

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

SPECTRAL DEVICES

УДК 378.164/.169;543.082/.084:54-16

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКАНАЛЬНОГО АТОМНО-ЭМИССИОННОГО ВАКУУМНОГО СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ УЧЕБНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЛАБОРАТОРИЙ С ГЕНЕРАТОРОМ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА МС-200УН

В. М. БЫЧКОВ¹⁾, Я. И. ДИДКОВСКИЙ¹⁾, М. Н. КОВАЛЕНКО¹⁾,
А. А. МИНЬКО¹⁾, М. Р. ПОСЛЕДОВИЧ¹⁾, С. Н. ШАРАШКИН¹⁾, В. М. ЯКОВЕЦ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Приведены технические и метрологические характеристики многоканального атомно-эмиссионного вакуумного спектрометра для учебных и промышленных лабораторий с генератором искрового разряда МС-200УН. Использована оригинальная оптическая схема, состоящая из двух полихроматоров: первый предназначен для работы в области вакуумного ультрафиолета в диапазоне длин волн от 170 до 290 нм, второй – в спектральном диапазоне от 290 до 410 нм. В приборе применены многоэлементные полупроводниковые фотоприемники с удаленными защитными окнами, что обеспечивает скоростную регистрацию спектров в вакуумном диапазоне для одновременного определения концентрации нескольких химических элементов в составе исследуемого образца. Показано, что метрологические характеристики атомно-эмиссионного вакуумного спектрометра для учебных и промышленных лабораторий с генератором искрового разряда МС-200УН удовлетворяют требованиям нормативной документации по анализу металлов и сплавов. Таким образом, изготовленный прибор может быть использован как в учебном процессе, так и при проведении рутинных исследований в аналитических (заводских) лабораториях предприятий и организаций.

Ключевые слова: вакуумный атомно-эмиссионный спектрометр; генератор искры; спектральный анализ; спектроскопия; многоэлементные полупроводниковые фотоприемники; ПЗС.

Образец цитирования:

Бычков ВМ, Дидковский ЯИ, Коваленко МН, Минько АА, Последович МР, Шарашкин СН, Яковец ВМ. Метрологические и эксплуатационные характеристики многоканального атомно-эмиссионного вакуумного спектрометра для учебных и промышленных лабораторий с генератором искрового разряда МС-200УН. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2019;3:51–60.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-3-51-60>

For citation:

Bychkov VM, Didkovsky YI, Kovalenko MN, Minko AA, Pasliadovich MR, Sharashkin SN, Yakavets VM. Metrological and operational characteristics of the multichannel vacuum atomic-emission spectrometer for educational and industrial laboratories with a MS-200UN spark generator. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2019;3:51–60. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-3-51-60>

Сведения об авторах см. на с. 60.

Information about the authors see p. 60.

METROLOGICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF THE MULTICHANNEL VACUUM ATOMIC-EMISSION SPECTROMETER FOR EDUCATIONAL AND INDUSTRIAL LABORATORIES WITH A MS-200UN SPARK GENERATOR

V. M. BYCHKOV^a, Y. I. DIDKOVSKY^a, M. N. KOVALENKO^a,
A. A. MINKO^a, M. R. PASLIADOVICH^a, S. N. SHARASHKIN^a, V. M. YAKAVETS^a

^aBelarusian State University, 4 Nizaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: V. M. Bychkov (bychvm@gmail.com)

This work presents the metrological and operational characteristics of the multichannel vacuum atomic-emission spectrometer for educational and industrial laboratories with a MS-200UN spark generator. The spectrometer uses an original optical scheme consisting of two polychromators: the first polychromator is designed to work in the field of vacuum ultraviolet at the wavelength range from 170 to 290 nm; the second polychromator covers the wavelength range from 290 to 410 nm. The multielement semiconductor photodetectors with remote shielding windows offer fast recording of spectra in the vacuum ultraviolet range for simultaneous evaluation of the concentrations of several chemical elements in the samples under study. It is demonstrated that metrological characteristics of the atomic-emission vacuum spectrometer with a MS-200UN spark generator for educational and industrial laboratories meet the requirements of the normative documents standardizing analysis of metals and alloys. The designed spectrometer may be used in educational process and during routine analyses at laboratories of industrial enterprises and other organizations.

Keywords: vacuum atomic-emission spectrometer; spark generator; spectral analysis; spectroscopy; multielement semiconductor photodetectors; CCD.

