

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-II-83-88>

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО АТОМИЗАТОРА ПО СИГНАЛАМ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

© **Никита Анатольевич Колосов<sup>1,2</sup>, Светлана Сергеевна Болдова<sup>1,2</sup>,  
Владимир Александрович Лабусов<sup>1,2,3\*</sup>**

<sup>1</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 1.

<sup>2</sup> ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 1, к. 100;

\*e-mail: labusov@vmk.ru

<sup>3</sup> Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, д. 20.

*Статья поступила 9 октября 2021 г. Поступила после доработки 11 ноября 2021 г.  
Принята к публикации 24 ноября 2021 г.*

Существующая в настоящее время система контроля температуры электротермического атомизатора (ЭТА), применяющегося в атомно-абсорбционном спектрометре для одновременного многоэлементного анализа, при всех своих достоинствах неспособна обеспечить высокие характеристики результатов анализа при утрате актуальности калибровки встроенного оптического пирометра, которая обусловлена естественными процессами износа графитовых кювет в ходе их эксплуатации. Контроль работоспособности ЭТА с помощью внешнего калиброванного пирометра трудоемок. Целесообразно использовать для такого контроля зависимость температуры от времени появления атомных паров элементов. Исследована возможность контроля температуры графитовых кювет в электротермическом атомизаторе атомно-абсорбционного спектрометра с источником непрерывного спектра по зависимости сигналов поглощения элементов от времени. Правильность калибровки проверяли путем регистрации сигналов поглощения пробы, содержащей химические элементы различной летучести, и последующей оценки момента времени и соответствующей ему температуры появления атомных паров элементов. В результате получены температуры появления атомных паров Al, Cd, In, Mn, Ni, Pb и V, лежащие в диапазоне 640 – 1940 °C. При изменении скорости нагрева более чем в 3 раза температура появления паров для выбранных элементов изменяется менее чем на 5 %. Посредством изменения калибровки встроенного оптического пирометра моделировали ситуацию утраты актуальности калибровки с износом графитовой кюветы. Показано смещение графика корреляции между реальной и измеренной температурой появления паров элементов при некорректной калибровке пирометра обратной связи. Представленный в работе метод может использоваться для проверки правильности калибровки встроенного пирометра, а также для определения необходимости замены графитовой кюветы, исчерпавшей свой ресурс.

**Ключевые слова:** атомно-абсорбционная спектрометрия; электротермический атомизатор; атомный пар; многоэлементный анализ; оптическая пирометрия; излучательная способность; графитовая кювета.

## ESTIMATION OF THE POSSIBILITY OF CONTROLLING THE TEMPERATURE OF AN ELECTROTHERMAL ATOMIZER BY THE SIGNALS OF THE ELEMENT ABSORPTION

© **Nikita A. Kolosov<sup>1,2</sup>, Svetlana S. Boldova<sup>1,2</sup>, Vladimir A. Labusov<sup>1,2,3\*</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 1, prosp. Akademika Koptyuga, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> VMK-Optoelektronika, 1 – 100, prosp. Akademika Koptyuga, Novosibirsk, 630090, Russia; \*e-mail: labusov@vmk.ru

<sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, prosp. K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia.

*Received October 9, 2021. Revised November 11, 2021. Accepted November 24, 2021.*

The current system of the temperature control for the electrothermal atomizer (ETA) used in atomic absorption spectrometers for simultaneous multielement analysis, is unable to provide high characteristics of the analysis when the calibration of the built-in optical pyrometer becomes irrelevant due to the natural wear of graphite cells upon operation. As the control of the ETA efficiency using an external calibrated pyrometer is laborious, it is advisable to use the dependence of temperature on the time of appearance of atomic vapors of elements. We have studied the possibility of controlling the temperature of graphite cells

in the electrothermal atomizer of a multielement atomic absorption spectrometer with a continuous spectrum source by the time dependence of absorption signals of chemical elements. The correctness of the calibration was checked by recording the absorption signals of a sample containing chemical elements of different volatility with subsequent evaluation of the time and the corresponding temperature of the appearance of atomic vapors of the elements. The obtained temperatures of the appearance of atomic vapors of Al, Cd, In, Mn, Ni, Pb and V ranged within 640 – 1940°C. When the heating rate is changed by a factor of more than 3, the vapor appearance temperature for the selected elements differs by less than 5%. Using a deliberate change in the calibration of the built-in optical pyrometer, we have simulated a situation in which the relevance of the calibration was lost, e.g., due to the wear of a graphite cell. The experiment revealed a shift of the correlation graph between the actual and measured temperatures of the appearance of vapors of elements in the case of incorrect calibration of the feedback pyrometer in the coordinates “Real temperatures” — “Measured temperatures.” The method presented in the study can be used to check the correctness of the calibration of the built-in pyrometer and to determine the necessity of replacing a worn graphite cell.

