

ИНФРАКРАСНЫЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР С ВЫНОСНЫМ ОПТОВОЛОКОННЫМ ЗОНДОМ

А.А. Балашов

В.А. Вагин

А.И. Егоров

А.И. Хорохорин

balashov-45@mail.ru

vaguine@mail.ru

egorov.bmstu@gmail.com

sandervan@mail.ru

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
Москва, Российская Федерация

Аннотация

Описан экспериментальный образец инфракрасного фурье-спектрометра, специализированного для работы с оптоволоконными зондами. Прибор позволяет выполнять дистанционные измерения спектральных характеристик исследуемых объектов (различных жидкостей, например, топлив, горюче-смазочных материалов, различных химических реактивов и т. п.), а именно, спектров пропускания, отражения и нарушенного полного внутреннего отражения с помощью инфракрасных оптоволоконных зондов. Рассмотрены состав и устройство оптико-механической и электронной частей предлагаемого фурье-спектрометра и их основных узлов. Приведены результаты тестовых измерений основных спектральных характеристик прибора, а также спектры некоторых веществ, подтверждающие его работоспособность

Ключевые слова

Фурье-спектрометр, интерфейс-спектрометр, параллелограммный механизм, интерферограмма, уголкового отражатель

Поступила в редакцию 25.03.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Введение. Предлагаемый инфракрасный (ИК) фурье-спектрометр с выносным оптоволоконным зондом (рис. 1) предназначен для автоматизированной системы экспресс-идентификации и контроля качества органических соединений (в жидкой фазе) без пробоподготовки, а также для использования в качестве системы контроля и управления в производственных технологических линиях.

Возможность создания такого прибора связана с появлением эффективных оптоволоконных световодов для среднего ИК-диапазона (для спектрального диапазона, используемого в молекулярной спектроскопии; именно в этом диапазоне сосредоточены вращательно-колебательные полосы поглощения большинства исследуемых химических соединений). С помощью соответствующих оптоволоконных зондов ИК-излучение от фурье-спектрометра, направляется в контролируемые зоны технологического процесса, а затем возвращается на фотоприемник прибора, неся информацию об исследуемом веществе. Это и является основным отличием указанного прибора от существующих аналогов.



Рис. 1. ИК фурье-спектрометр с выносным оптоволоконным зондом (в процессе измерения спектров исследуемых жидкостей)

Принципиальная оптическая схема ИК фурье-спектрометра, описывающая расположение и взаимодействие составных частей оптико-механической части прибора, показана на рис. 2 [1].

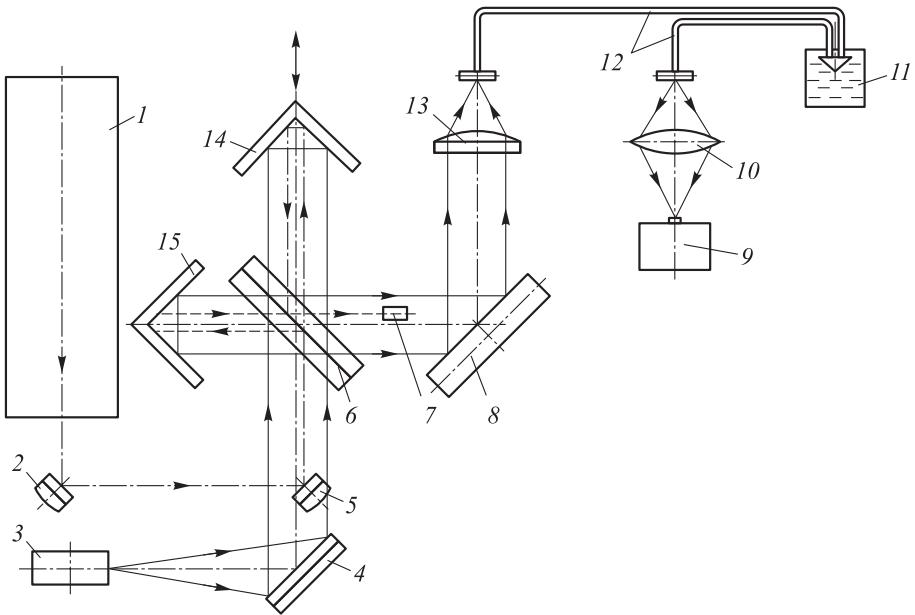


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема оптоволоконного ИК фурье-спектрометра: 1 — гелий-неоновый лазер; 2, 5 — направляющие плоские зеркала референтного излучения; 3 — источник ИК-излучения; 4 — внеосевое параболическое зеркало; 6 — светоделитель; 7 — приемник опорного излучения; 8 — вспомогательное плоское зеркало; 9 — приемник ИК-излучения; 10 — двояковыпуклая линза (из ZnSe); 11 — исследуемый образец; 12 — оптоволоконный зонд; 13 — плоско-выпуклая линза (из ZnSe); 14 — подвижный уголкового зеркальный отражатель; 15 — неподвижный уголкового зеркальный отражатель

