◆ - [15];
● – наши измерения; линия – теоретический расчет.

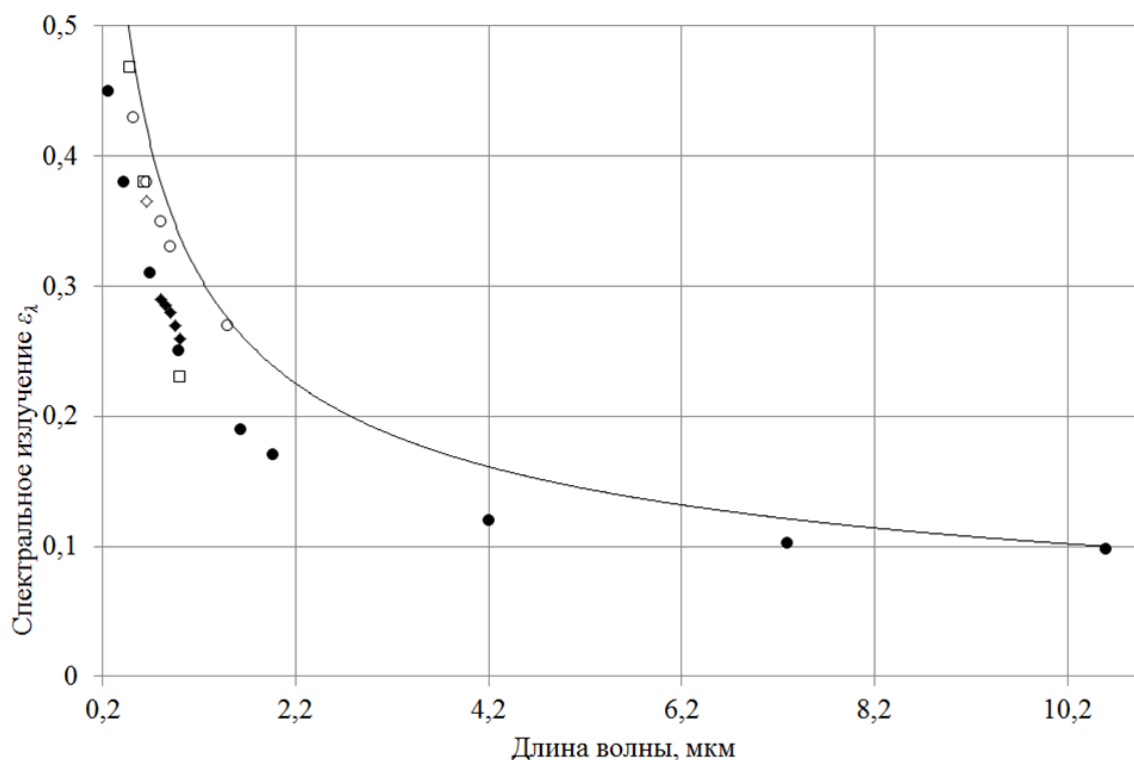


Рис.2 Палладий (жидкая фаза): ◆ - [16]; □ - [15]; ◇ - [14]; ○ - [13];
● - наши измерения; линия - теоретический расчет.

Металлическая платина исследовалась в твердом полированном состоянии в при средней температуре эксперимента 2018 К. Образец платины представлял собой слиток. Интенсивность спектрального излучения твердой платины хорошо сопоставляется с опытными данными по [7, 11, 17] на спектральном участке от 0,26 до 10,6 мкм. Классическое распределение падения интенсивности ϵ_λ от длины волны хорошо иллюстрируется на рис.3.

