

УДК 535.343

UDC 535.343

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ*

REALIZATION OF THE METHOD OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY DURING IMPULSE RECORDING OF HOLOGRAMS IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS

И. Г. Даденков,

*стажер младшего научного сотрудника
кафедры лазерной физики
и спектроскопии БГУ;*

А. Л. Толстик,

*кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник НИУ «Институт
прикладных физических проблем
имени А. Н. Севченко» БГУ;*

Ю. И. Миксюк,

*кандидат физико-математических наук,
доцент, директор УО «Республиканский
институт контроля знаний»;*

К. А. Саечников,

*кандидат физико-математических
наук, доцент, доцент кафедры физики
и методики преподавания физики
Белорусского государственного
педагогического университета
имени Максима Танка*

I. Dadenkov,

*Intern of Junior Researcher
of the Department of Laser Physics
and Spectroscopy, BSU;*

A. Tolstik,

*PhD in Physics and Mathematics,
Researcher of NRU "Institute
of Applied Physical Problems named
after A. Sevchenko", BSU;*

Yu. Miksyuk,

*PhD in Physics and Mathematics,
Associate Professor of EE "Republican
Institute of Control of Knowledge";*

K. Sayechnikov,

*PhD in Physics and Mathematics,
Associate Professor, Associate
Professor of the Department of Physics
and Methods of Teaching Physics,
Belarusian State Pedagogical University
named after Maxim Tank*

Поступила в редакцию 04.06.21.

Received on 04.06.21.

Реализована схема голографической интерферометрии в реальном времени с использованием кристаллов семейства силленитов. На примере регистрации турбулентных потоков воздуха впервые продемонстрирована возможность использования последовательности наносекундных лазерных импульсов интенсивностью на уровне МВт/см² в качестве записывающего голограмму излучения. Продemonстрирована чувствительность предложенной схемы интерферометрии на уровне изменения показателя преломления $\Delta n \approx 10^{-4} - 10^{-5}$, что позволяет фиксировать изменение температуры воздуха на уровне десятков градусов. *Ключевые слова:* фоторефрактивные кристаллы, титанат висмута, динамические решетки, голографическая интерферометрия, импульсная запись.

A scheme of real-time holographic interferometry using crystals of the sillenite family has been implemented. By the example of recording turbulent air flows, the possibility of using a sequence of nanosecond laser pulses with an intensity at the level of MW/cm² as a hologram-recording radiation has been demonstrated for the first time. The sensitivity of the proposed interferometry scheme is demonstrated at the level of the refractive index change of $\Delta n \approx 10^{-4} - 10^{-5}$, which makes it possible to record the change in air temperature at the level of tens degrees.

Keywords: photorefractive crystals, bismuth titanate, dynamic grids, holographic interferometry, impulse recording.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (№ г.р. 20211208).

Введение. Хорошо известно широкое применение лазерной интерферометрии в различных областях деятельности человека для детектирования сверхмалых физических величин, таких как деформации и колебания исследуемых объектов. Применение интерферометрических принципов в построении оптических измерительных систем позволяет фиксировать изменения расстояний, сопоставимые с длиной световой волны, и является одним из немногих известных способов неразрушающего исследования материалов. Использование волоконно-оптических интерферометров позволяет создавать измерительные системы, способные работать во внелабораторных условиях и регистрировать изменения физических величин [1].

Интересные возможности применения имеет область исследования, называемая голографической интерферометрией [2]. Например, голографический интерференционный микроскоп предназначен для измерения параметров микрообъектов [3]. Голографические интерферометры обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными лазерными интерферометрами. Так, голографическая интерферометрия позволяет исследовать предметы неправильной формы. Кроме того, она дает возможность изучать трехмерные объекты. Следующим преимуществом голографической интерферометрии перед классической является отсутствие необходимости принимать во внимание оптические аберрации. В то же время недостатком голографической интерферометрии является достаточно сложный анализ голографических интерференционных картин. Весьма эффективным оказалось использование фоторефрактивных кристаллов при построении голографических интерферометров [4].