Введение

Возрастающие требования к современному производству предполагают использование прогрессивных средств и методов контроля не только исходного сырья для обеспечения технологического процесса, но и готовой продукции. Как следствие, возникает потребность в малогабаритных приборах, способных выполнять измерения не только в специализированных лабораториях, но и непосредственно на производстве.

Атомно-эмиссионные спектрометры с искровым возбуждением спектра используют для контроля сырья и готовой продукции в металлургии, машиностроении и других отраслях промышленности. Их широкое применение обусловлено экспрессностью, относительно невысокой ценой, практически полной автоматизацией процесса измерений [1–4]. Особенno актуальна возможность идентификации и анализа содержания серы, фосфора и углерода в сталях и чугунах. Аналитические линии указанных элементов находятся в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ). Следовательно, при выборе конструкции спектрометра необходимо обеспечить регистрацию спектров в диапазоне от 170 нм. Задача была решена с помощью двух полихроматоров, один из которых вакуумируется (рабочий диапазон от 170 до 190 нм). Второй полихроматор обеспечивает регистрацию спектров в диапазоне от 290 до 410 нм. В этом диапазоне находятся аналитические линии таких элементов, как Cu (324,7 нм), W (330,0 нм), V (311,1 нм) и многие другие.

Современные многоканальные оптические спектрометры позволяют решать задачи количественного, полуколичественного и качественного атомно-эмиссионного анализа самого широкого перечня материалов, изучать динамику процессов изменения концентрации элементов во времени, снижать пределы обнаружения элементов и получать результаты анализа, удовлетворяющие требованиям отечественных и международных стандартов.

Материалы и методы

В лаборатории спектроскопических систем кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета БГУ разработан и создан экспериментальный образец атомно-эмиссионного спектрометра с искровым источником возбуждения спектра (ИВС) МС-200УН.

Спектрометр состоит из следующих основных частей (рис. 1):

- спектральный прибор (СП);
- ИВС, который представляет собой высоковольтный искровой CLR-генератор с блоком питания;

- газовое оборудование (ГО);
- многоканальное фотоприемное устройство, состоящее из блока фотоприемников (БФП) и блока питания блока фотоприемников (БП БФП);
- блок управления спектрометром;
- управляющая персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ);
- принтер.

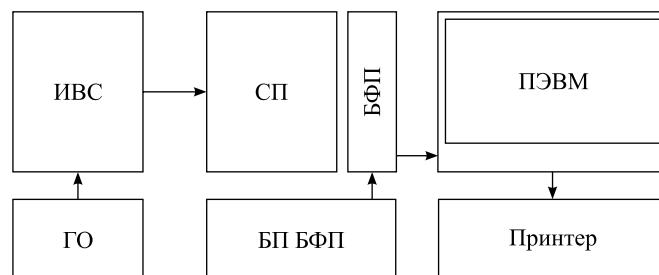


Рис. 1. Блок-схема разработанного и изготовленного спектрометра многоканального атомно-эмиссионного с CLR-генератором MC-200УН

Fig. 1. Block diagram of the designed and manufactured multichannel atomic emission spectrometer with MS-200UN CLR-generator

Прибор предназначен для качественного и количественного анализа химического состава черных и цветных металлов и сплавов на их основе в условиях научных и заводских лабораторий. ПЭВМ предоставляет возможность управлять режимами работы спектрометра с помощью разработанного программного обеспечения, а также получать, обрабатывать и выводить экспериментальные данные. С помощью прибора можно проводить идентификацию и анализ содержания большинства основных и легирующих химических элементов, включая серу, фосфор и углерод, в металлах и сплавах.

На рис. 2 показана компоновка основных деталей в корпусе спектрометра.

Спектральный блок содержит два полихроматора на основе дифракционных решеток, которые обеспечивают рабочий спектральный диапазон прибора (рис. 3). Свет от источника излучения 1 (конденсированной искры) проходит по оптическому каналу штатива и после отражения от светофильтральной решетки

