УДК 535.34+621.373.826

СВЕТОДИОДНЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Канд. физ.-мат. наук, доц. ФИРАГО В. А., ДРОЗД С. Н., докт. техн. наук, проф. ВУЙЦИК В., докт. физ.-мат. наук, проф. КУГЕЙКО М. М., канд. физ.-мат. наук, доц. МАНАК И. С.

Белорусский государственный университет

Одним из направлений экономии топливных ресурсов является оптимизация процессов сгорания топлива в системах тепло- и энергоснабжения. В настоящий момент режимы горения оптимизируются периодически. Для этого используются приборы, позволяющие определить в процессе наладочных работ содержание кислорода и CO в дымовых газах котлов. Составляются режимные карты, на основании которых поддерживают режимы горения при различных нагрузках. При такой схеме небольшие отклонения от оптимальных режимов приводят к перерасходу топлива, особенно на предприятиях теплоснабжения. Организация автоматического регулирования процессов горения топлива с использованием непрерывного контроля концентрации кислорода и угарного газа в дымовых газах котлов позволяет экономить 2…8 % топлива на котельных и 0,1…0,3 % – на ТЭЦ, что делает актуальным создание соответствующих газоаналитических средств. В созданных в последнее время приборах для непрерывного контроля концентрации CO (АГТСО) и O_2 (АГТO_2) используются электрохимические датчики, которые работоспособны лишь в чистых бинарных или квазибинарных газовых средах. В более сложных условиях их применение неэффективно вследствие низкой селективности. Заметим, что в процессе непрерывной эксплуатации электрохимических датчиков в таких агрессивных и влагосодержащих средах, как дымовые газы котлов, наблюдается деградация их характеристик, вызываемая осаждением на поверхности датчика различных загрязняющих компонент и ухудшением диффузии молекул анализируемого газа в чувствительный слой сенсора, что требует частой калибровки прибора. Широкое применение в теплоэнергетике для экономии топлива могут найти лишь недорогие газоаналитические средства с низкими затратами на техническое обслуживание и периодические поверки.

Очевидно, что для надежного непрерывного контроля состава дымовых газов необходимо использовать оптические методы, не требующие непо-

средственного контакта излучающих и фоточувствительных элементов с контролируемой средой. Наиболее перспективные из них основаны на использовании лазерной [1, 2] и светодиодной абсорбционной спектроскопии в инфракрасной области спектра. Эти методы представляют большой интерес для практических приложений, поскольку могут использовать недорогие малогабаритные полупроводниковые инжекционные лазеры и светодиоды, не требующие криогенного охлаждения, что позволяет создавать надежные в эксплуатации газоаналитические датчики с малым энергопотреблением.

Светодиодные газоаналитические датчики. Светодиоды дешевле, но по сравнению с лазерами они имеют широкий спектр излучения и поэтому худшие значения пороговой чувствительности и селективности контроля. При использовании простейшего интегрального способа измерения концентрации газов возможные изменения ватт-амперной характеристики светодиода или чувствительности фотоприемника будут вызывать погрешности контроля. Влияние на точность измерений оказывают и случайные вариации коэффициента диссипативных потерь, определяемые как загрязнениями оптических поверхностей, так и наличием на контролируемом промежутке аэрозольных частиц. Это приведет к необходимости частой калибровки и усложнению аппаратуры, поскольку в состав прибора необходимо дополнительно вводить образцовую среду и средства ее помещения в измерительный канал.

Для исключения этих недостатков обычно используют дифференциальный способ измерений. К его недостаткам можно отнести сложность оптико-механического блока и некоторое снижение отношения сигнал/шум за счет сужения спектральных интервалов измерительного и опорного каналов. Более существенным изъяном является невысокая селективность дифференциального метода. В промышленности в основном требуется вести непрерывный контроль состава сложных аэродисперсных сред, поэтому хорошая селективность контроля является непременным условием. При определении же дифференциальным методом концентрации CO непосредственно в потоке дымовых газов с температурой 373 K и обычным содержанием CO_2 10 % и паров H_2O 20 % от объема пороговая чувствительность ограничена воздействием вариаций их концентраций на результаты измерений и недостаточна для использования в средствах автоматического управления процессами сжигания топлива. Это влияние возникает из-за перекрытия спектров поглощения. На рис. 1 пред-

