

УДК 538.953

## **Степень черноты ряда металлов VIII группы периодической системы**

**Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев**

*Казанский национальный исследовательский технологический университет*

E-mail: dmi-kosenkov@yandex.ru, v.sagadeev@mail.ru

В статье представлены экспериментально полученные температурные зависимости степеней черноты металлов VIII группы таблицы Менделеева: кобальта, никеля, палладия и платины.

**Ключевые слова:** излучательная способность, экспериментальная установка, степень черноты металлов, температурный диапазон в твердом и жидком состоянии вещества.

Тепловые расчеты режимов работы высокотемпературных машин и установок требуют знания излучательной способности применяемых материалов и сплавов в широком диапазоне температур, включая фазовый переход твердое тело–жидкость. Теоретические методы расчета не дают надежных данных по степеням черноты. Единственным способом определения указанного показателя является эксперимент. В предлагаемой статье рассматривается экспериментальная установка по определению степеней черноты металлов в твердой и жидкой фазах.

В исследованиях использовались химически чистые металлы с долей основного элемента не менее 99,9 % по ГОСТу. Оценка погрешности эксперимента авторами статьи была проведена по существующей методике ГОСТ Р 8.736-2011 и состояла из оценки систематической и случайной ошибок. Погрешность эксперимента составляет от 5 до 8 % в зависимости от температуры опыта.

Установка состоит из экспериментальной ячейки, комплекса цифровой фиксации тепловых потоков, вакуумной установки, системы подготовки и подачи инертных газов, электротрансформаторов и стабилизаторов напряжения (см. рис. 1). Экспериментальная ячейка представляет собой вакууммируемый объем с резистивным нагревателем током промышленной частоты — танталовой или молибденовой лентой. Лента позволяла нагревать исследуемый металл до температуры жидкого состояния. Регистрация тепловых потоков с поверхности зеркала расплавленного металла осуществлялась радиометром прямого видения с приемником излучения в виде термоэлемента промышленного пирометра во всем диапазоне длин волн спектральной чувствительности термостолбика с платиновой чернью. В конструкции ячейки предусмотрена возможность перекрытия «зрачка» радиометра между экспериментами. Температура металла и модели абсолютно черного тела контролировалась образцовой вольфрам-рениевой термопарой.

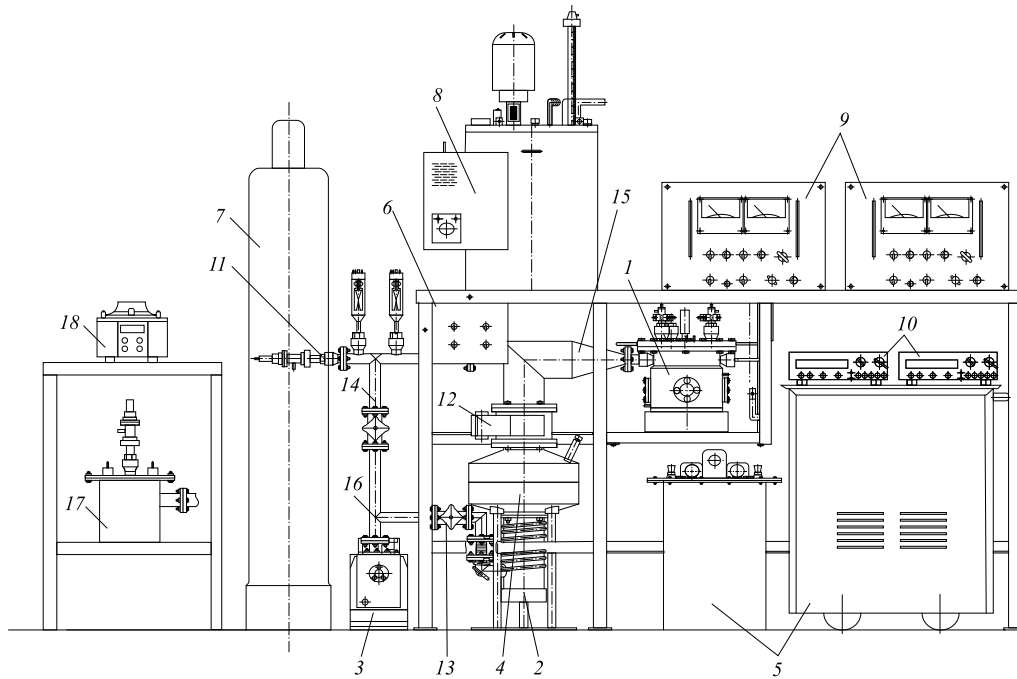


Рис. 1. Экспериментальная установка.