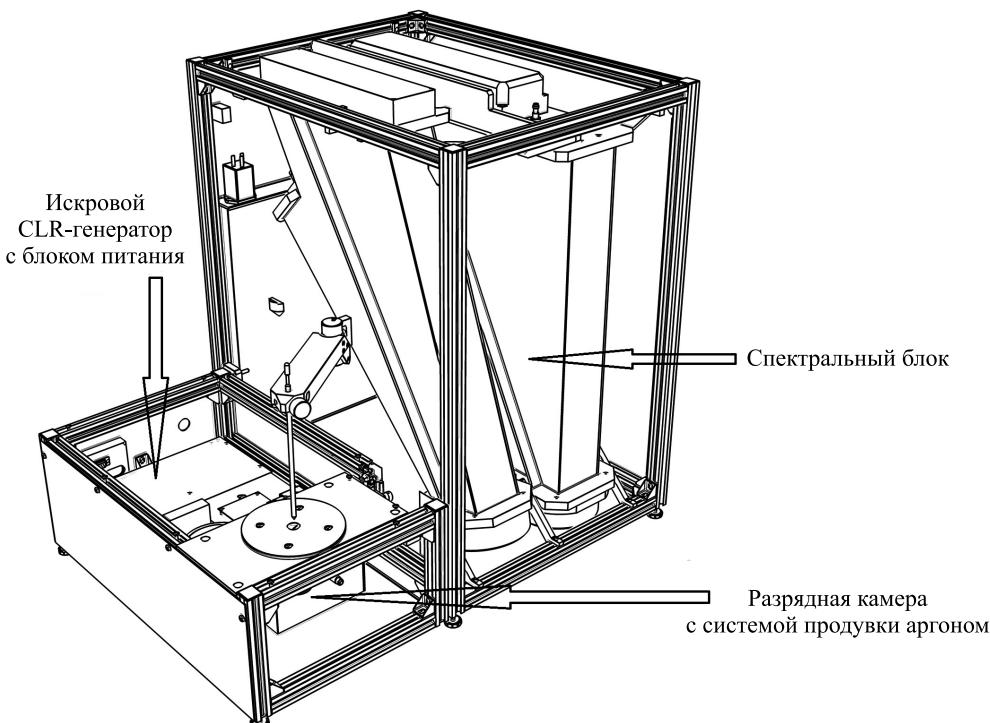


Рис. 2. Компоновка основных деталей в корпусе спектрометра
Fig. 2. Layout of the main parts encased in housing of the spectrometer

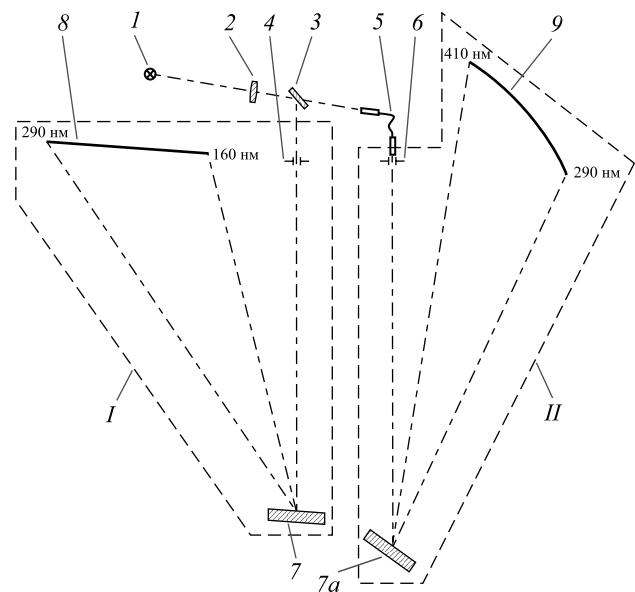


Рис. 3. Оптическая схема прибора, включающая спектральный блок

Fig. 3. Optical layout of the spectrometer including the spectral block

пластиинки 3 фокусируется линзой 2 в плоскости входной щели 4 вакуумного полихроматора I (рабочий спектральный диапазон 170–290 нм). Линза 2 выполняет также роль выходного окна штатива. Второй пучок излучения, прошедший через светоделительную пластинку 3, фокусируется на входном торце световода 5, расположенному непосредственно перед входной щелью 6 полихроматора II (рабочий спектральный диапазон 290–410 нм). В определенных пределах рабочий спектральный диапазон полихроматоров может быть перестроен при их юстировке. Полихроматоры I и II выполнены на базе вогнутых голографических дифракционных решеток 7 и 7_a типа III (flat field). Таким образом, в полихроматоре I излучение, прошедшее через входную щель 4, разделяется на спектральные компоненты решеткой 7 и фокусируется ей на фокальной поверхности 8. В полихроматоре II излучение, прошедшее через входную щель 6, разделяется на спектральные компоненты решеткой 7_a и фокусируется ей на фокальной поверхности 9.

В оптической схеме полихроматоров использованы одинаковые решетки с плотностью штрихов в центре 2500 mm^{-1} и диаметром заштрихованной части 55 мм, но с разными углами установки относительно входной щели и системы регистрации относительно оси решетки. Это обеспечивает различный спектральный диапазон работы полихроматоров. Отметим, что фокусное расстояние данного типа решеток, определяющее светосилу спектрометров, зависит от длины волны падающего излучения и находится в диапазоне от 404 до 470 мм.