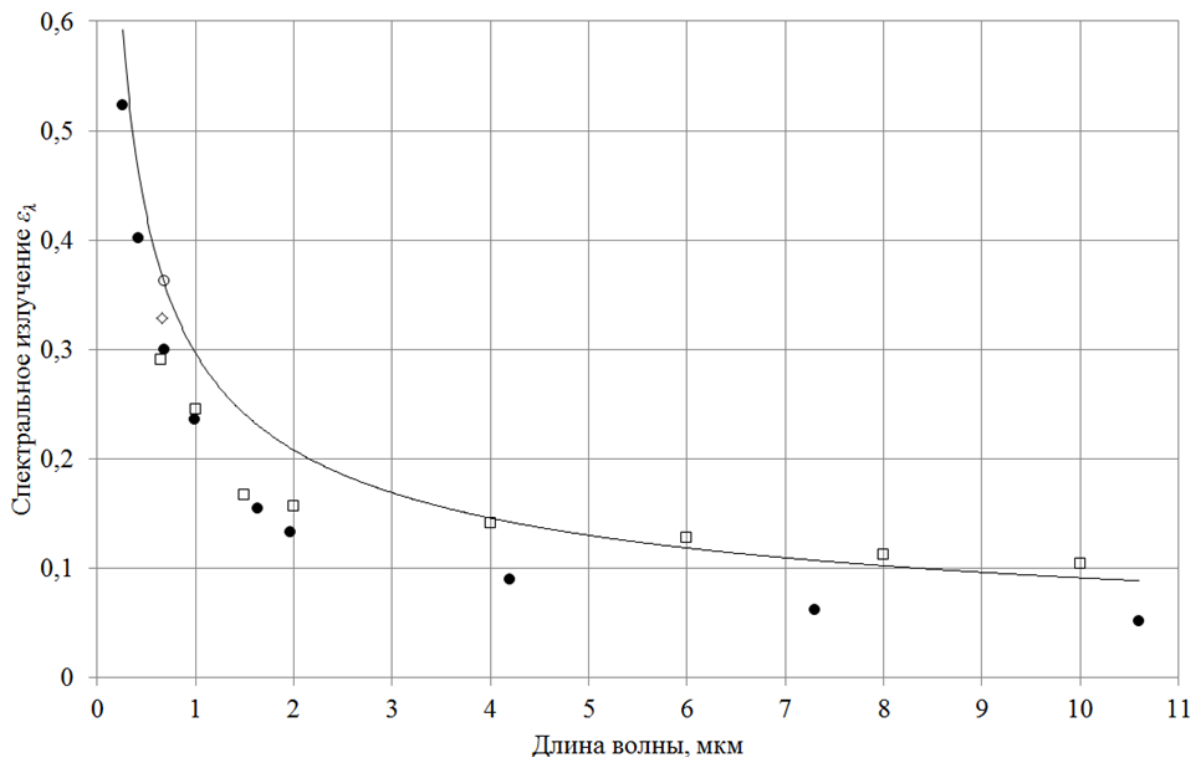


Рис.3 Платина (твердая фаза): □ – [7]; ◇ - [17]; ○ – [11];
● – наши измерения; линия – теоретический расчет.

Жидкое состояние платины исследовалось в области температуры 2053 К. Точечные замеры интенсивности ϵ_{λ} по литературному обзору [13, 15, 17 - 19] показывают экспериментальное сопоставление на участке спектра от 0,26 до 1,5 мкм. Измерение ϵ_{λ} платины авторами проведено до 10,6 мкм.