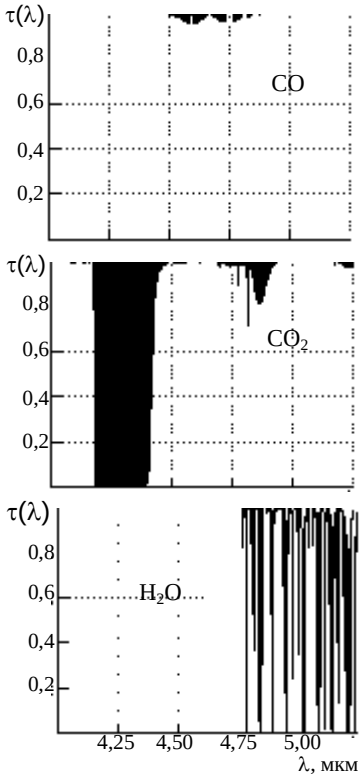

Рис. 1. Спектры пропускания основных компонентов дымовых газов котлов

ставлены спектры поглощения CO при концентрации 10^{-3} % от объема, а также CO_2 и H_2O при концентрациях и температуре, указанных выше, и нормальном давлении. Спектры получены с помощью базы данных по линиям поглощения газов HITRAN. Длина контролируемого участка дымового потока составляет 1 м.

Для повышения селективности контроля предлагается использовать корреляционные методы [3, 4], основанные на уникальности спектров поглощения каждой компоненты. Хотя спектры поглощения разных газов контролируемой среды могут перекрываться, их взаимная корреляция из-за разных расстояний между линиями поглощения для разных компонент мала, что позволяет в десятки раз повысить селективность анализа. Существенным достоинством корреляционных методов является возможность использования более широких по сравнению с дифференциальными способами спектральных интервалов регистрации излучения, что увеличивает отношение сигнал/шум и позволяет применять как неохлаждаемые приемники излучения с невысокой пороговой чувствительностью, так и светодиоды, которые имеют малую мощность излучения, особенно на длинах волн более 4 мкм. Функциональная схема предлагаемого светодиодного недисперсионного корреляционного измерителя концентрации CO в дымовых газах котлов приведена на рис. 2.

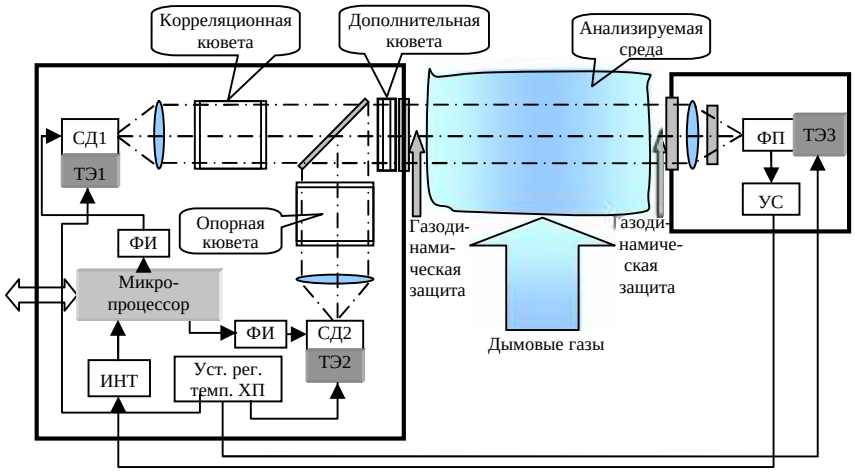

Рис. 2. Функциональная схема корреляционного газоанализатора CO: ФП – фотоприемник; УС – усилитель; ИНТ – интегратор; ФИ – формирователь импульсов тока инжекции светодиода; ТЭ – термоэлектрический холодильник; СД – светодиоды

Импульс излучения первого светодиода коллимируется оптической системой и проходит через корреляционную кювету, содержащую CO, после чего направляется на контролируемый участок, проходя через дымовые газы. Приемная оптическая система собирает модулированный поток на чувствительную площадку фотоприемника. При прохождении корреляционной кюветы наблюдается сильное поглощение спектральных составляющих потока излучения первого светодиода, совпадающих с линиями поглощения CO, что хорошо видно из рис. 3. Поэтому эти спектральные составляющие после корреляционной кюветы практически отсутствуют и резонансное поглощение CO дымовых газов не дает вклада в сигнал фото-

приемника от первого светодиода. Поскольку опорная кювета не содержит CO, поток от второго светодиода при прохождении через дымовые газы резонансно ослабляется за счет поглощения оксидом углерода, что вызывает зависимость амплитуды его сигнала на выходе фотоприемника от концентрации CO.