**Keywords:** atomic absorption spectrometry; electrothermal atomizer; atomic vapor; multielement analysis; optical pyrometry; emissivity; graphite furnace.

## Введение

В настоящее время активно развивается метод атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией для одновременного многоэлементного анализа [1 – 5]. Контроль нагрева электротермического атомизатора (ЭТА) в атомно-абсорбционных спектрометрах с источником непрерывного спектра зачастую осуществляется посредством регистрации теплового излучения графитовой кюветы [6] оптическим пирометром на основе InGaAs PIN-фотодиода (спектральный диапазон — 900 – 1700 нм), включенным в систему обратной связи (ОС). Пирометр измеряет температуру в диапазоне 400 – 3000 °С со скоростью 1000 измерений/с. Стабилизация температуры в режиме нагрева выше 400 °С осуществляется с помощью пропорционально-интегрального регулятора в микропроцессоре платы управления ЭТА с подбором коэффициентов для исключения перерегулирования.

Высокое быстродействие пирометра ОС позволяет добиться плавного и точного выхода на заданную температуру при высоких скоростях ее нарастания (до 8000 °С/с). При этом необходима калибровка пирометра с использованием дополнительных измерителей температуры, например, стационарного энергетического пирометра «Термоконт-ТН5С1М» [7], что сопряжено с рядом трудностей и неудобств, возникающих в процессе его монтажа и настройки. На основании результатов этой калибровки устанавливается функциональная зависимость температуры графитовой кюветы атомизатора от сигнала АЦП пирометра ОС, которая аппроксимируется полиномом 5-й степени (его коэффициенты записываются в плату пирометра). Откалиброванный пирометр ОС выдает в плату управления значения температуры.

Однако с течением времени калибровка может стать неактуальной, например, из-за изменения излучательной способности [8, 9] графитовой кюветы в процессе ее износа. В результате

возникает несоответствие реальных и заданных температур нагрева, что может приводить к ухудшению характеристик результатов атомно-абсорбционного анализа. Это делает актуальной задачу контроля температуры графитовой кюветы путем регистрации и анализа сигналов поглощения химических элементов.

Известно, что химические элементы обладают разной летучестью [10], в связи с этим представляется целесообразным использовать зависимость температуры от времени появления атомных паров ряда элементов для контроля нагрева графитовой кюветы.

Сравнив одновременно зарегистрированные сигналы поглощения элементов и температуры кюветы с зависимостями при первоначальной калибровке, можно сделать вывод о необходимости перекалибровки пирометра ОС или замены кюветы.

Цель данной работы — исследование возможности контроля температуры графитовых кювет в электротермическом атомизаторе атомно-абсорбционного спектрометра с источником непрерывного спектра путем анализа зависимости сигналов поглощения химических элементов от времени.

## Экспериментальная часть

*Экспериментальная установка* представляет собой прототип малогабаритного атомно-абсорбционного спектрометра с источником непрерывного спектра и электротермическим атомизатором [11]. На рис. 1 представлена ее блок-схема.

Основными функциональными узлами установки являются: источник излучения — дейтериевая лампа Hamamatsu X2D2; электротермический атомизатор с графитовой кюветой продольного нагрева; источник питания атомизатора; спектрометр «Колибри-2» с рабочим спектральным диапазоном 190 – 360 нм и разрешением 0,1 нм [12]. Управление установкой осуществляется ПО «Атом 3. 3» [13]. В установке исполь-

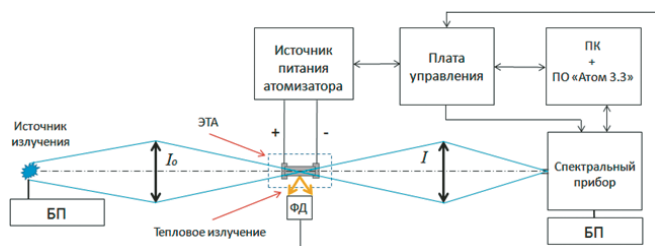


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup

зуются графитовые кюветы с нанесенным пиро-литическим покрытием, которые нагреваются до 50 – 2700 °С за счет пропускания через них электрического тока. Управление нагревом осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения на графитовой кювете с обратной связью по температуре, для измерения которой используется встроенный пирометр ОС. Для защиты графита от окисления при высоких температурах внешняя и внутренняя стенки кюветы обдуваются высокочистым аргоном.