Инфракрасное излучение, вышедшее из источника 3 с помощью внеосевого параболического зеркала 4 преобразуется в коллимированный пучок и направляется на вход интерферометра. В интерферометре коллимированный световой поток попадает на светоделитель 6, где распадается на два пучка, идущих на подвижный (14) и неподвижный (15) уголкового зеркальные отражатели. Отразившись от них, излучение возвращается на светоделитель, где интерферирует. Далее проинтерферировавшее излучение с помощью вспомогательного плоского зеркала 8 направляется на линзу 13, фокусирующую излучение из интерферометра на вход оптоволоконного зонда 12. С выхода оптоволоконного зонда исследуемое излучение с помощью линзы 10 фокусируется на приемную площадку приемника ИК-излучения 9. Изменение оптической разности хода в интерферометре осуществляется путем перемещения подвижного уголкового отражателя, закрепленного на специальном параллелограммном механизме. В качестве приемника ИК-излучения использован пироэлектрический или КРТ-приемник.

Контроль текущей разности хода в интерферометре проводят с помощью опорного канала. Излучение от гелий-неонового лазера 1 с помощью двух направляющих плоских зеркал направляется в интерферометр, где оно проходит тот же путь, что и основной пучок ИК-излучения. С выхода интерферометра интерферирующее излучение лазера поступает на приемник опорного излучения 7.

Основные элементы оптоволоконного ИК фурье-спектрометра. *Интерферометр* построен по схеме Майкельсона, в которой вместо плоских зеркал



Рис. 3. Параллелограммное механическое устройство перемещения подвижного отражателя

используют уголкового зеркальные триэдры. Перемещение подвижного отражателя осуществляется с помощью параллелограммного механического устройства (рис. 3).

Светоделитель изготовлен из монокристаллического бромида калия (KBr), прозрачного для излучения в диапазоне длин волн 0,4... 25 мкм. Светоделитель закреплен в механическом конструктиве, обеспечивающим возможность его юстировки.

В качестве *уголковых зеркальных отражателей* используют отражатели Hard-Mounted Hollow Retroreflector™ (НМНР) НМ-20-1, выпускаемые фирмой PLX Inc. (США). Апертура такого отражателя 2 дюйма, точность прямых углов в изделии 1,0".

Уголкового отражатель (зеркальный триэдр) отражает падающее на него излучение строго обратно с точностью, соответствующей точности его изготовления независимо от его наклонов при перемещении. Это позволило создать устройство

перемещения подвижного отражателя с параллелограммным приводом маятникового типа без применения точных направляющих (которые обычно используют в различных вариантах интерферометра Майкельсона) [2–7].

Подвижный уголкового отражатель установлен на параллелограммном механизме перемещения. *Параллелограммный механизм* (устройство перемещения подвижного отражателя маятникового типа) состоит из жесткого каркаса, включающего в себя нижнюю и верхнюю платформы и две боковые стойки (жестко связаны между собой), подвижной платформы уголкового зеркального отражателя, штанг подвеса, привода параллелограммного механизма и демпфирующего магнита.

На нижней плоскости подвижной платформы установлена подвижная часть линейного двигателя. На обратной стороне нижней платформы каркаса закреплен демпфирующий магнит, который гасит различные вибрационные колебания системы.

Перемещение подвижного уголкового отражателя осуществляется с помощью привода параллелограммного механизма — электродинамического двигателя, катушка которого жестко закреплена на нижней платформе каркаса.

Привод параллелограммного механизма со своей системой управления обеспечивает движение подвижного отражателя с постоянной скоростью на рабочем участке и быстрый реверс на его концах.

Плоско-выпуклая линза фокусирует коллимированное излучение, выходящее из интерферометра, на вход оптоволоконного зонда через специальный опторазъем. Линза выполнена из ZnSe — материала, прозрачного в рабочей области фурье-спектрометра. Диаметр линзы 32 мм, фокусное расстояние 50,8 мм.