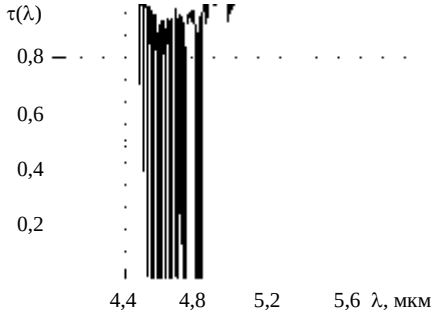

Рис. 3. Пропускание излучения светодиода корреляционной кюветой при оптимальном значении концентрации в ней CO

Рассмотрим работу корреляционного датчика CO и способы устранения влияния на погрешности измерений диссипативных потерь. Излучение первого светодиода проходит через коллимирующую линзу, корреляционную кювету, полупрозрачное зеркало, расположенное под углом 45° к оптической оси системы, дополнительную кювету с CO_2, контролируемую среду, оптический фильтр и собирается приемной линзой на чувствительной площадке фотоприемника. Излучение второго светодиода после прохождения нейтральной кюветы поворачивается полупрозрачным зеркалом под углом 90° и далее идет по тому же пути, что и излучение первого светодиода. Дополнительная кювета может использоваться, например, для ослабления влияния вариаций концентрации CO_2 путем исключения из спектра зондирующего излучения соответствующих составляющих, которые поглощаются находящимся в ней CO_2. Поскольку эта кювета одинаково ослабляет оба потока, ее влияние можно не учитывать. Потоки от светодиодов, прошедшие через кюветы, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Phi_{k1}(\lambda) &= \Phi_1(\lambda)\tau_{k1}(\lambda)\exp[-k(\lambda)p_{k1}l_1]; \\ \Phi_{k2}(\lambda) &= \Phi_2(\lambda)\tau_{k2}(\lambda)\exp[-k(\lambda)p_{k2}l_2], \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\Phi_1(\lambda)$ и $\Phi_2(\lambda)$ – потоки излучения от светодиодов; τ_{k1}, τ_{k2} – коэффициенты пропускания окон кювет и полупрозрачного зеркала; $k(\lambda)$ – коэффициент поглощения контролируемого газа; $p_{k1}l_1$, $p_{k2}l_2$ – произведения парциального давления газов в кюветах на их длины.

При дальнейшем прохождении потоков через полупрозрачное зеркало (или отражении от него), первое защитное стекло, анализируемую среду, второе защитное стекло получаем:

$$\begin{aligned} \Phi_{0k1}(\lambda) &= \tau_{31}\tau_{0k}(\lambda)\Phi_{k1}(\lambda)\exp\{-[k(\lambda)p_{\text{ср}} + k_{\text{ср}}(\lambda)p]l_{\text{ср}}\}; \\ \Phi_{0k2}(\lambda) &= \tau_{32}\tau_{0k}(\lambda)\Phi_{k2}(\lambda)\exp\{-[k(\lambda)p_{\text{ср}} + k_{\text{ср}}(\lambda)p]l_{\text{ср}}\}, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $\tau_{31}(\lambda)$, $\tau_{32}(\lambda)$ – относительные потери потоков от первого и второго светодиодов при прохождении полупрозрачного зеркала; $\tau_{0k}(\lambda)$ – суммар-

ный коэффициент пропускания защитных стекол; $p_{ср}$ – парциальное давление контролируемого газа; $k_{ср}(\lambda)p$ – произведение коэффициента поглощения аэродисперсной среды на ее парциальное давление при отсутствии контролируемого газа; $l_{ср}$ – длина контролируемого участка дымового потока.