Отличительной особенностью кристаллов семейства силленитов является сравнительно небольшое время жизни записанных голограмм, что дает возможность исследовать различные объекты, используя многократную запись голограмм в одной и той же области кристалла. Также стоит отметить

возможность использования сравнительно небольших интенсивностей записывающих волн, в условиях записи долгоживущих голограмм со временем жизни на уровне секунд.

Целью работы являлась разработка и реализация схемы голографической лазерной интерферометрии в реальном времени с использованием кристаллов семейства силленитов на примере регистрации турбулентных потоков воздуха.

Экспериментальная установка и объекты исследований. Для записи динамических голограмм использовалась вторая гармоника (532 нм) лазера на иттрий-алюминиевом гранате 1, работающего с частотой следования импульсов 5 или 10 Гц. Полуволновая пластинка 3 задавала плоскость поляризации лазерного излучения перпендикулярно плоскости записи голограмм. Полупрозрачное зеркало 8 разделяло лазерный пучок на два, обеспечивая формирование опорной и сигнальной волн. Сигнальная волна, прежде чем отразиться от зеркала 6, проходила фазовый объект 12, в качестве которого использовался воздух, нагретый при помощи свечи. Пламя свечи обеспечивало турбулентные воздушные потоки, которые вносили пространственно-неоднородные искажения в фазу сигнальной волны. Запись голограмм была реализована в фоторефрактивном кристалле титаната висмута 9. Считывание записанных голограмм осуществлялось излучением гелий-неонового лазера 2 на длине волны 632,8 нм. Направление распространения считывающей волны выбиралось исходя из условия Брэгга для объемных голограмм. Регистрация дифрагированного излучения проводилась ПЗС-камерой 11, обеспечивающей запись до 20 кадров в секунду.

Возможность реализации интерферометрического метода контроля и диагностики обеспечивается выбором условий записи голографических решеток со временами жизни порядка секунды, которые достигаются при интенсивностях порядка 1 МВт/см². Оптическая схема записи голограмм представлена на рисунке 1.

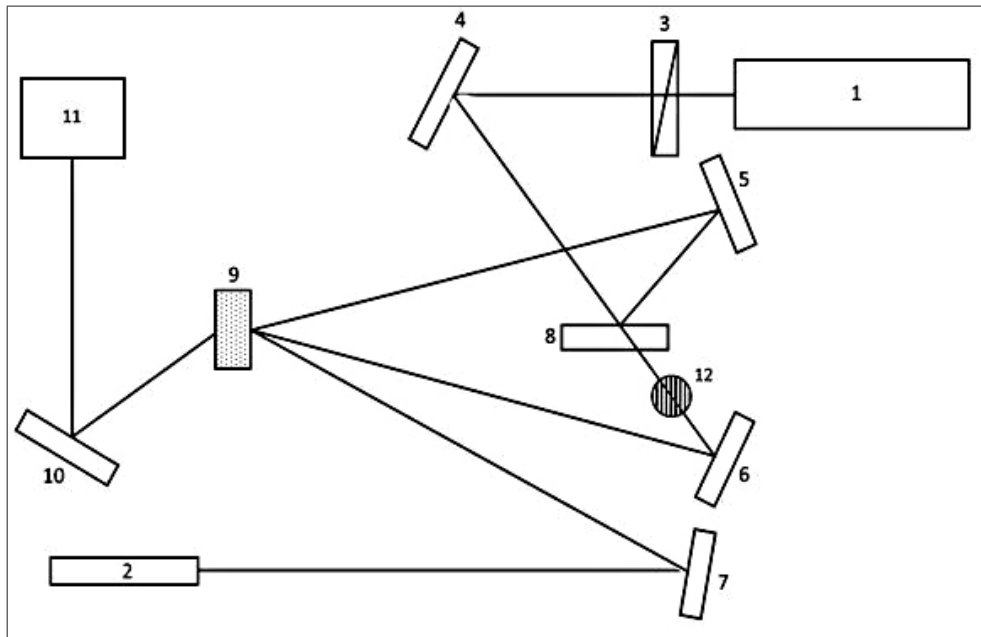


Рисунок 1. – Схема экспериментальной установки:
 1 – лазер на иттрий-алюминиевом гранате; 2 – гелий-неоновый лазер;
 3 – полуволновая пластинка; 4–8, 10 – зеркала; 9 – фоторефрактивный кристалл титаната висмута; 11 – ПЗС-камера; 12 – фазовый объект.