Двояковыпуклая линза собирает излучение с выхода оптоволоконного зонда и направляет его на приемную площадку приемника ИК-излучения. Линза выполнена из ZnSe. Диаметр линзы 32 мм, фокусное расстояние 25,4 мм.

Приемником референтного канала является германиевый фотодиод ФД10-ГА, источником излучения — гелий-неоновый лазер типа 1507-2,100-240 VAC (JDSU), длина волны 0,6328 мкм.

В предлагаемом ИК фурье-спектрометре с выносным оптоволоконным зондом возможно применять два типа ИК-фотоприемников: пироэлектрический приемник типа P5273 (BAE SYSTEMS, Великобритания); криогенный приемник на основе KPT-сплава типа FTIR-16-1.00 (InfraRed Associted, Inc., США).

Для измерения спектров поглощения жидкостей методом нарушенного полного внутреннего отражения используют *оптоволоконный зонд* (A.R.T. Photonics GmbH, Германия), который пропускает излучение длиной волны 3...18 мкм. Входной конец этого зонда соединен через оптоволоконный разъем с выходом интерферометра, а выходной конец через другой разъем — с фотоприемным устройством прибора. Другие концы оптоволоконных зондов соединены в неразъемный блок с призмой из германия, который при измерениях опускают в исследуемую жидкость.

Основные элементы электронной части прибора. Перечислим основные элементы электронной части прибора: модуль управления двигателем; модуль предварительной обработки и преобразования сигналов (МПОП); модуль питания излучателя.

Модуль управления двигателем предназначен для считывания сигналов датчиков положения и привода перемещения подвижного отражателя интерферометра с постоянной скоростью, а также формирования импульсов референтного канала с частотой, пропорциональной скорости движения отражателя для запуска АЦП модуля предварительной обработки и преобразования сигналов.

Модуль состоит из преобразователя частота/напряжения и ПИД-регулятора скорости перемещения подвижного отражателя. Управляющее напряжение регулятора поступает на линейный двигатель, якорь которого жестко связан с перемещаемым отражателем. Импульсы референтного канала ввиду свойства интерферометра Майкельсона привязаны к меткам прохождения интерферограммы от сигнала He-Ne лазера через ноль, когда подвижный отражатель проходит очередной отрезок пути длиной $\lambda/2$, где λ — длина волны лазера. Это дает точную привязку запуска АЦП к оптической разности хода в интерферометре.

Модуль предварительной обработки и преобразования сигналов (МПОП) предназначен для усиления, фильтрации и преобразования в цифровой код последовательностей выборок аналоговых сигналов с выходов предусилителей пирозлектрического и охлаждаемого приемников и передачи этого кода в компьютер через USB-порт. Модуль включает в себя входной усилитель сигнала основного канала с полосой пропускания $(15...20) \cdot 10^3$ кГц, 18-битный АЦП с диапазоном входного напряжения ± 4 В, восьмиразрядный микроконтроллер семейства AVR и USB-мост (FTDI).

Запуск АЦП осуществляется импульсами референтного канала, поступающими от модуля управления двигателем с частотой, в 2 раза большей частоты референтного канала. Старт регистрации интерферограммы привязан к сигналу, который формируется при достижении подвижным отражателем интерферометра конечного датчика (щелевой оптопары). По окончании регистрации интерферограммы МПОП формирует сигнал, по которому подвижный отражатель возвращается в исходную позицию. USB-мост позволяет осуществлять двунаправленную связь фурье-спектрометра с компьютером. Окно программы управления спектрометром дает возможность передавать в МПОП параметры регистрации перед началом сканирования.

Модуль питания излучателя предназначен для питания излучателя стабилизированным напряжением, что необходимо для обеспечения стабильного светового потока от него.

Экспериментальная проверка работы прибора. Для определения максимального спектрального диапазона работы прибора проведены измерения, в которых проинтерферировавшее ИК-излучение после интерферометра

направлялось на специальную приставку. На приставке установлен внеосевой параболоид, фокусирующий излучение из интерферометра на приемную площадку пироприемника. Пироприемник существенно уступает по чувствительности охлаждаемому КРТ-приемнику, но является широкополосным и поэтому позволяет оценить всю возможную ширину рабочего спектрального диапазона прибора, определяемую только характеристиками светоделителя в интерферометре и источника излучения.