Интегральные потоки u_1 и u_2 от каждого излучателя, попадающие на фотоприемник, рассчитываются с помощью выражений:

$$u_1 = A_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_ф(\lambda)\Phi_{k1}(\lambda)\exp\left[-k(\lambda)\left(p_{k1}l_{k1} + p_{ср}l_{ср}\right) - k_{ср}(\lambda)pl_{ср}\right]d\lambda;$$
$$u_2 = A_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_ф(\lambda)\Phi_{k2}(\lambda)\exp\left[-k(\lambda)\left(p_{k2}l_{k2} + p_{ср}l_{ср}\right) - k_{ср}(\lambda)pl_{ср}\right]d\lambda, \quad (3)$$

где $A_1 = \tau_{k1}\tau_{31}\tau_{0k}$; $A_2 = \tau_{k2}\tau_{32}\tau_{0k}$; $\tau_ф(\lambda)$ – коэффициент пропускания фильтра.

Для упрощения дальнейших расчетов положим, что регулировкой тока инжекции можно добиться равенства коэффициентов $A_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_1(\lambda)d\lambda =$ $= A_2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_2(\lambda)d\lambda = A$, которое легко достигается для идентичных излучателей, поскольку поведение $\Phi_1(\lambda)$, $\Phi_2(\lambda)$ в рабочем диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$ монотонное и примерно одинаковое.

После дальнейших преобразований можно получить зависимость вычисляемого парциального давления контролируемого газа от основных параметров

$$p_{ср} = \frac{1}{l_{ср}} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_ф(\lambda)\tau_{ср}(\lambda)\exp\left[-k_{ср}(\lambda)p_{k2}l_2\right]d\lambda - \frac{u_2}{u_1}B}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_ф(\lambda)\tau_{ср}(\lambda)k(\lambda)d\lambda}, \quad (4)$$

где $\tau_{ср}(\lambda) = \exp[-k_{ср}(\lambda)pl_{ср}]$, а $B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_ф(\lambda)\tau_{ср}(\lambda)\exp\left[-k(\lambda)p_{k1}l_1\right]d\lambda$.

Видим, что определяемое парциальное давление будет слабо зависеть от пропускания среды $\tau_{ср}(\lambda)$, поскольку этот коэффициент содержится во всех членах знаменателя и числителя. Исключается также влияние вариаций параметров приемного тракта (загрязнений оптических поверхностей, нестабильности крутизны преобразования и т. д.) на погрешности измерений, так как перечисленные величины сокращаются при вычислении отношения регистрируемых потоков u_2/u_1.

На рис. 4 представлены результаты моделирования влияния концентрации CO_2 и H_2O на оценку концентрации CO в дымовых газах котлов недисперсионным корреляционным методом при длине контролируемой трассы 1 м и температуре отходящих газов 373 К. Расчеты проводились

для пороговой чувствительности приемника излучения 10^{-9} Вт и интегральной мощности излучателя 50 мкВт. По осям ординат представлены определяемые значения произведения парциального давления CO на длину трассы (100 см), а по оси абсцисс – истинные. Величина доверительных интервалов выбрана равной среднеквадратичному отклонению шумов фотоприемника. Для уменьшения влияния вариаций CO_2 и H_2O моделировалось использование дополнительных кювет: 1) с чистым CO_2 при температуре 296 K и длиной 5 см; 2) с содержанием H_2O 10 % при температуре 323 K и длиной 1 м. Видим, что методы недисперсионного корреляционного контроля позволяют хорошо определять содержание CO в отходящих газах котлов вплоть до концентраций 10^{-4} от объема при длине контролируемого участка 1 м. Заметим, что для упрощения датчика можно исключить применение дополнительных кювет, осуществляя калибровку датчика CO в условиях, близких к реальным. При этом относительная погрешность контроля концентрации CO возрастает, но ее величина остается значительно меньшей 0,1 %, что вполне достаточно.