- 1 — измерительная ячейка с водяной рубашкой, 2 — насос диффузионный, 3 — насос механический, 4 — ловушка, 5 — трансформаторы, 6 — пульты управления, 7 — баллон с инертным газом, 8 — термостат, 9 — вакуумметры, 10 — вольтметры, 11 — натекатели, 12 — затвор, 13 — клапаны, 14 — патрубок, 15 — колено, 16 — трубопроводы, 17 — промежуточный объем подготовки газа, 18 — лабораторный автотрансформатор.

В экспериментах также применялся инертный газ — аргон, который из баллона подавался в фильтры и проходил очистку от возможных механических включений, влаги и масла. Фильтры заполнялись силикагелем и цеолитом с разделительными прокладками из фетра. В ходе работы они периодически заменялись. Далее газ попадал в промежуточный объем, где располагалась раскаленная вольфрамовая спираль, нагреваемая через водоохлаждаемые токовводы от лабораторного автотрансформатора. Степень нагрева спирали контролировалась по подаваемому на нее току через амперметр. Возможные двух- или многоатомные примеси в инертном газе при длительной выдержке в промежуточном объеме связывались в результате химической реакции на поверхности спирали. Таким способом значительно снижалась вероятность попадания примесей инертного газа в рабочую камеру и последующего возможного окисления зеркала твердого или жидкого металла. Давление газа в ячейке при градуировке и основных измерениях поддерживалось одинаковым и постоянным. При повышении давления в связи с увеличением температуры исследуемого металла избыток газа дросселировался в атмосферу.

Градуировка радиометра осуществлялась по созданной модели абсолютно черного тела со степенью черноты не ниже 0,99. Работоспособность и достоверность модернизированной установки подтверждена сравнением экспериментальных результатов по предыдущему исследованию кобальта [1, 2].

Уравнения расчета теплообмена излучением между термоэлементом и моделью черного тела (АЧТ) или исследуемым металлическим расплавом взяты из работы [1] и имеют вид

$$C_0 \varepsilon_0 \left( \frac{T_{\text{АЧТ}}}{100} \right)^4 - C_0 \left( \frac{T_p}{100} \right)^4 + (1 - a_n) C_0 \left( \frac{T_p}{100} \right)^4 = K \alpha_0, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  — степень черноты модели АЧТ,  $a_n$  — нормальная интегральная поглощательная способность радиометра,  $T_{\text{АЧТ}}$  — температура модели АЧТ, К;  $T_p$  — температура радиометра, К;  $C_0$  — коэффициент излучения АЧТ, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\alpha_0$  — ЭДС, развиваемая термоэлементом радиометра при первом (градировочном) измерении, В;  $K$  — коэффициент пропорциональности для радиометра, Вт/(м<sup>2</sup>В).

$$C_0 \varepsilon_n \left( \frac{T_{\text{расплава}}}{100} \right)^4 - C_0 \left( \frac{T_p}{100} \right)^4 + (1 - a_n) C_0 \left( \frac{T_p}{100} \right)^4 = K \alpha, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_n$  — нормальная интегральная степень черноты расплава,  $T_{\text{расплава}}$  — температура расплава, К;  $C_0$  — коэффициент излучения расплава, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\alpha$  — ЭДС, развиваемая термоэлементом радиометра при втором измерении, В;  $K$  — коэффициент пропорциональности для радиометра, Вт/(м<sup>2</sup>В).

Из совместного решения этих уравнений (деления (2) на (1)) найдено:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 \frac{a}{a_0} \left( \frac{1 - \frac{a_n}{\varepsilon_0} \left( \frac{T_p}{T_{\text{АЧТ}}} \right)^4}{1 - \frac{a_n}{\varepsilon_n} \left( \frac{T_p}{T_{\text{расплава}}} \right)^4} \right). \quad (3)$$

При записи уравнений (1) и (2) степень черноты и поглощательная способность радиометра принимались равными единице.