Оптическая схема полихроматора I использует паспортный угол установки дифракционной решетки, при котором кривизна поля изображения исправлена, поэтому его фокальная поверхность имеет плоскую форму. В оптической схеме спектрографа II при нестандартном угле установки дифракционной решетки фокальная поверхность имеет криволинейную форму. Оптимальное размещение линейных сенсоров на криволинейной фокальной поверхности дифракционной решетки было выполнено на основе результатов специального расчета, что позволило минимизировать дефокусировку каждого линейного многоканального полупроводникового детектора.

Полихроматоры скомпонованы в корпусах, конструкция которых обеспечивает достаточную жесткость при откачке воздуха из внутреннего пространства для исключения поглощения УФ-излучения атмосферными газами.

Вакуум в герметичном корпусе полихроматора при проведении измерений в области ВУФ поддерживается на уровне 0,3 кПа с помощью мембранныго безмасляного насоса [5].

В качестве ИВС в спектрометре используется генератор низковольтной конденсированной искры собственной разработки [6]. Выбор был сделан в пользу низковольтного конденсированного искрового разряда с управляемым высоковольтным поджигом разрядного промежутка. Основными причинами такого выбора стали универсальность этого источника, т. е. возможность анализировать широкую номенклатуру марок сплавов с широкими диапазонами концентраций легирующих элементов, и достаточно высокая стабильность результатов анализов при работе в среде аргона.

Генератор низковольтной конденсированной искры содержит высокочастотный импульсный преобразователь напряжения, построенный по обратноходовой схеме с контролем тока первичной обмотки

высоковольтного трансформатора. Напряжение с выхода преобразователя используется для зарядки батареи высоковольтных конденсаторов, которая вместе с катушкой индуктивности и аналитическим промежутком образует разрядный контур.

Особенность нашей системы заряда рабочей емкости – введение схемы контроля тока насыщения первичной обмотки импульсного трансформатора наряду с контролем величины напряжения на заряжаемой емкости. Такой подход позволил минимизировать потери энергии и выровнять средний ток, потребляемый схемой при работе. С управляющей ПЭВМ оператор может задать частоту следования импульсов, напряжение на накопительном конденсаторе и другие параметры разряда, которые подбираются экспериментальным путем в зависимости от аналитической задачи (вид сплава, диапазон концентраций определяемых элементов и т. п.).

В качестве регистрирующего устройства используется БФП на основе модифицированных линейных ПЗС-приемников TCD1304 производства фирмы *Toshiba* (Япония). Выбор данного типа приемников обусловлен их надежностью, хорошей чувствительностью и динамическим диапазоном. Оба полихроматора оборудованы многоканальным фотоприемным устройством, которое состоит из 5 ПЗС-приемников TCD1304. Таким образом, на каждый спектральный диапазон приходится $5 \times 3648 = 18\,240$ независимых фоточувствительных элементов, что позволяет выбирать оптимальные аналитические линии для количественного и качественного спектрального анализа, а также эталонные линии для калибровки по длинам волн. Для расширения области спектральной чувствительности ПЗС-приемников TCD1304 в область ВУФ их входные заводские стеклянные окна были удалены.

Блок управления спектрометром обеспечивает необходимые режимы работы и обмен информацией между частями спектрометра и ПЭВМ. Он размещается в корпусе прибора. Общее управление осуществляется с помощью ПЭВМ с установленной операционной системой WINDOWS 2000/XP/7/10. Связь с ПЭВМ реализована путем интерфейса *Ethernet*, который обеспечивает удобную высокоскоростную передачу данных. Их окончательная обработка и представление в удобном для оператора виде производятся ПЭВМ под управлением специализированной программы *Vision*.

Результаты и их обсуждение

Метрологическая аттестация спектрометра проводилась с использованием образцов меди катодной М1к по ГОСТ 859–2001 (содержание основного элемента (Cu) – не менее 99,95 %) и комплекта государственных стандартных образцов (ГСО) состава сталей углеродистых и легированных УГ0 – УГ9 [7]. В процессе метрологической аттестации определяли погрешность шкалы длин волн спектрометра (табл. 1), относительное среднее квадратическое отклонение результатов измерения относительной интенсивности спектральных линий, относительную погрешность спектрометра при измерении концентрации элементов в металле (сплаве). Первоначальная калибровка по длинам волн проводилась по линиям меди.