Быстрый нагрев графитовой кюветы по заданной температурной программе обеспечивает атомизацию исследуемого образца, т.е. его перевод в состояние атомного пара, способного селективно поглощать излучение источника непрерывного спектра на длинах волн, соответствующих резонансным переходам атомов из основного в возбужденное энергетическое состояние.

**Выбор химических элементов.** Выбор Al, Cd, In, Mn, Ni, Pb, Pd, V в качестве элементов, использующихся в контрольной пробе, обусловлен тем, что их оптимальные температуры атомизации, а следовательно, и температуры появления атомных паров, лежат в широком диапазоне [10, 14]. Кроме того, их наиболее чувствительные аналитические линии не испытывают спектральных наложений при регистрации с использованием спектрометра «Колибри-2» [15].

Концентрация всех элементов в пробе одинакова и составляет 2 мг/л.

**Описание эксперимента и методика обработки результатов.** В ходе работы использовали два вида калибровки пирометра ОС: стандартную (корректную) калибровку пирометра ОС на кювету, утратившую металлический блеск пиро-литического покрытия в результате небольшого числа отжигов («калибровочная» кювета), и ту же калибровку, смещенную на постоянное значение температуры (некорректную). Смещение задавали путем изменения значения свободного члена в полиноме 5-й степени. Подобное изменение может имитировать механическое смещение пирометра ОС относительно объекта измерения, уменьшение входной апертуры системы регистрации, а также возможную деградацию фоточув-

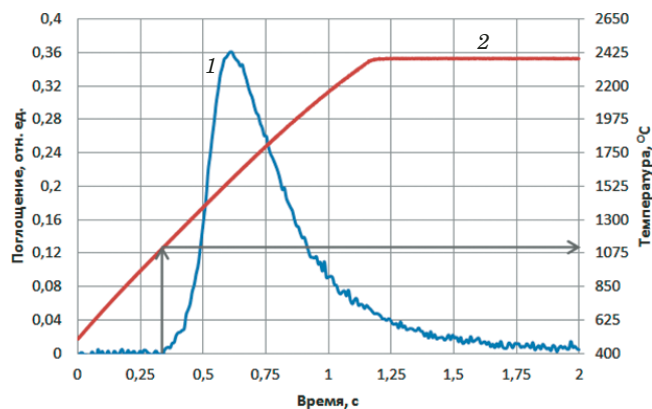


Рис. 2. Зависимости поглощения Mn (1) и температуры (2) от времени

Fig. 2. Graphs of Mn (1) absorption and temperature versus time (2)

ствительного элемента. Во всех этих случаях уменьшается освещенность фоточувствительного элемента и, как следствие, происходит занижение измеренных температур относительно реальных. Однако поскольку нашей целью является демонстрация работы представленного метода контроля, смещение сделано в сторону увеличения измеряемых пирометром ОС температур, чтобы избежать возможного перегрева и разрушения кюветы.

На протяжении всего эксперимента использовали «калибровочную» кювету, что позволяет говорить о высокой точности соответствия заданных параметров нагрева реальным. Температурно-временная программа нагрева кюветы приведена в табл. 1.

Для построения температурных зависимостей необходимо определить момент начала появления атомных паров и соответствующую ему температуру, зарегистрированную пирометром ОС, для всех выбранных элементов. Эти параметры определяли из графиков зависимости сигналов поглощения и температуры от времени. Пример для марганца приведен на рис. 2 (стрелками показан способ получения температуры по-

Таблица 1. Температурно-временная программа нагрева кюветы

Table 1. Temperature-time program of heating the graphite furnace

| Этап       | Заданная температура, °С | Время, с | Скорость нагрева, °С/с | Продувка внутреннего объема кюветы аргоном |
|------------|--------------------------|----------|------------------------|--------------------------------------------|
| Сушка      | 90                       | 60       | 26                     | +                                          |
| Пиролиз    | 500                      | 30       | 200                    | +                                          |
| Атомизация | 2400                     | 2        | 1500                   | –                                          |
| Чистка     | 2500                     | 2(1) × 1 | 3000                   | +                                          |
| Охлаждение | —                        | 15       | —                      | +                                          |

явления атомных паров). Полученные значения температуры считаются постоянными и не должны существенно меняться при изменении параметров нагрева атомизатора.