Имеющиеся данные по степеням черноты кобальта немногочисленны. По мнению авторов монографии [2], более надежные данные по полусферическим интегральным тепловым потокам кобальта в твердой фазе представлены в справочнике [1]. Результаты, полученные авторами настоящей работы в твердой фазе, удовлетворительно согласуются с данными, приведенными в [1], до температуры 1000 К и ниже их на 20 % при 1300 К (рис. 2). При переходе  $\alpha$ -Со и  $\beta$ -Со при температуре Кюри степень черноты кобальта аномально несколько уменьшается [3], также достаточно резкие аномалии изменения

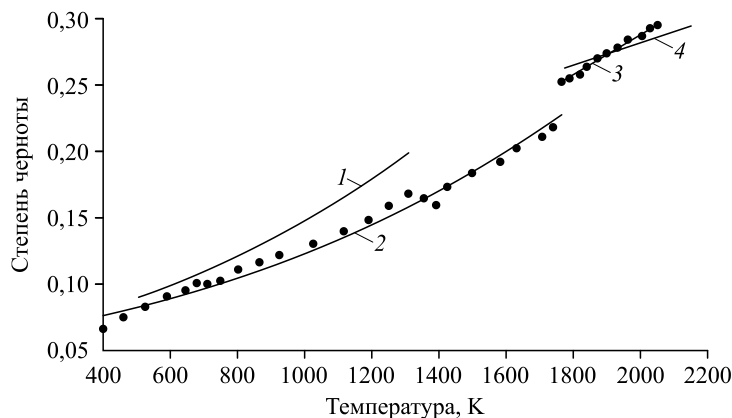


Рис. 2. Зависимость степени черноты кобальта от температуры в твердой и жидкой фазах при ( $T_{\text{плавления}} = 1765$  К).

Данные работ [1] (1), [2] (2, 3), [4] (4)

и результаты настоящих измерений (символы) в атмосфере аргона.

Таблица 1

Значения излучательной способности кобальта

$T, K$	$\epsilon_n$	$T, K$	$\epsilon_n$	$T, K$	$\epsilon_n$	$T, K$	$\epsilon_n$
400	0,066	866	0,115	1425	0,174	1842	0,264
457	0,074	924	0,121	1494	0,184	1878	0,271
524	0,081	1027	0,130	1583	0,192	1900	0,275
587	0,090	1116	0,139	1630	0,203	1935	0,279
643	0,095	1190	0,148	1710	0,211	1967	0,285
678	0,100	1250	0,159	1740	0,218	2007	0,288
708	0,100	1309	0,167	1780	0,253	2030	0,294
749	0,102	1354	0,165	1789	0,256	2049	0,296
800	0,110	1390	0,160	1824	0,259	–	–

температурного коэффициента, сопровождаемые скачками параметра, представлены в работе [4]. Однако эти изменения свойств малы по сравнению с изменениями в процессе плавления. Если измерения проводятся с большим шагом по температуре, то их обычно невозможно уловить. Скачок степени черноты при плавлении кобальта составляет порядка 15 %. В жидкой фазе наблюдается уверенный рост степени черноты с увеличением температуры в эксперименте. В табл. 1 представлены полученные авторами численные значения степеней черноты кобальта в зависимости от температуры. Разницу между экспериментальными величинами степени черноты кобальта в жидкой и твердой фазах и результатами исследований других авторов можно объяснить химической чистотой металлов и различием применяемых методик исследования.

Для никеля (рис. 3) наблюдается характерное для металлов монотонное увеличение степени черноты с броском излучения на температуре плавления элемента.

Полученные авторами степени черноты согласуются с литературными данными [1, 5] и позволяют проанализировать температурное поведение металла в исследуемом диапазоне, включая фазовый переход твердое тело – жидкость до предельных температур экспериментальной установки. Незначительные отклонения значений степени черноты никеля в твердой фазе от данных работ [1, 5] объясняются существующей погрешностью проведения эксперимента. Сравнение полученных данных в жидкой фазе с результатами исследования [6] показывает согласованность экспериментальных величин.

В табл. 2 представлены численные значения степеней черноты никеля, полученные в настоящей работе, в зависимости от температуры.