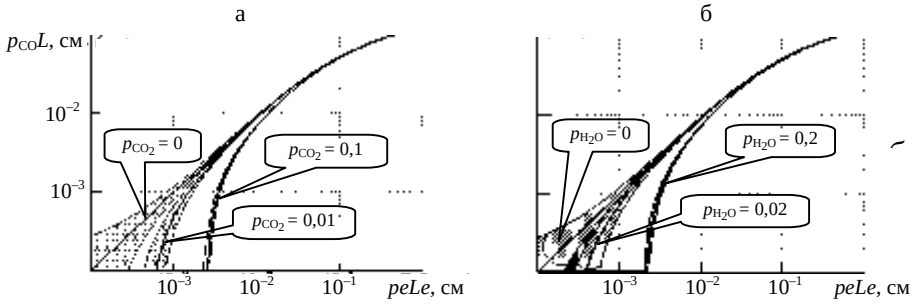

Рис. 4. Результаты моделирования влияния содержания CO_2 (а) и H_2O (б) в дымовых газах на результаты определения концентрации CO корреляционным методом

Лазерные корреляционные датчики. Наилучшей селективностью обладают корреляционные лазерные газоаналитические средства [1]. Однако в области 4,6 мкм, где наблюдается сильная полоса поглощения CO, пока отсутствуют полупроводниковые лазеры, не требующие криогенного охлаждения. На рис. 5 приведена функциональная схема газоанализатора, использующего полупроводниковый инжекционный лазер с длиной волны излучения в области 1,56 мкм, где наблюдаются слабые линии поглощения CO. Излучение диода коллимируется малогабаритной линзой и отправляется на контролируемую трассу длиной $l_{ср}$. Уголковый отражатель возвращает падающее на него излучение обратно. Приемная линза, расположенная на одной оптической оси с передающей, фокусирует попадающее на нее зондирующее излучение на чувствительную площадку фотоприемника. Таким образом, зондирующее лазерное излучение с периодически изменяемой длиной волны дважды проходит сквозь контролируемую газовую среду и несет информацию о ее спектральном поглощении. Для обеспечения малых погрешностей контроля необходимо использовать модифицированный корреляционный метод, подробно описанный в [5]. При его использовании, применении одночастотного лазера и усреднении принимаемых сигналов для уменьшения влияния флуктуаций фонового излучения горячих дымовых газов рассматриваемая простая схема позволяет в прин-

ципе зарегистрировать относительное изменение мощности зондирующих сигналов $\Delta\Phi_{min}/\Phi$, приблизительно равное 10^{-4}. Тогда для измерительной трассы длиной $l_{ср}$ = 5 м, проходящей вдоль стенки котла, омываемого потоком горячих газов с температурой 400 °С, пороговая чувствительность контроля CO будет около 0,01 %. Заметим, что при уменьшении длины трассы погрешности пропорционально увеличиваются.

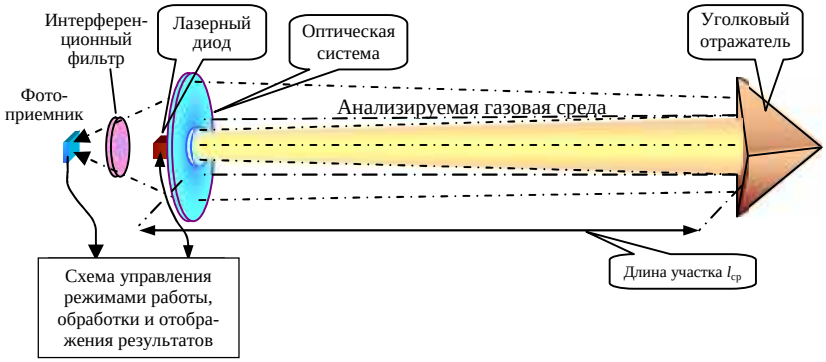

Рис. 5. Функциональная схема лазерного газоанализатора

Одночастотные полупроводниковые лазеры с использованием перестраиваемого внешнего резонатора на дифракционной решетке (схема Литтрова) достаточно дорогие. Поэтому проанализируем методические погрешности определения концентрации CO при использовании дешевых полупроводниковых лазеров без внешнего резонатора с перестройкой частоты изменением температуры кристалла лазера термоэлектрическим микрохолодильником. На рис. 6 представлены изменения спектра излучения многомодового лазера при увеличении температуры его кристалла и зависимости определяемых значений парциального давления CO от истинных, показывающие, что при оптимальном выборе длины калибровочной кюветы $l_л$ [5] и давления CO в ней $p_к^{CO}$, методические погрешности при использовании многомодового излучения и длине трассы 5 м близки к требуемым.