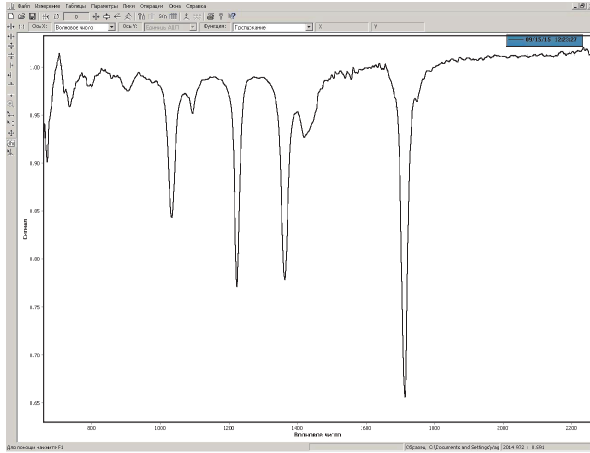
Полученный спектр показал, что максимальный спектральный диапазон работы предлагаемого фурье-спектрометра составляет 2,8...18 мкм (555...3570 см⁻¹) по уровню 10 % максимальной интенсивности. Таким образом, в ИК фурье-спектрометре можно эффективно использовать все существующие для среднего ИК-диапазона оптоволоконные зонды и различные чувствительные (узкополосные) приемники ИК-излучения [8].

Для оценки максимально достигаемого разрешения на таком спектрометре был записан спектр атмосферы с разрешением 1,0 см⁻¹ и исследован измеренный фрагмент вращательно-колебательных полос поглощения углекислого газа шириной 15 мкм. Расстояние между вращательными компонентами этого фрагмента составляет примерно 2 см⁻¹. Полуширина отдельных линий не превышала 1 см⁻¹, поэтому номинальное *спектральное разрешение* на разработанном ИК фурье-спектрометре достигло значения 1,0 см⁻¹.

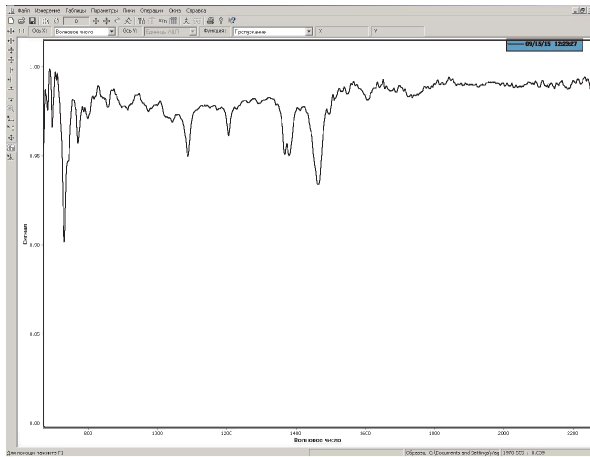
Для оценки *погрешности измерения волновых чисел в спектрах*, регистрируемых с помощью предлагаемого прибора, использована запись спектра поглощения водяного пара в диапазоне 1600...1900 см⁻¹. Данные по положению многих линий поглощения воды в этом диапазоне хорошо известны. Табличные данные по некоторым линиям поглощения атмосферной воды при разрешении 1,0 см⁻¹, а также положения этих линий, измеренных ИК фурье-спектрометром, приведены в таблице. Представленные данные демонстрируют, что измеренные значения совпадают с табличными с точностью не менее ± 0,05 см⁻¹.

Погрешности измерения волновых чисел в спектрах

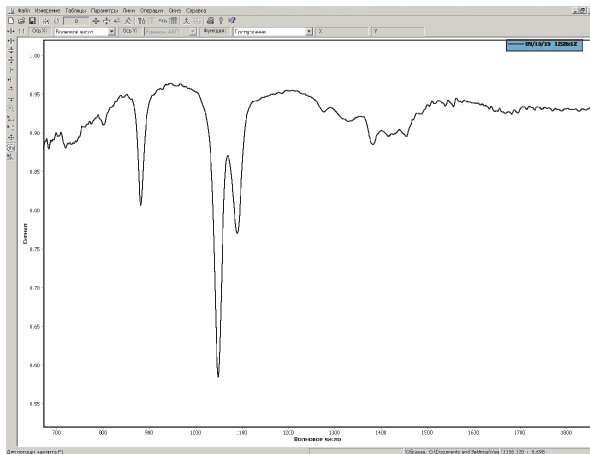
Номер линии	Значения положений линий поглощения воды	
	Табличные	Измеренные
1	1889,6	1889,55
3	1844,2	1844,22
13	1761,9	1761,81
14	1756,8	1756,78
16	1739,8	1739,83
26	1695,9	1695,85
31	1662,8	1662,78
37	1627,8	1627,81
38	1616,7	1616,73