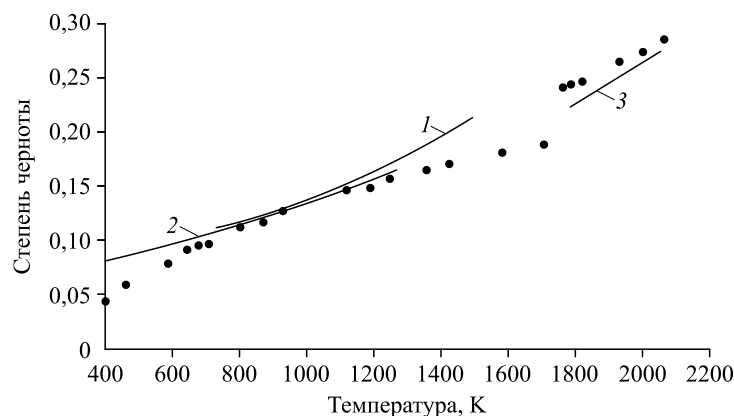


Рис. 3. Зависимость степени черноты никеля от температуры в твердой и жидкой фазах ( $T_{\text{плавления}} = 1726 K$ ).

Данные работ [1] (1), [5] (2), [6] (3) и результаты настоящих измерений (символы) в атмосфере аргона.

Таблица 2

## Значения излучательной способности никеля

$T, K$	$\varepsilon_n$	$T, K$	$\varepsilon_n$	$T, K$	$\varepsilon_n$	$T, K$	$\varepsilon_n$
402	0,062	800	0,104	1357	0,162	1825	0,246
460	0,071	868	0,109	1427	0,165	1935	0,265
586	0,085	927	0,117	1585	0,183	2007	0,274
643	0,090	1119	0,138	1712	0,201	2067	0,285
676	0,095	1190	0,140	1766	0,240	–	–
708	0,095	1248	0,151	1789	0,243	–	–

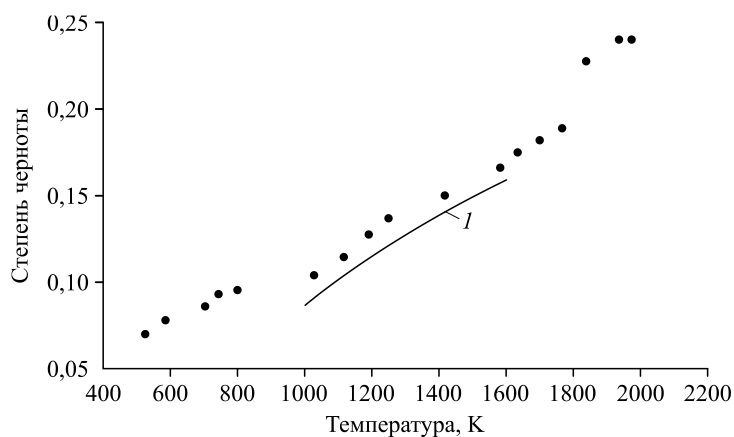


Рис. 4. Зависимость степени черноты палладия от температуры в твердой и жидкой фазах ( $T_{\text{плавления}} = 1825 \text{ К}$ ).

Данные работы [1] (1), и результаты настоящих измерений (символы) в атмосфере аргона.

При изучении палладия (рис. 4) авторами впервые получены степени черноты металла, включая переход твердое тело – жидкость и жидкую фазу металла вплоть до предельных экспериментальных температур. Полученные экспериментальные данные показывают хорошее согласование по твердой полированной фазе с данными справочника [1]. Измерения показали, что степень черноты возрастает с уверенным скачком на 13–14 % при разрушении кристаллической решетки металла и продолжает рост с увеличением температуры эксперимента. В табл. 3 представлены численные значения степеней черноты палладия в зависимости от температуры.