Таблица 1

Результаты определения погрешности шкалы длин волн спектрометра
во время метрологической аттестации (линии меди), нм

Table 1

Errors of the spectrometer wavelength scale determined
in the process of metrological certification (cuprum lines), nm

Параметр	Положение максимума интенсивности спектральной линии		Измеренное значение погрешности шкалы длин волн спектрометра (по модулю)
	Измеренное значение	Табличное значение	
λ_1	197,054	197,049	0,005
λ_2	240,005	240,011	0,006
λ_3	282,429	282,437	0,008

Во время дальнейшей подконтрольной эксплуатации прибора было установлено, что с помощью подбора спектральных линий, используемых для калибровки, погрешность шкалы длин волн может быть уменьшена до менее чем 0,001 нм. При этом неопределенность измерения длины волны одиночной спектральной линии может быть лучше, чем спектральная ширина фоточувствительного элемента ПЗС-линейки, которую находят по его геометрическим размерам (примерно 0,006 нм в диапазоне от 172 до 194 нм). В табл. 2 приведены результаты определения длин волн линий железа после уточненной калибровки, выполненной в диапазоне от 172 до 194 нм по 19 спектральным линиям. Табличные

данные о длинах волн спектральных линий были получены из базы данных NIST [8]. Калибровочная функция спектрометра по длинам волн в данном случае аппроксимируется полиномом второй степени. Результаты показывают (см. табл. 2), что спектрометр может успешно использоваться при проведении качественного анализа неизвестных металлов и сплавов, обеспечивая достаточно точную идентификацию спектральных линий и, таким образом, определение элементов основы и примесей.

Таблица 2

Результаты определения погрешности измерения
 длин волн линий железа и углерода, нм

Table 2

Errors in the measured line wavelengths for iron and carbon, nm

Положение максимума интенсивности спектральной линии		Измеренное значение погрешности шкалы длин волн
Измеренное	Табличное	
<i>Железо</i>		
172,486 113 1	172,485 390	0,000 723 1
174,033 478 9	174,033 490	–0,000 011 1
174,158 132 5	174,158 085	0,000 047 5
174,270 872 3	174,271 800	–0,000 927 7
176,411 243 6	176,411 600	–0,000 356 4
177,599 301 1	177,599 700	–0,000 398 9
177,663 867 9	177,664 800	–0,000 932 1
178,133 042 2	178,133 800	–0,000 757 8
178,800 394 0	178,800 390	0,000 004 0
179,816 215 3	179,816 000	0,000 215 3
182,213 939 5	182,213 500	0,000 439 5
182,387 374 2	182,387 110	0,000 264 2
183,587 120 0	183,587 400	–0,000 280 0
185,795 191 8	185,795 990	–0,000 798 2
186,000 823 6	186,000 200	0,000 623 6
190,758 251 6	190,759 100	–0,000 848 4
192,633 815 1	192,634 140	–0,000 324 9
193,040 874 8	193,039 800	0,001 074 8
<i>Углерод</i>		
193,091 019 4	193,091 000	0,000 019 4

Спектральное разрешение прибора составляет 0,015 нм. В качестве иллюстрации его разрешающей способности на рис. 4 приведен зарегистрированный на спектрометре участок спектра железа с двумя спектрально разрешенными линиями железа с близкими интенсивностями с длинами волн 188,730 34 нм (Fe41) и 188,748 4 нм (Fe42) (табличные значения NIST).

Программное обеспечение спектрометра позволяет аппроксимировать градуировочную характеристику полиномом первой или второй степени в линейном или логарифмическом масштабе. При построении градуировочной характеристики были использованы стандартные образцы предприятия. Пример такого построения приведен на рис. 5.

При метрологической аттестации измерения концентраций элементов в сталях выполняли по ГОСТ 27809 [9], а построение градуировочных характеристик для определения концентрации элементов проводили с использованием ГСО состава сталей углеродистых и легированных УГ0 – УГ9. Подготовку стандартных и анализируемых образцов к измерениям осуществляли по ГОСТ 27809.

Значения среднего квадратического отклонения результатов измерения относительной интенсивности спектральных линий, полученные при проведении метрологической аттестации, приведены в табл. 3. Большие (порядка 10^7) измеренные интенсивности сигнала обусловлены регистрацией спектров в режиме суммирования.