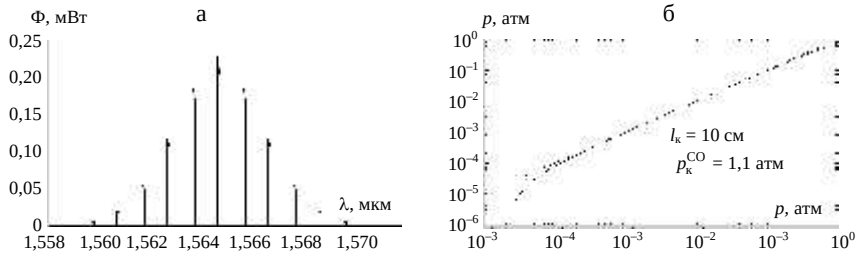

Рис. 6. а – модовый состав моделируемого лазера; б – зависимости определяемых значений парциального давления CO от истинных для одночастотного (штриховая линия) и многомодового (сплошная кривая) излучения

Непрерывный оптический контроль содержания кислорода возможен только в спектральной области 0,76 мкм, где наблюдаются линии поглощения (рис. 7а). В этой области имеются полупроводниковые лазеры с большой мощностью излучения. Однако слабое поглощение кислорода, составляющее примерно 10^{-4} для трассы длиной 1 м при концентрации

кислорода в дымовых газах 1 %, требует модифицированных корреляционных процедур обработки, приходящего с контролируемой трассы зондирующего сигнала [5]. На рис. 7б представлены результаты моделирования характеристик (без учета паразитной интерференции) датчика O_2 при длине анализируемой трассы 1 м. Коэффициент m представляет собой часть суммарной мощности излучения, приходящегося на побочные моды лазера. Хорошо видно, что при достаточной длине контролируемого участка дымовых газов пороговая чувствительность достаточна для практического использования.

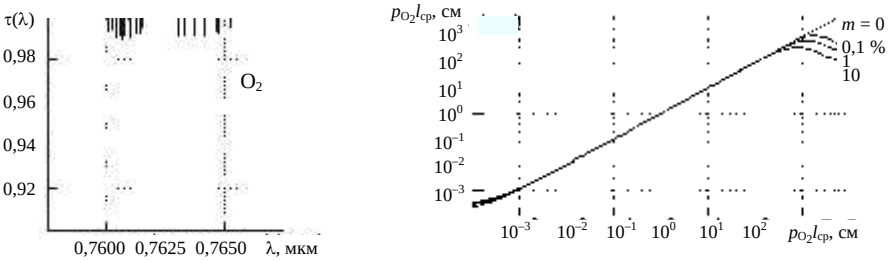

Рис. 7. Спектр пропускания кислорода и результаты моделирования зависимости вычисляемых значений произведения парциального давления O_2 на длину трассы $l_{ср}$ от истинных при различном вкладе побочных мод

ВЫВОД

Применение полупроводниковых излучателей и предлагаемых корреляционных методов обработки позволяет максимально упростить конструкцию газоаналитических средств непрерывного контроля и устранить влияние на результаты измерений вариаций неконтролируемых физических параметров. Несмотря на худшие, по сравнению с лазерными, характеристики светодиодных средств контроля СО, их применение предпочтительнее в области спектра 4,6 мкм при небольших толщинах дымового потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазерная аналитическая спектроскопия / В. С. Антонов, Г. И. Беков, М. А. Большов и др. – М.: Наука, 1986. – 318 с.

2. Надеждинский А. И. Диодная лазерная спектроскопия: Современные технологии. – М.: ИОФ АН СССР, 1990. – С. 7–38.

3. Кабашников В. П., Курсков А. А. Теоретические исследования метода корреляционной спектроскопии. – Мн., 1984. – 53 с. (Препринт № 336/АН БССР. Ин-т физики).

4. Дунаев В. Б. Аналитические методы и устройства корреляционной спектроскопии. – Мн., 1990. – 34 с. (Препринт № 614/АН БССР. Ин-т физики.)

5. Кугейко М. М., Фираго В. А. Лазерные методы контроля компонентного состава аэродисперсных сред // ЖПС. – 2001. – № 4, т. 68. – С. 520–525.

Представлена кафедрой
квантовой радиофизики
и оптоэлектроники

Поступила 28.05.2004