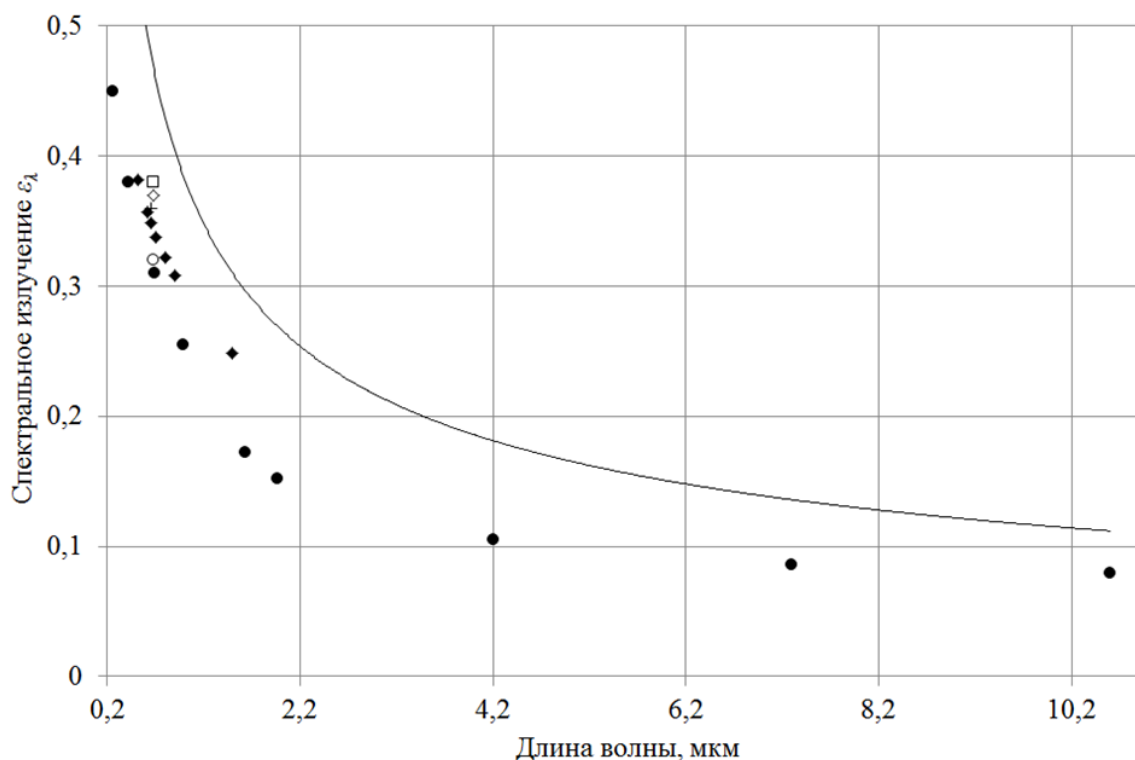


Рис.4 Платина (жидкая фаза): \square – [19]; \diamond – [15]; \circ – [18]; $+$ – [17]; \blacklozenge – [13];
 \bullet – наши измерения; линия – теоретический расчет.

ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное измерение нормальной спектральной излучательной способности палладия и платины в области точки плавления.

Исследование ϵ_λ твердой полированной фазы и фазы жидкого состояния металлов в области точки плавления показало удовлетворительное совпадение с аналогичными исследованиями других авторов.

Поведение ϵ_λ исследованных металлов характерно соответствует ниспадающей зависимости излучения от длины волны в области точки плавления.

Представленный авторами пример теоретического подхода к расчету ϵ_λ ряда переходных металлов X группы Периодической системы в области точки плавления показал удовлетворительную возможность применения классической электромагнитной теории в видимой и дальней инфракрасной области спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Siegel, J.R. Howell. Thermal Radiation Heat Transfer (Taylor& Francis, N.Y., 2002)
2. Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, Изменение нормальной спектральной излучательной способности при плавлении элементов / Журнал технической физики. 2022, т.92, в.3, с.342-347.
3. Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев, Степень черноты ряда металлов VIII группы периодической системы / Теплофизика и аэромеханика. 2021, т.28, в.6, с.951-956.
4. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. 296 с.