Результаты и их обсуждение. При стационарных условиях горения свечи в открытом помещении устанавливаются ламинарные потоки горячего воздуха и в фото-

рефрактивном кристалле записывается динамическая голограмма, которая постоянно обновляется.

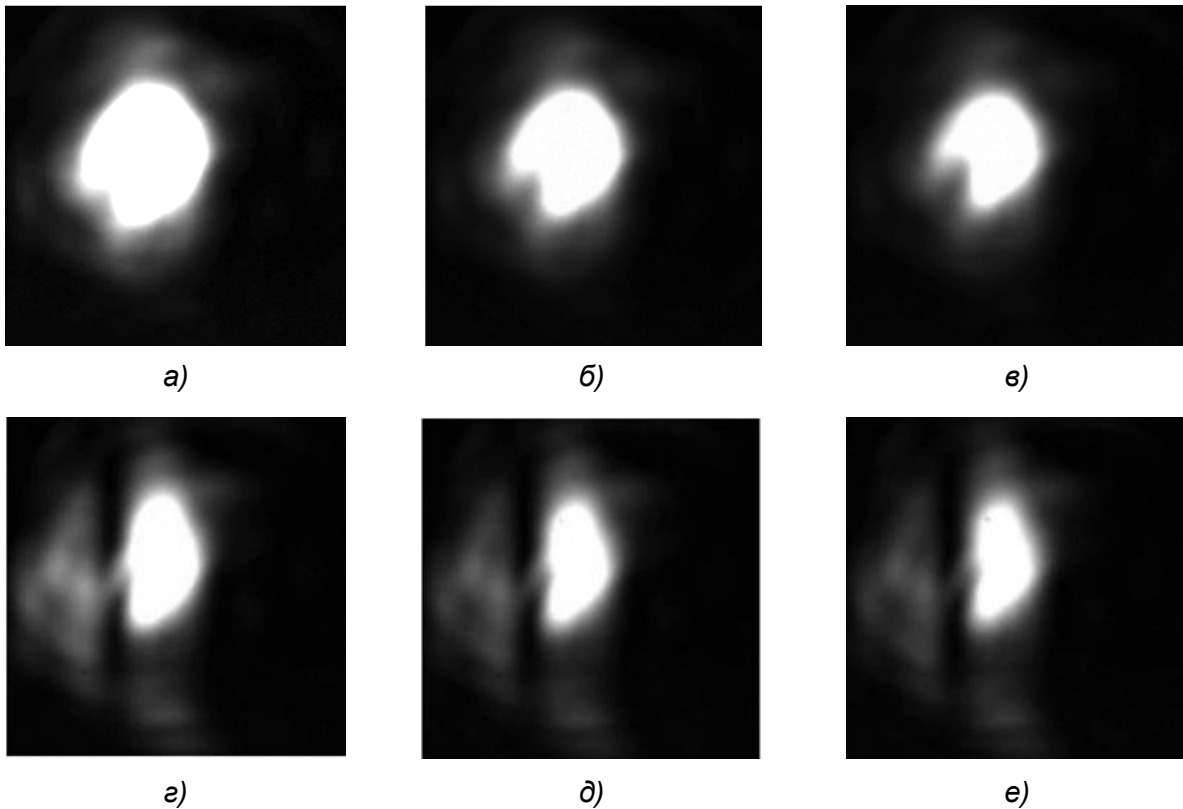


Рисунок 2. – Зарегистрированные изображения дифрагированного пучка в условиях стационарной записи голограммы (а–в), при внесении возмущений в фазовый объект (г–е); частота следования импульсов 5 Гц

При считывании такой голограммы излучением гелий-неонового лазера мы видим слегка деформированный пучок. Такая ситуация иллюстрируется на рисунке 2 (а–в). Видно уменьшение размера пучка на каждой последующей картинке, что объясняется релаксацией динамической решетки (в данном эксперименте частота следования лазерных импульсов 5 Гц, регистрация изображений велась с частотой 20 Гц). Если внести дополнительное возмущение (турбулентность) в воздушные потоки, идущие от свечи, то имеет место интерференция между первоначальным и возмущенным изображениями. Эффект интерференции проявляется в появлении вертикальной темной полосы на фоне светового пучка, что иллюстрируется на рисунке 2 (г–е).