### Обсуждение результатов

В табл. 2 приведены времена появления атомных паров и соответствующие температуры (средние значения для трех измерений), зарегистрированные пирометром ОС при его корректной калибровке, для всех элементов контрольной пробы при разных скоростях нагрева атомизатора.

Скорость нагрева кюветы задавали путем установки значения ШИМ. В процессе нагрева

происходит разрядка конденсаторов, а значит, и снижение скорости нагрева. Поэтому в табл. 2 указана скорость нагрева в начальный момент нарастания температуры (0 с на рис. 2).

Указанные в табл. 2 температуры появления паров назовем реальными температурами, так как они получены при корректной калибровке пирометра. Поскольку желательно, чтобы температура появления атомных паров была инвариантна относительно скорости нагрева атомизатора, исключим из дальнейших расчетов элементы, для которых значения ОСКО  $T_{cp}$  превышает 5 %. Таким элементом является палладий, при этом его исключение не приведет к уменьшению диа-

**Таблица 2.** Время появления атомных паров и соответствующие температуры при корректной калибровке пирометра ОС

**Table 2.** Time of appearance of atomic vapors and the corresponding temperatures for correct calibration of the feedback pyrometer

| Химический элемент | Скорость нагрева $u$ , °C/с | Время появления атомных паров $t$ , с ( $n = 3$ ) | Температура появления атомных паров $T$ , °C ( $n = 3$ ) | Средняя температура появления атомных паров $T_{cp}$ , °C | ОСКО $T_{cp}$ , % |
|--------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------|
| Al                 | 1600                        | 0,848                                             | 1671                                                     | 1661                                                      | 1,6               |
|                    | 2900                        | 0,44                                              | 1645                                                     |                                                           |                   |
|                    | 4500                        | 0,272                                             | 1636                                                     |                                                           |                   |
|                    | 6000                        | 0,208                                             | 1693                                                     |                                                           |                   |
| Cd                 | 1600                        | 0,08                                              | 631                                                      | 641                                                       | 2,8               |
|                    | 2900                        | 0,04                                              | 621                                                      |                                                           |                   |
|                    | 4500                        | 0,032                                             | 654                                                      |                                                           |                   |
|                    | 6000                        | 0,024                                             | 658                                                      |                                                           |                   |
| In                 | 1600                        | 0,432                                             | 1133                                                     | 1101                                                      | 2,0               |
|                    | 2900                        | 0,216                                             | 1093                                                     |                                                           |                   |
|                    | 4500                        | 0,136                                             | 1097                                                     |                                                           |                   |
|                    | 6000                        | 0,096                                             | 1081                                                     |                                                           |                   |
| Mn                 | 1600                        | 0,48                                              | 1197                                                     | 1194                                                      | 1,5               |
|                    | 2900                        | 0,264                                             | 1214                                                     |                                                           |                   |
|                    | 4500                        | 0,16                                              | 1193                                                     |                                                           |                   |
|                    | 6000                        | 0,112                                             | 1170                                                     |                                                           |                   |
| Ni                 | 1600                        | 0,712                                             | 1502                                                     | 1474                                                      | 2,0               |
|                    | 2900                        | 0,352                                             | 1433                                                     |                                                           |                   |
|                    | 4500                        | 0,232                                             | 1480                                                     |                                                           |                   |
|                    | 6000                        | 0,168                                             | 1479                                                     |                                                           |                   |
| Pb                 | 1600                        | 0,24                                              | 870                                                      | 914                                                       | 3,6               |
|                    | 2900                        | 0,144                                             | 908                                                      |                                                           |                   |
|                    | 4500                        | 0,096                                             | 933                                                      |                                                           |                   |
|                    | 6000                        | 0,072                                             | 945                                                      |                                                           |                   |
| Pd                 | 1600                        | 0,688                                             | 1470                                                     | 1395                                                      | 5,7               |
|                    | 2900                        | 0,36                                              | 1452                                                     |                                                           |                   |
|                    | 4500                        | 0,2                                               | 1353                                                     |                                                           |                   |
|                    | 6000                        | 0,136                                             | 1304                                                     |                                                           |                   |
| V                  | 1600                        | 1,176                                             | 2043                                                     | 1939                                                      | 4,4               |
|                    | 2900                        | 0,584                                             | 1974                                                     |                                                           |                   |
|                    | 4500                        | 0,336                                             | 1877                                                     |                                                           |                   |
|                    | 6000                        | 0,24                                              | 1860                                                     |                                                           |                   |