а



б



в

Рис. 4. Спектры НПВО ацетона (*а*), бензина (*б*) и этилового спирта (*в*)

В ходе экспериментальной проверки прибора записаны спектры поглощения некоторых жидкостей (спирт, ацетон, бензин) в режиме нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) со стандартным оптоволоконным зондом и призмой из германия (см. рис. 1).

Анализ спектров (рис. 4) показал работоспособность экспериментального образца ИК фурье-спектрометра с выносным оптоволоконным зондом и продемонстрировал реальную возможность измерения с его помощью спектров без пробоподготовки образцов и спектров образцов, расположенных на расстоянии до 1 м от прибора (расстояние определяется длиной зонда).

Заключение. Предлагаемый ИК фурье-спектрометр не имеет аналогов в России и серийных аналогов за рубежом. Максимальный спектральный диапазон работы прибора 2,8...18 мкм ($555...3570\text{ см}^{-1}$) по уровню 10 % максимальной интенсивности. Это позволяет эффективно использовать существующие для среднего ИК-диапазона оптоволоконные зонды и различные чувствительные (узкополосные) приемники ИК-излучения. Основные технические характеристики прибора:

- предельное спектральное разрешение $1,0\text{ см}^{-1}$;
- погрешность измерения волновых чисел в пределах $\pm 0,1\text{ см}^{-1}$;
- пиковое отклонение линии стопроцентного пропускания в рабочем диапазоне волновых чисел не превышает 2 %;
- время установки рабочего режима прибора не более 15 мин;
- масса 10 кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. № 157021 РФ. Балашов А.А., Вагин В.А., Хорохорин А.И. Фурье-спектрометр. Полезная модель. 2015. Бюл. № 32.
2. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы фурье-радиометрии. М.: Наука, 2014. 275 с.
3. Результаты экспериментальных исследований панорамного инфракрасного фурье-спектрометра / С.В. Башкин, А.Ю. Бойко, В.Н. Корниенко, И.В. Кочкиков, М.В. Лельков, А.И. Миронов, А.Н. Морозов, А.А. Позвонков, А.С. Самородов, С.И. Светличный, С.Е. Табалин, И.Л. Фуфурин, П.Е. Шлыгин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 2. С. 51–64.
DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-51-64
4. Портативный фурье-спектрометр с неохлаждаемым фотоприемником / С.К. Дворук, В.Н. Корниенко, И.В. Кочкиков, М.В. Лельков, А.Н. Морозов, М.Л. Поздышев, С.И. Светличный, С.Е. Табалин // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 11. С. 67–72.
5. Фурье-спектрометр с линейным приводом / А.А. Балашов, В.А. Вагин, А.И. Егоров, Б.Е. Мошкин, И.Н. Нестерук, А.И. Хорохорин // Радиооптика. Электрон. журн. 2015. № 6. DOI: 10.7463/rdopt.0615.0820839 URL: <http://radiooptics.ru/doc/820839.html>
6. Фурье-спектрометры непрерывного сканирования / А.А. Балашов, В.А. Вагин, А.В. Висковатых, Г.Н. Жижин, В.И. Пустовойт, А.И. Хорохорин // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 9. С. 70–82.

7. Вагин В.А. ИК фурье-спектрометры для научных исследований и прикладных применений. Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2009. 239 с.

8. Spragg R.A. IR Spectrometers. Encyclopedia of spectroscopy and spectrometry. Second Edition. 2010. С. 1199–1209. DOI: 10.1016/B978-0-12-374413-5.00088-9

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123744135000889>

Балашов Анатолий Александрович — д-р техн. наук, главный научный сотрудник НТЦ УП РАН (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 15).

Вагин Василий Алексеевич — д-р техн. наук, заведующий отделом НТЦ УП РАН (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 15).

Егоров Александр Игоревич — инженер-исследователь НТЦ УП РАН (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 15).