Спустя несколько импульсов имеет место перезапись динамической голограммы и вертикальная темная полоса стирается. В этом случае, как и в предыдущих, также заметен эффект релаксации динамической ре-

шетки, проявляющийся в уменьшении размера изображения на последующих кадрах.

Подобная ситуация наблюдалась и в другой серии экспериментов. Так, на рисунке 3 представлены изображения дифрагированного пучка в стационарных условиях горения свечи (а–в) и при внесении фазовой турбулентности (г–е).

Теперь рассмотрим изображения, полученные при следовании импульсов 10 Гц. Из положительных моментов использования более высокой частоты лазерных импульсов следует отметить, что дифракционные эффективности последовательных решеток оказываются примерно одинаковыми, так как решетка не успевает релаксировать за 100 мс. Однако к недостаткам относятся меньшие изменения фронта сигнальной волны за время 100 мс по сравнению с 200 мс, при этом камера, работающая на частоте 20 кадров в секунду, позволяет зафиксировать только два изображения на каждый новый этап записи.

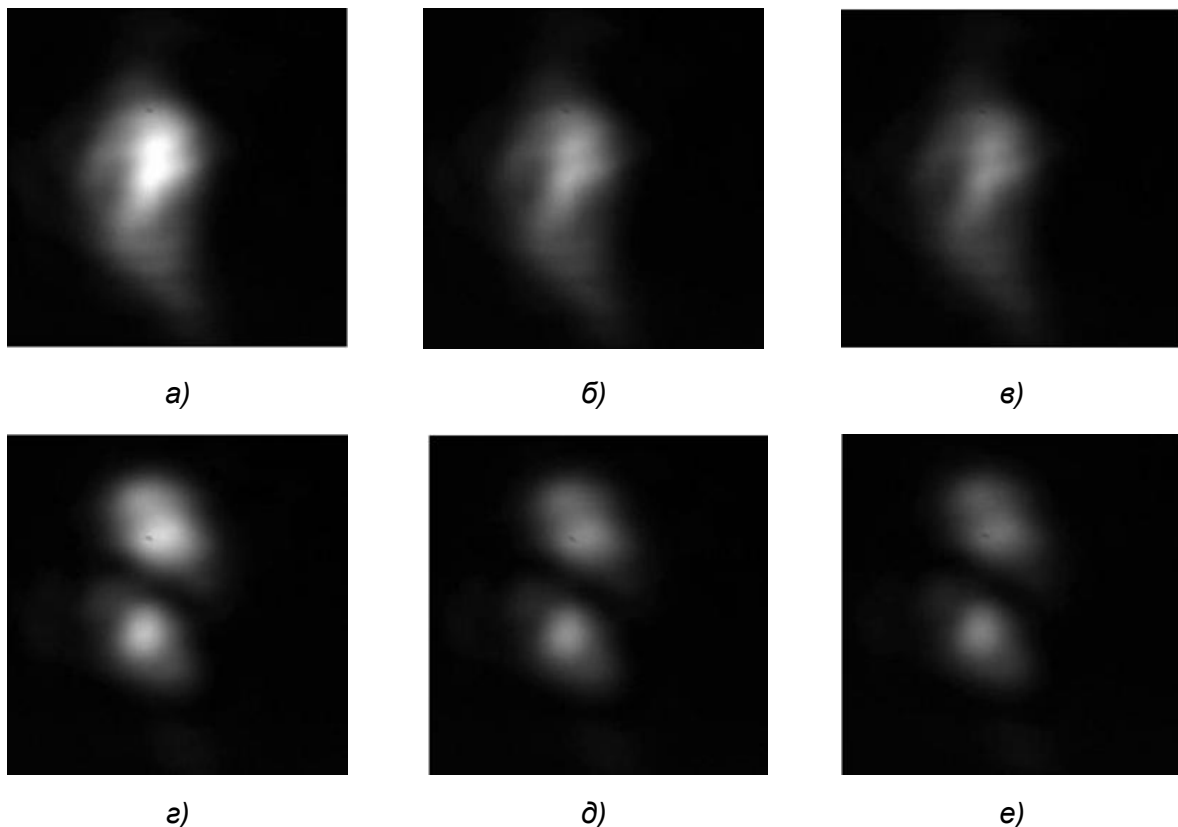


Рисунок 3. – Зарегистрированные изображения дифрагированного пучка в условиях стационарной записи голограммы (а–в) и при внесении возмущений в фазовый объект (г–е); частота следования импульсов 5 Гц