пазона контролируемых температур и образованию существенных разрывов в графиках.

Аналогичным образом получены средние температуры появления атомных паров элементов при некорректной калибровке пирометра ОС. Изменение свободного члена калибровочного полинома позволило добиться завышения результатов измерения пирометра ОС примерно на 130 °C во всем диапазоне температур.

На рис. 3 по оси  $X$  отложены значения измеренных температур появления паров элементов, полученные при корректной (1) и некорректной (2) калибровке пирометра ОС, а по оси  $Y$  — реальные температуры. Данные графики построены по усредненным значениям температур появления атомных паров элементов для четырех скоростей нагрева атомизатора с приведением соответствующих доверительных интервалов. На рис. 4 представлены аналогичные графики корреляции для конкретных скоростей нагрева. Ввиду того, что ОСКО температур появления атомных паров для фиксированного значения скорости нагрева не превышает 1 %, на графиках не приведены доверительные интервалы. Видно, что в данном случае зависимости имеют существенно более нелинейный характер, что усложняет их анализ.

При корректной калибровке пирометра ОС значения реальной и измеренной  $T_{\text{ср}}$  для калибровочной кюветы совпадают. При использовании некорректной калибровки график смещается.

По величине и характеру смещения кривых можно говорить о необходимости выполнить перекалибровку пирометра ОС.

## Заключение

Таким образом, оценена возможность контроля калибровки пирометра ОС по температурам

появления атомных паров химических элементов с различной летучестью. В качестве таких элементов выбраны Al, Cd, In, Mn, Ni, Pb, V, появление атомных паров которых происходит в диапазоне 640 – 1940 °C. Установлено, что при изменении скорости нагрева более чем в 3 раза температура появления паров для выбранных элементов изменяется менее чем на 5 %. Показано смещение графика корреляции между реальной и измеренной температурой появления паров элементов при некорректной калибровке пирометра обратной связи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Harnly J. M. Multielement atomic absorption with a continuum source / Anal. Chem. 1986. Vol. 58. N 8. P. 933A – 943A. DOI: 10.1021/ac00121a003

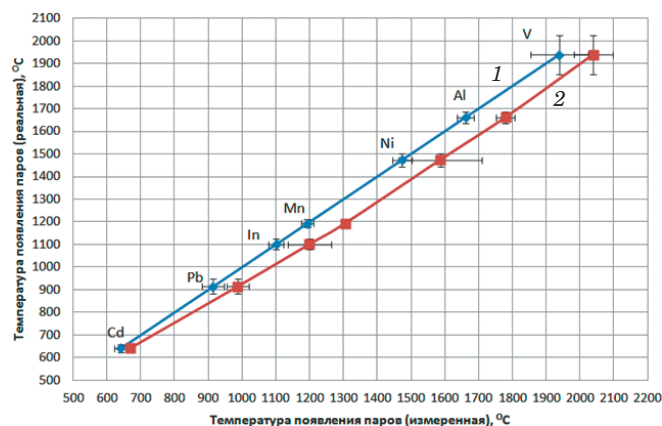


Рис. 3. График корреляции между реальной и измеренной температурой появления паров элементов при корректной (1) и некорректной (2) калибровке пирометра ОС

Fig. 3. Correlation between the actual and measured temperatures of the appearance of vapors of elements at correct (1) and incorrect (2) calibration of the feedback pyrometer