Степень черноты платины (рис. 5) исследовалась до предельных значений экспериментальной установки. Поведение излучательной способности платины ярко выражено в металлических свойствах теплового излучения. Скачок степени черноты оценен авторами в 12–13 %, что характерно для металлов VIII группы периодической системы. Приведенные в работах [1, 7] данные также характерно описывают монотонное увеличение излучения с ростом температуры, но имеют повышенные значения степеней черноты, что можно объяснить как химической чистотой исследуемого металла, так и качеством

Таблица 3

## Значения излучательной способности палладия

$T, K$	$\varepsilon_n$	$T, K$	$\varepsilon_n$	$T, K$	$\varepsilon_n$	$T, K$	$\varepsilon_n$
525	0,068	1027	0,111	1585	0,165	1936	0,239
588	0,077	1118	0,120	1633	0,174	1970	0,240
707	0,086	1192	0,127	1700	0,182	–	–
748	0,087	1251	0,136	1767	0,188	–	–
802	0,094	1422	0,149	1839	0,227	–	–

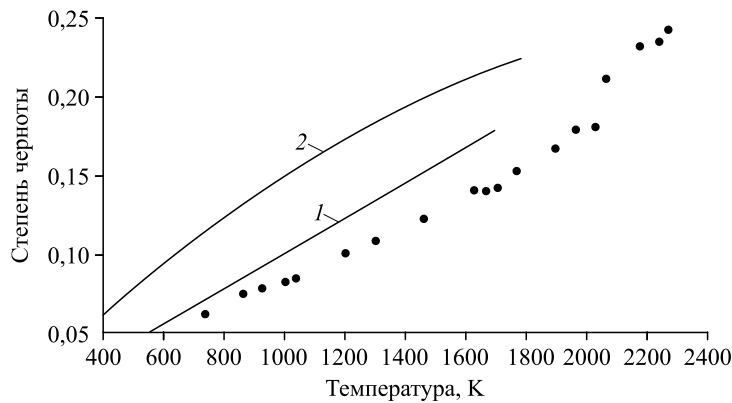


Рис. 5. Зависимость степени черноты платины от температуры в твердой и жидкой фазах ( $T_{\text{плавления}} = 2041 \text{ K}$ ).

Данные работ [1] (1), [7] (2) и результаты настоящих измерений (символы) в атмосфере аргона.

Таблица 4

Значения излучательной способности платины

$T, \text{ K}$	$\epsilon_n$	$T, \text{ K}$	$\epsilon_n$	$T, \text{ K}$	$\epsilon_n$
731	0,061	1462	0,121	2030	0,179
861	0,074	1627	0,139	2065	0,210
919	0,078	1665	0,139	2172	0,230
1001	0,082	1701	0,141	2241	0,233
1031	0,083	1764	0,151	2270	0,241
1198	0,099	1896	0,166	–	–
1297	0,106	1963	0,178	–	–

твердой полированной поверхности. В табл. 4 представлены численные значения степени черноты платины, полученные авторами, в зависимости от температуры.

В заключение следует отметить, что интегральная излучательная способность металлов растет с увеличением температуры и скачкообразно изменяется при фазовом переходе твердое тело – жидкость. На степень черноты существенное влияние оказывают химическая чистота металла, качество поверхности твердого полированного состояния и зеркала расплава, не содержащего окисных пленок.

### Список литературы

1. Излучательные свойства твердых металлов. Справочник / Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 472 с.
2. Сагадеев В.В., Аляев В.А. Излучательная способность жидких металлов и сплавов. Казань: Изд-во КНИТУ, 2018. 176 с.
3. Боголюбов Н.А., Хандрос В.О. Аномалия интегрального коэффициента черноты кобальта вблизи температуры Кюри // Теплофизика высоких температур. 1983. Т. 21, вып. 2. С. 392–394.
4. Панфилович К.Б. Тепловое излучение и поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов. Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2009. 256 с.
5. Fu T., Tan P., Pang C. A steady-state measurement system for total hemispherical emissivity // Sci. and Technology. 2012. Vol. 23, No. 2. P. 025006-1–025006-10.
6. Шварев К.М., Байгураев С.Х., Баум Б.А. Интегральная излучательная способность сплавов системы Ni-Al в твердом и жидком состоянии // Инж.-физ. журн. 1983. Т. 44, № 2. С. 322–326.
7. Siegel R., Howell J.R. Thermal radiation heat transfer. N.Y.: Taylor & Francis, 2002. 857 p. (p. 97).

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2020 г.,  
после доработки — 30 августа 2021 г.,  
принята к публикации 20 октября 2021 г.