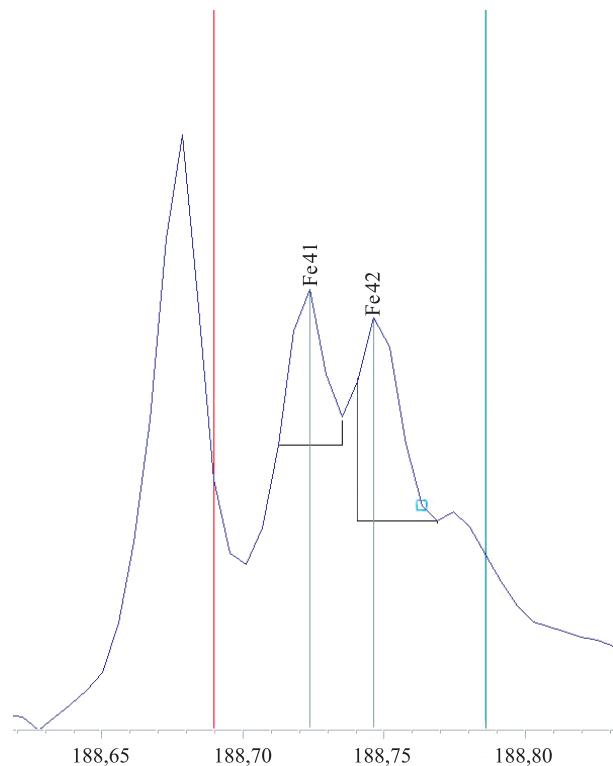


Рис. 4. Участок спектра железа с двумя спектрально разрешенными линиями железа с близкими интенсивностями с длинами волн 188,73034 нм (Fe41) и 188,7484 нм (Fe42) (табличные значения NIST)

Fig. 4. Section of a spectrum for iron showing two spectrally resolved iron lines with similar intensities at the wavelengths 188.73034 nm (Fe41) and 188.7484 nm (Fe42) (NIST tabular values)

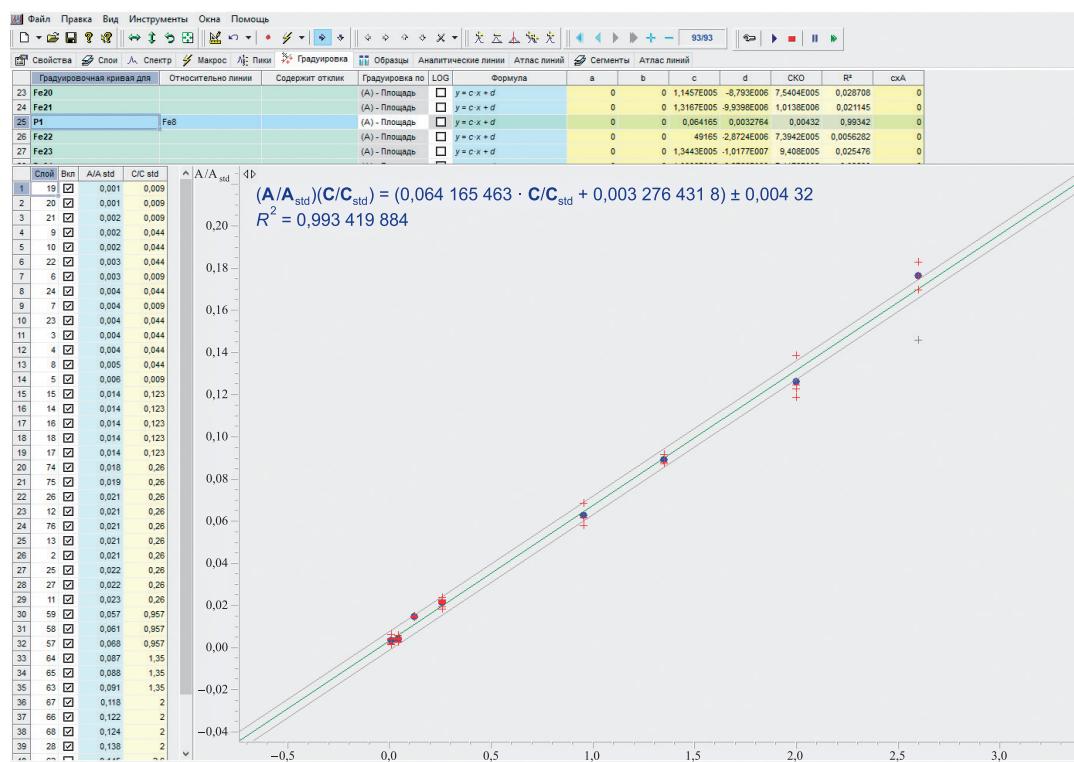


Рис. 5. Градуировочная характеристика для определения концентрации фосфора в чугунах по линии 178,283 8 нм (табличное значение NIST)

Fig. 5. Calibration curve for phosphorus in the cast iron at 178.283 8 nm (NIST tabular values)