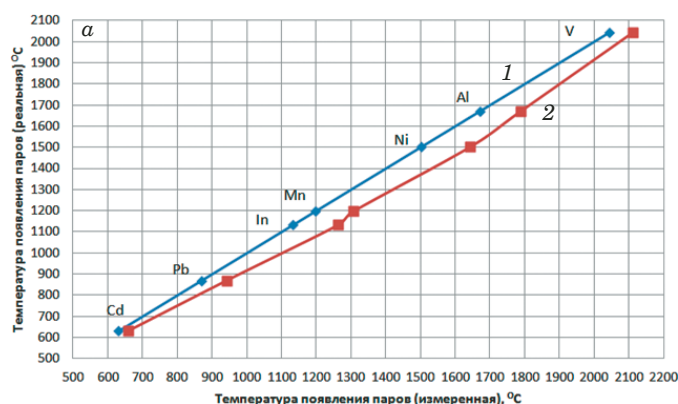


Рис. 4. График корреляции между реальной и измеренной температурой появления паров элементов при корректной (1) и некорректной (2) калибровке пирометра ОС для разных значений скорости нагрева атомизатора (°C/с): а — 1600; б — 4500

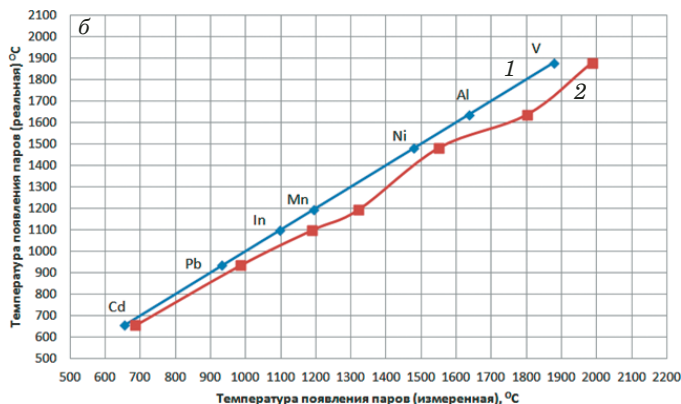


Fig. 4. Correlation between the actual and measured temperatures of the appearance of vapors of elements at correct (1) and incorrect (2) calibration of the feedback pyrometer at a different rate of heating the atomizer (°C/sec): a — 1600; b — 4500

2. **Harnly J. M.** Instrumentation for simultaneous multielement atomic absorption spectrometry with graphite furnace atomization / *Anal. Bioanal. Chem.* 1996. Vol. 355. N 5 – 6. P. 501 – 509. DOI: 10.1007/s0021663550501
3. **Кацков Д. А.** Введение в многоэлементный атомно-абсорбционный анализ / *Аналитика и контроль*. 2018. Т. 22. № 4. С. 350 – 442. DOI: 10.15826/analitika.2018.22.4.001
4. **Кацков Д. А.** Одновременное определение элементов в атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85. № 1. Ч. I. С. 5 – 17. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-5-17
5. **Лабусов В. А., Болдова С. С., Селюнин Д. О. и др.** Атомно-абсорбционный спектрометр высокого разрешения для одновременного многоэлементного анализа / *Аналитика и контроль*. 2018. Т. 22. № 4. С. 451 – 457. DOI: 10.15826/analitika.2018.22.4.003
6. **Lundgren G., Lundmark L., Johansson G.** Temperature controlled heating of the graphite tube atomizer in flameless atomic absorption spectrometry / *Anal. Chem.* 1974. Vol. 46. N 8. P. 1028 – 1031. DOI: 10.1021/ac60344a025
7. **Фрунзе А. В., Фрунзе А. А.** Новые пирометры ТЕРМО-КОНТ для измерения температуры металлов на основе фотодиодных приемников / *Датчики и системы*. 2014. № 3. С. 59 – 61.
8. **Магунов А. Н.** Спектральная пирометрия. — М.: Физматлит, 2012.
9. **Магунов А. Н.** Измерение температуры объектов с неизвестной излучательной способностью методом спектральной пирометрии / *Научное приборостроение*. 2010. Т. 20. № 3. С. 22 – 26.
10. **Пупышев А. А.** Атомно-абсорбционный спектральный анализ. — М.: Техносфера, 2009. — 784 с.
11. **Болдова С. С., Лабусов В. А., Кацков Д. А. и др.** Атомно-абсорбционный спектрометр «Колибри-ААС» для одновременного многоэлементного анализа / *Аналитика и контроль*. 2018. Т. 22. № 4. С. 443 – 450. DOI: 10.15826/analitika.2018.22.4.002
12. **Зарубин И. А.** Возможности малогабаритного спектрометра «Колибри-2» в атомно-эмиссионном спектральном анализе / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 1. Ч. II. С. 114 – 117. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-114-117
13. **Гаранин В. Г., Неклюдов О. А., Петроченко Д. В. и др.** Программное обеспечение атомного спектрального анализа «Атом» / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85. № 1 – 2. С. 103 – 111. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-103-111
14. **Welz B., Sperling M.** Atomic Absorption Spectrometry. 3<sup>rd</sup> ed. — Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 1999. — 941 p. DOI: 10.1002/9783527611690
15. **Welz B., Becker-Ross H. Florek S., Heitmann U.** High-resolution Continuum Source AAS: The Better Way to do Atomic Absorption Spectrometry. — Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2005. — 296 p.