Как можно заметить на рисунке 4 (в, г) при внесении фазовой турбулентности на фоне дифрагированного пучка регистрируется

ярко выраженная темная полоса (интерференционный минимум), демонстрирующая эффект интерференции двух изображений

с различающейся пространственной модуляцией фазы.

Как видно из зарегистрированных интерферограмм, в области дифрагированного пучка гелий-неонового лазера наблюдается одна темная полоса. Такая ситуация определяет пространственно-неоднородное изменение фазового набега на уровне π , следо-

вательно, изменение оптической длины пути можно выразить формулой:

$$\Delta nL \approx \lambda / 2, \quad (1),$$

где Δn – изменение показателя преломления, L – толщина, λ – длина волны зондирующего излучения.

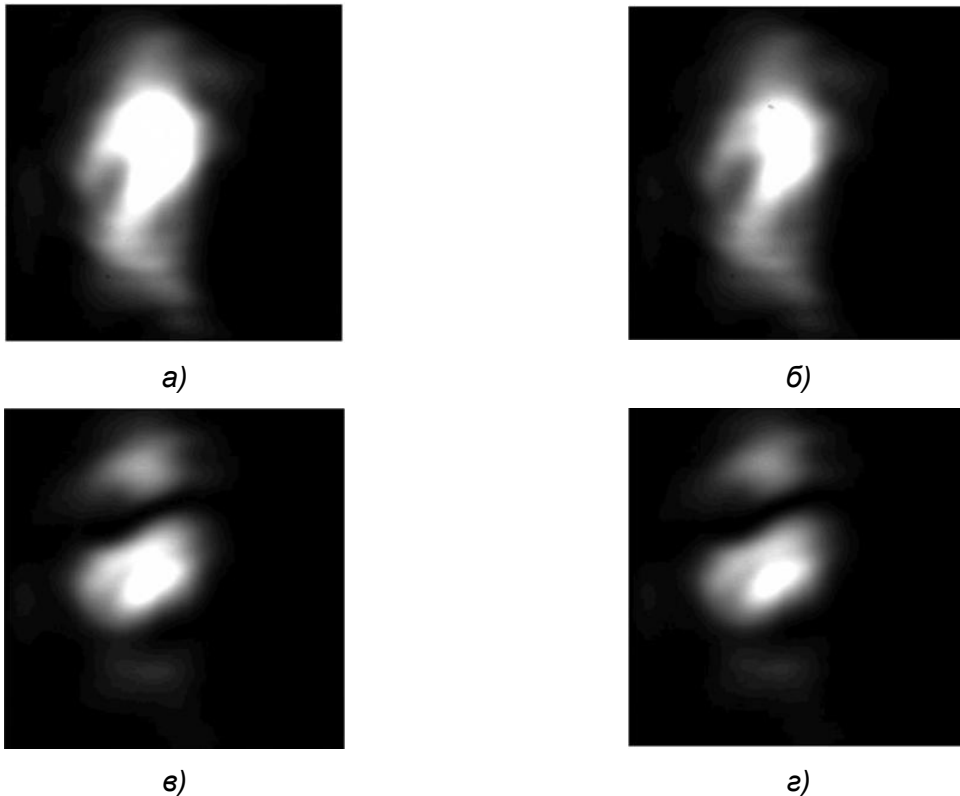


Рисунок 4. – Зарегистрированные изображения дифрагированного пучка в условиях стационарной записи голограммы (а, б) и при внесении возмущений в фазовый объект (в, г); частота следования импульсов 10 Гц

Взяв длину волны генерации гелий-неонового лазера 632,8 нм, ширину нагретой области ~ 1 см из соотношения (1) имеем $\Delta n \approx 0,32 \cdot 10^{-4}$.