Хорохорин Александр Иванович — старший научный сотрудник НТЦ УП РАН (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 15).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Балашов А.А., Вагин В.А., Егоров А.И., Хорохорин А.И. Инфракрасный фурье-спектрометр с выносным оптоволоконным зондом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 5. С. 4–13. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-4-13

INFRARED FOURIER SPECTROMETER WITH REMOTE FIBER PROBE

A.A. Balashov

V.A. Vagin

A.I. Egorov

A.I. Khorokhorin

balashov-45@mail.ru

vaguine@mail.ru

egorov.bmstu@gmail.com

sandervan@mail.ru

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract

This article describes an experimental Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer equipped with fiber optic probes. The device enables to measure remotely the spectral characteristics of objects under study (various fluids, such as fuels, lubricants, various chemicals, etc.) using infrared fiber optic probe. The measurements are, namely, the transmission, reflection and attenuated total reflection spectra. The authors analyze the composition and arrangement of optical-mechanical and electronic parts of the proposed Fourier spectrometer, and their main units. The results of test measurements of basic spectral characteristics of the instrument, and also the recorded spectra of known substances show the operating capability of such a device

Keywords

Fourier spectrometer, interferometer, parallelogram mechanism, interferogram, corner reflector

REFERENCES

[1] Balashov A.A., Vagin V.A., Khorokhorin A.I. Fur'e-spektrometr [Fourier spectrometer]. Pat. RF no. 157021, 2015.

[2] Morozov A.N., Svetlichnyy S.I. *Osnovy fur'e-spektroradiometrii* [Basics of Fourier Spectroradiometry]. Moscow, Nauka Publ., 2014. 456 p.

[3] Bashkin S.V., Boyko A.Yu., Kornienko V.N., Kochikov I.V., Lel'kov M.V., Mironov A.I., Morozov A.N., Pozvonkov A.A., Samorodov A.S., Svetlichnyy S.I., Tabalin S.E., Fufurin I.L., Shlygin P.E. Experimental results of investigating panoramic Fourier transform infrared spectrometer. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 2, pp. 51–64 (in Russ.).
DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-51-64

[4] Dvoruk S.K., Kornienko V.N., Kochikov I.V., Lel'kov M.V., Morozov A.N., Pozdyshev M.L., Svetlichnyy S.I., Tabalin S.E. Portable Fourier spectroradiometer with an uncooled photodetector. *J. Opt. Technol.*, 2006, vol. 73, no. 11, pp. 797–801.
DOI: 10.1364/JOT.73.000797

[5] Balashov A.A., Vagin V.A., Egorov A.I., Moshkin B.E., Nesteruk I.N., Khorokhorin A.I. Fourier spectrometer with a linear actuator. *Radiooptika* [Radiooptics. Electronic Journal], 2015, no. 6.
DOI: 10.7463/rdopt.0615.0820839 Available at: <http://radiooptics.ru/en/doc/820839.html>

[6] Balashov A.A., Vagin V.A., Viskovatykh A.V., Zhizhin G.N., Pustovoyt V.I., Khorokhorin A.I. Fourier spectrometers for continuous scanning. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of modern radioelectronics], 2006, no. 9, pp. 70–82 (in Russ.).

[7] Vagin V.A. *IK fur'e-spektrometry dlya nauchnykh issledovaniy i prikladnykh primeneniy*. Diss. dokt. tekhn. nauk [IR Fourier spectrometers for research and practical use. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2009. 239 p.

[8] Spragg R.A. IR Spectrometers. *Encyclopedia of spectroscopy and spectrometry*. Second Edition. 2010. C. 1199–1209. DOI: 10.1016/B978-0-12-374413-5.00088-9 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123744135000889>

Balashov A.A. — Dr. Sci. (Eng.), leading researcher of the Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Russian Academy of Sciences (ul. Butlerova 15, Moscow, 117342 Russian Federation).

Vagin V.A. — Dr. Sci. (Eng.), Head of the department of the Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Russian Academy of Sciences (ul. Butlerova 15, Moscow, 117342 Russian Federation).

Egorov A.I. — research engineer of the Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Russian Academy of Sciences (ul. Butlerova 15, Moscow, 117342 Russian Federation).

Khorokhorin A.I. — senior researcher of the Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Russian Academy of Sciences (ul. Butlerova 15, Moscow, 117342 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Balashov A.A., Vagin V.A., Egorov A.I., Khorokhorin A.I. Infrared Fourier Spectrometer with Remote Fiber Probe. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 5, pp. 4–13.
DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-4-13