## REFERENCES

1. **Harnly J. M.** Multielement atomic absorption with a continuum source / *Anal. Chem.* 1986. Vol. 58. N 8. P. 933A – 943A. DOI: 10.1021/ac00121a003
2. **Harnly J. M.** Instrumentation for simultaneous multielement atomic absorption spectrometry with graphite furnace atomization / *Anal. Bioanal. Chem.* 1996. Vol. 355. N 5 – 6. P. 501 – 509. DOI: 10.1007/s0021663550501
3. **Katskov D. A.** An introduction to multi-element atomic-absorption analysis / *Analit. Kontrol'.* 2018. Vol. 22. N 4. P. 350 – 442 [in Russian]. DOI: 10.15826/analitika.2018.22.4.001
4. **Katskov D. A.** Simultaneous multi-element determination in electrothermal atomic-absorption spectrometry with electrothermal atomization / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2019. Vol. 85. N 1. Part I. P. 5 – 17 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-5-17
5. **Labusov V. A., Boldova S. S., Selyunin D. O., et al.** High-resolution atomic absorption spectrometer for the simultaneous multielement analysis / *Analit. Kontrol'.* 2018. Vol. 22. N 4. P. 451 – 457 [in Russian]. DOI: 10.15826/analitika.2018.22.4.003
6. **Lundgren G., Lundmark L., Johansson G.** Temperature controlled heating of the graphite tube atomizer in flameless atomic absorption spectrometry / *Anal. Chem.* 1974. Vol. 46. N 8. P. 1028 – 1031. DOI: 10.1021/ac60344a025
7. **Frunze A. V., Frunze A. A.** New pyrometers TERMOKONT for measuring the temperature of metals based on photodiodes / *Datch. Sist.* 2014. N 3. P. 59 – 61 [in Russian].
8. **Magunov A. N.** Spectral pyrometry. — Moscow: Fizmatlit, 2012. — 248 p. [in Russian].
9. **Magunov A. N.** Temperature measurement of objects with unknown emissivity using a technique of spectral pyrometry / *Nauch. Pribor.* 2010. Vol. 20. N 3. P. 22 – 26 [in Russian].
10. **Pupyshev A. A.** Atomic Absorption Spectral Analysis. — Moscow: Tekhnosfera, 2009. — 784 p. [in Russian].
11. **Boldova S. S., Labusov V. A., Katskov D. A., et al.** “Kolibri-AAS” atomic absorption spectrometer for the simultaneous multielement analysis / *Analit. Kontrol'.* 2018. Vol. 22. N 4. P. 443 – 450 [in Russian]. DOI: 10.15826/analitika.2018.22.4.002
12. **Zarubin I. A.** Capabilities of a Compact Kolibri-2 Spectrometer in Atomic Emission Spectral Analysis / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2017. Vol. 83. N 1. Part II. P. 114 – 117 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-114-117
13. **Garanin V. G., Neklyudov O. A., Petrochenko D. V., et al.** «Atom» software for atomic spectral analysis / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2019. Vol. 85. N 1 – 2. P. 103 – 111 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-103-111
14. **Welz B., Sperling M.** Atomic Absorption Spectrometry. 3<sup>rd</sup> ed. — Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 1999. — 941 p. DOI: 10.1002/9783527611690
15. **Welz B., Becker-Ross H. Florek S., Heitmann U.** High-resolution Continuum Source AAS: The Better Way to do Atomic Absorption Spectrometry. — Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2005. — 296 p.