Таблица 3

Относительное среднее квадратическое отклонение
 результатов измерения относительной интенсивности спектральных линий

Table 3

The experimental results of the determination
 of the relative standard deviation of the spectral lines relative intensity

Параметр	Измеренное значение относительной интенсивности спектральных линий, отн. ед.	Измеренное относительное среднее квадратическое отклонение результатов измерения относительной интенсивности спектральных линий, %
λ_1	18 462 711	2,47
λ_2	92 818 874	1,86
λ_3	50 430 815	2,17
λ_4	17 315 639	1,39
λ_5	60 592 318	1,57

Примечание. Допускаемое относительное среднее квадратическое отклонение результатов измерения для всех параметров составляет 3 %.

Значения относительной погрешности спектрометра при измерении концентрации элементов в металле приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты определения относительной погрешности спектрометра
 при измерении концентрации элементов в металле (ГСО УГ), %

Table 4

Relative errors of the spectrometer determined during measurement
 of the element concentrations in metal (reference materials UG), %

Элемент	Концентрация элемента в сплаве		Измеренная относительная погрешность спектрометра
	Измеренное значение	Аттестованное значение	
Si	0,419	0,404	3,71
Mn	0,381	0,366	4,10
Cr	1,72	1,79	-3,91
Ni	0,334	0,328	1,83
Cu	0,231	0,239	-3,35

Примечание. Допускаемая относительная погрешность спектрометра для всех элементов составляет 5,0 %.

Источник: [10].

Можно сделать вывод, что спектрометр полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ 27809.

Заключение

В работе описан разработанный и изготовленный по заданию 16 подпрограммы «Научно-учебное оборудование» ГНТП «Эталоны и научные приборы» многоканальный атомно-эмиссионный вакуумный спектрометр для учебных и промышленных лабораторий с генератором искрового разряда МС-200УН, а также приведены его параметры и результаты исследований метрологических и эксплуатационных характеристик.

Спектрометр МС-200УН с генератором CLR разряда для экспресс-анализа элементного состава металлов и сплавов имеет следующие характеристики:

- диапазон анализируемых элементов Na – U;
- предел обнаружения по Cu не хуже 1 ppm;
- относительное среднее квадратическое отклонение результатов измерения относительной интенсивности спектральных линий не более 3 %;
- потребляемая мощность не более 0,5 кВт;

- одновременная регистрация спектров в диапазоне 170–410 нм;
- спектральное разрешение не хуже 0,015 нм;
- процесс измерения полностью автоматизирован.

Использована компьютерная программа *Vision*, которая обеспечивает автоматизацию и быстродействие для научных и практических исследований, связанных с определением элементного состава и примесей в металлах и сплавах.

При проведении опытной эксплуатации спектрометра были выполнены измерения концентраций элементов в сталях, чугунах и медных сплавах. Полученные результаты удовлетворяли требованиям действующей нормативно-технической документации. Можно сделать вывод, что спектрометр может быть использован для качественного и количественного определения химических элементов в материалах различного назначения как в учебных, так и заводских лабораториях, а также для выполнения лабораторных и научных работ в области спектрального анализа проводящих веществ и материалов.

Библиографические ссылки

1. Ландсберг ГС. *Оптика*. Москва: Физматлит; 2003. 848 с.
2. Воропай ЕС, Ермалицкая КФ, Зажогин АП, Патапович МП, Фадаиян АР. Атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ: научное и практическое применение. *Вестник БГУ. Серия 1. Физика. Математика. Информатика*. 2009;1: 4–14.
3. Зайдель АН. *Основы спектрального анализа*. Москва: Наука; 1965.
4. Коваленко МН, Чекан ВА, Маркова ЛВ, Коледа ВВ, Турутин АФ. Аналитический контроль в metallurgическом производстве. *Литье и металлургия*. 2001;(4):127–130.
5. Дидковский ЯИ, Коваленко МН, Минько АА, Последович МР. Многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр с искровым источником возбуждения спектра. *Вестник БГУ. Серия 1. Физика. Математика. Информатика*. 2015;1:21–25.
6. Дидковский ЯИ, Коваленко МН, Минько АА, Последович МР. Программируемый источник возбуждения спектра для атомно-эмиссионного спектрального анализа. В: *Приборостроение-2012. Материалы 5-й Международной научно-технической конференции; 21–23 ноября 2012 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БНТУ; 2012. с. 61–63.
7. Минько АА, Бычков ВМ, Михалевич ВФ. ПМА МН 2488–2015. Спектрометр многоканальный атомно-эмиссионный для учебных и промышленных лабораторий с генератором CLR разряда MS-200УН. Программа и методика метрологической аттестации. Минск: БелГИМ; 2015.
8. National Institute of Standards and Technology (NIST). Atomic Spectra Database [Internet, cited 2018 August 22]. Available from: <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>.
9. ГОСТ 27809–95. Чугун и сталь. Метод спектрографического анализа. Москва: Издательство стандартов «ИПК»; 1996.
10. Институт стандартных образцов. Для спектрального анализа. Стали, УГ [Интернет]. Екатеринбург [процитировано 12 мая 2019 г.]. Доступно по: <http://icrm-ekb.ru/catalog/data/g783d94.html>.