Учитывая, что изменение показателя преломления происходит за счет нагрева воздуха, для оценки полученных результатов воспользуемся известной формулой, связывающей изменение показателя преломления с давлением и температурой [5]:

$$(n_0 - 1) = (n - 1) \frac{P_0 T}{P T_0}, \quad (2),$$

где n_0 – значение показателя преломления воздуха при нормальных условиях (давление $P_0 = 101\,325$ Па (1 атм, 760 мм рт. ст.),

температура $T_0 = 273.15$ К (то есть 0°C), n , P , T – текущие значения показателя преломления, давления и температуры. Следует отметить, что в условиях эксперимента происходит выравнивание давления, так как все находится в открытой атмосфере.

Учитывая, что $n_0 = 1,00027$, можно рассчитать значение показателя преломления при комнатной температуре $T = 295$ К:

$$(n - 1) = (n_0 - 1) \frac{P T_0}{P_0 T}, \quad (3),$$

откуда следует, что $(n - 1) = 0,00025$.

Используя экспериментально определенное из зарегистрированных интерферо-

грамм значение изменения показателя преломления $\Delta n \approx 0,32 \cdot 10^{-4}$, получаем, что для нагретой области $(n - 1) = 0,000218$.

Теперь, преобразовав формулу (2) к виду:

$$T = \frac{(n_0 - 1)}{(n - 1)} T_0, \quad (4)$$

можно рассчитать температуру в нагретой области. Подставив значение $n_0 = 1,00027$ и $(n - 1) = 0,00025$, имеем $T \approx 338$ К, то есть 650 °С.

Заключение. Таким образом, методом голографической интерферометрии в ре-

альном времени с использованием кристалла титаната висмута на примере регистрации турбулентных потоков воздуха впервые продемонстрирована возможность использования последовательности наносекундных лазерных импульсов интенсивностью на уровне МВт/см² в качестве записывающего голограмму излучения. Продемонстрирована чувствительность предложенной схемы интерферометрии на уровне изменения показателя преломления $\Delta n \approx 10^{-4} - 10^{-5}$, которая позволяет дистанционно фиксировать изменение температуры воздуха на уровне градусов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашко, Р. В. Адаптивные волоконно-оптические измерительные системы / Р. В. Ромашко, Ю. Н. Кульчин // Вестник ДВО РАН. – 2006. – № 4. – С. 94–99.
2. Островский, Ю. И. Голографическая интерферометрия / Ю. И. Островский, М. М. Бутусов, Г. В. Островская. – М. : Наука, 1977. – 336 с.
3. Оптическая голография: Практические применения / Е. А. Антонов [и др.]; под ред. В. М. Гинзбург, Б. М. Степанова. – М. : Сов. Радио, 1978. – 240 с.
4. Ромашко, Р. В. Физические основы построения сверхвысокочувствительных адаптивных измерительных систем на основе динамических голограмм: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.21 / Р. В. Ромашко. – Владивосток, 2010. – 309 с.
5. Ляликов, Ю. С. Физико-химические методы анализа / Ю. С. Ляликов. – М. : Химия, 1964. – 28 с.

REFERENCES

1. Romashko, R. V. Adaptivnye volokonno-opticheskie izmeritel'nye sistemy / R. V. Romashko, Yu. N. Kul'chin // Vestnik DVO RAN. – 2006. – № 4. – S. 94–99.
2. Ostrovskij, Yu. I. Golograficheskaya interferometriya / Yu. I. Ostrovskij, M. M. Butusov, G. V. Ostrovskaya. – M. : Nauka, 1977. – 336 s.
3. Opticheskaya golografiya: Prakticheskie primeneniya / E. A. Antonov [i dr.]; pod red. V. M. Ginzburg, B. M. Stepanova. – M. : Sov. Radio, 1978. – 240 s.
4. Romashko, R. V. Fizicheskie osnovy postroeniya sverhvysokochuvstvitel'nyh adaptivnyh izmeritel'nyh sistem na osnove dinamicheskikh gologramm: dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk: 01.04.21 / R. V. Romashko. – Vladivostok, 2010. – 309 s.
5. Lyalikov, Yu. S. Fiziko-himicheskie metody analiza / Yu. S. Lyalikov. – M. : Himiya, 1964. – 28 s.