5. Chu, T. K., and T. C. Chi (1981), Properties of Selected Ferrous Alloying Elements, III-1, 269 pp., McGraw-Hill, Washington.
6. Arblaster, J.W. (2015). Selected Electrical Resistivity Values for the Platinum Group of Metals Part I: Palladium and Platinum. *Johnson Matthey Technology Review*, 59, 174-181.
7. Y.S. Touloukian, D.P. DeWitt. Thermal Radiative Properties: Metallic Elements and Alloys. Vol. 7, Thermophysical Properties of Matter, ed. by Y.S. Touloukian, C.Y. Ho (IFI/Plenum, NY., 1970).
8. Kaschnitz, E., McClure, J.L. & Cezairliyan, A. Radiance Temperatures (in the Wavelength Range 530 to 1500 nm) of Nickel at Its Melting Point by a Pulse-Heating Technique. *Int J Thermophys* **19**, 1637–1646 (1998). <https://doi.org/10.1007/BF03344915>.
9. Teodorescu, George. (2007). Radiative emissivity of metals and oxidized metals at high temperature.
10. Boboridis, Konstantinos & Seifert, A. & Obst, A. & Basak, Debasis. (2007). Radiance Temperature and Normal Spectral Emittance (in the Wavelength Range of 1.5 to 5 μm) of Nickel at its Melting Point by a Pulse-Heating Technique. *International Journal of Thermophysics*. 28. 683-696. [10.1007/s10765-007-0150-x](https://doi.org/10.1007/s10765-007-0150-x).
11. Cagran, Claus P., Christian Brunner, Achim Seifert and Gernot Pottlacher. “Liquid-phase behaviour of normal spectral emissivity at 684.5 nm of some selected metals.” *High Temperatures-high Pressures* 34 (2002): 669-679.
12. Kaschnitz, Erhard & McClure, J. & Cezairliyan, A.. (2014). Radiance Temperatures (in the Wavelength Range 530 to 1500 nm) of Nickel at Its Melting Point by a Pulse-Heating Technique. *International Journal of Thermophysics*. 19. 1637-1646. [10.1007/BF03344915](https://doi.org/10.1007/BF03344915).
13. McClure, J. L., Ared Cezairliyan and Erhard Kaschnitz. “Radiance Temperatures (in the Wavelength Range 527 to 1500 nm) of Palladium and Platinum at Their Melting Points by a Pulse-Heating Technique.” *International Journal of Thermophysics* 20 (1999): 1149-1161.
14. Cagran, Claus & Pottlacher, G.. (2006). Thermophysical Properties of Palladium. *Platinum Metals Review*. 50. 144-149. [10.1595/147106706X129079](https://doi.org/10.1595/147106706X129079).
15. Krishnan, Shankar, G. P. R. Hansen, Robert H. Hauge and John L. Margrave. “Spectral emissivities and optical constants of electromagnetically levitated liquid metals as functions of temperature and wavelength.” (1990).
16. Watanabe, Manabu & Adachi, Masayoshi & Fukuyama, Hiroyuki. (2020). Heat capacities and thermal conductivities of palladium and titanium melts and correlation between thermal diffusivity and density of states for transition metals in a liquid state. *Journal of Molecular Liquids*. [10.1016/j.molliq.2020.115138](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115138).
17. Wilthan, B., Cagran, C.P., Brunner, C., & Pottlacher, G. (2004). Thermophysical properties of solid and liquid platinum. *Thermochimica Acta*, 415, 47-54.
18. F. Righini, A. Rosso, *High Temp. High Press.* 12 (1980) 335–349.
19. T. Baykara, R.H. Hauge, N. Norem, P. Lee, J.L. Margrave, *High Temp. Sci.* 32 (1991) 113–154.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Косенков Дмитрий Валерьевич – старший преподаватель (ORCID: 0009-0005-2900-1343). Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Республика Татарстан e-mail: dmi-kosenkov@yandex.ru

Косенкова Наталья Юрьевна – магистр. Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Республика Татарстан

Сагадеев Владимир Владимирович – кандидат технических наук, доцент. Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Республика Татарстан e-mail: v.sagadeev@mail.ru

Аляев Валерий Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Республика Татарстан