References

1. Landsberg GS. *Optika* [Optics]. Moscow: Fizmatlit; 2003. 848 p. Russian.
2. Voropay ES, Ermalitskaya KF, Zazhogin AP, Patapovich MP, Fadaiyan AR. Atomic emission multichannel spectral analysis: scientific and practical application. *Vestnik BGU. Seriya 1. Fizika. Matematika. Informatika*. 2009;1:4–14. Russian.
3. Seidel AN. *Osnovy spektral'nogo analiza* [Fundamentals of spectral analysis]. Moscow: Nauka; 1965. Russian.
4. Kovalenko MN, Chekan VA, Markova LV, Koleda VV, Turutin AF. [Analytical control in the metallurgical industry]. *Lit'e i metallurgiya*. 2001;(4):127–130. Russian.
5. Didkovskiy YI, Kovalenko MN, Minko AA, Posledovich MR. Multichannel atomic emission spectrometer with a spark generator. *Vestnik BGU. Seriya 1. Fizika. Matematika. Informatika*. 2015;1:21–25. Russian.
6. Didkovskiy YI, Kovalenko MN, Minko AA, Posledovich MR. [Programmable spectrum excitation source for atomic emission spectral analysis]. In: *Priborostroenie-2012. Materialy 5-i Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii; 21–23 noyabrya 2012 g.; Minsk, Belarus'* [Instrumentation-2012. Materials of the 5th International scientific and technical conference; 2012 November 21–23; Minsk, Belarus. Minsk: Belarusian National Technical University; 2012. p. 61–63. Russian.
7. Minko AA, Bychkov VM, Mihalevich VF. PMA MN 2488–2015. Multichannel atomic emission spectrometer for educational and industrial laboratories with a CLR spark generator MS-200UN. The program and methodology for metrological certification. Minsk: Institute of Metrology; 2015. Russian.
8. National Institute of Standards and Technology (NIST). Atomic Spectra Database [Internet, cited 2018 August 22]. Available from: <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>.
9. GOST 27809–95. Cast iron and steel. Methods of spectrographic analysis. Moscow: Izdatel'stvo standartov «IPK»; 1996. Russian.
10. Institut standartnykh obraztsov. Dlya spektral'nogo analiza. Stali, UG [Internet]. Yekaterinburg [cited 2019 May 12]. Available from: <http://icrm-ekb.ru/catalog/data/g783d94.html>. Russian.

Статья поступила в редакцию 26.08.2019.
Received by editorial board 26.08.2019.

Авторы:

Владимир Михайлович Бычков – заведующий учебной лабораторией кафедры ядерной физики физического факультета.

Ярослав Иванович Дидковский – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектроскопических систем кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

Максим Николаевич Коваленко – заведующий научно-исследовательской лабораторией спектроскопических систем кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

Анатолий Антонович Минько – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

Михаил Романович Последов – кандидат физико-математических наук, доцент; ведущий инженер кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

Сергей Николаевич Шарашкин – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектроскопических систем кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

Вера Михайловна Яковец – инженер оптического и лазерного оборудования кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

Authors:

Vladimir M. Bychkov, head of the training laboratory, department of nuclear physics, faculty of physics.

bychvm@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1379-5389>

Yaroslav I. Didkovsky, senior researcher at the laboratory of spectroscopic systems, department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

yaroslav-didkovskij@yandex.ru

Maksim N. Kovalenko, head of the laboratory of spectroscopic systems, department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

kovalenkom@bsu.by

Anatoli A. Minko, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

minko@bsu.by

Mikhail R. Pasliadovich, PhD (physics and mathematics), docent; leading engineer at the department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

posledov@bsu.by

Sergei N. Sharashkin, senior researcher at the laboratory of spectroscopic systems, department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

sharashkin@bsu.by

Vera M. Yakavets, optical and laser equipment engineer at the department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

optics@bsu.by