

К. ф.-м. н. Е. П. ИВАНОВА, В. Ф. РАДЧЕНКО,
к. т. н. А. Е. ХАНАМИРОВ, к. т. н. А. В. ХРЮНОВ

Украина, г. Харьков, ННЦ «Институт метрологии»;
Россия, Московский энергетический институт (технический университет)
E-mail: hanamirov@mail.ru

Дата поступления в редакцию
01.09 2009 г. — 04.01 2010 г.

Оппонент к. т. н. Ю. Н. МАКСИМЕНКО
(ЗАО «Украналит», г. Киев)

РАДИОВОЛНОВЫЕ ДАТЧИКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЭС

В датчиках используется спектроскопический эффект резонансного поглощения электромагнитных волн при прохождении их через различные среды. Приводятся результаты экспериментальных исследований с разными газами в миллиметровом диапазоне волн.

Одной из наиболее важных задач обеспечения экологической безопасности эксплуатации тепловых электростанций и котельных является уменьшение вредных выбросов в атмосферу. Решение такой задачи связано с необходимостью контроля содержания выбросов непосредственно в процессе функционирования ТЭС.

Для контроля отходящих дымовых газов ТЭС создано много приборов отечественного и зарубежного производства — от относительно простых (ГХЛ-201, УГ-2, ГХ-4 и «Эвдиометра» 1980-х годов) с погрешностью измерений 10—15% до современных высокоточных газоанализаторных систем с микропроцессорной обработкой [1, 2]. Однако измерительные системы, в основу работы которых положены известные методы, требуют, как правило, пробоподготовки, что усложняет, а иногда и не позволяет провести непрерывный оперативный контроль и автоматизацию процессов регулирования теплотехнического оборудования. Создание подобных систем является достаточно сложным, т. к. при этом необходимо обеспечить многокомпонентность измерений, простоту конструкции, низкую стоимость измерительной системы в производстве и эксплуатации.

В данной работе рассматривается возможность создания для указанных целей радиоволновых датчиков и соответствующих систем контроля, которые смогут обеспечить непрерывный контроль отдельных компонентов дымовых газов как с помощью известных пробоотборных систем, так и непосредственно в газоходах ТЭС. Принцип работы таких датчиков основан на использовании спектроскопического эффекта резонансного ослабления (поглощения) электромагнитных волн при прохождении их через различные среды.

Рассмотрим применимость такого эффекта при анализе отходящих газов ТЭС на простейших примерах, которые допускают сопоставление результатов, полученных распространенными методами. Для этого

наряду с общими вопросами будут рассмотрены примеры контроля содержания оксида азота (доминантной составляющей в газоходах газовых ТЭС) и кислорода (важнейшей составляющей для регулирования режима горелок).

Спектроскопический эффект резонансного поглощения электромагнитных волн обусловлен квантовыми переходами между разными энергетическими уровнями сред и веществ, которые зондируются волнами определенной длины. Измеряя интегральную интенсивность спектральных линий поглощения газа на частотах, соответствующих вращательному переходу, можно определить концентрацию анализируемого компонента в общей газовой смеси, которая связана с интегральным коэффициентом поглощения α следующим образом [3]:

$$\alpha = \frac{8\pi^2 N \chi \mu_{ij}^2 f^2 \Delta f}{3ckT [(f - f_0)^2 + \Delta f^2]},$$

где N — число молекул в 1 см^3 ;

χ — относительное число молекул в нижнем из двух энергетических состояний, между которыми происходит рассматриваемый переход;

μ_{ij} — величина матричного элемента дипольного момента для данного компонента, просуммированного по трем взаимно перпендикулярным направлениям в пространстве;

f — частота;

f_0 — резонансная частота, равная центральной частоте линии поглощения данного газа;

Δf — полуширина линии поглощения;

c — скорость света;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура анализируемой смеси.

Для большинства газообразных сред переходы между энергиями вращения молекул наблюдаются непосредственно в СВЧ-диапазоне. Наряду с высокой стабильностью спектров поглощения к очевидным достоинствам СВЧ-спектроскопии относятся чрезвычайно высокая разрешающая способность и весьма широкий интервал частот (несколько октав электромагнитного спектра). Каждому газу соответствует одна или несколько частот, на которых наблюдается резонанс поглощения. Многие резонансные частоты отходящих газов ТЭС лежат в диапазоне миллиметровых волн. Результаты аналитических расчетов, подкрепленных экспериментальными исследованиями в

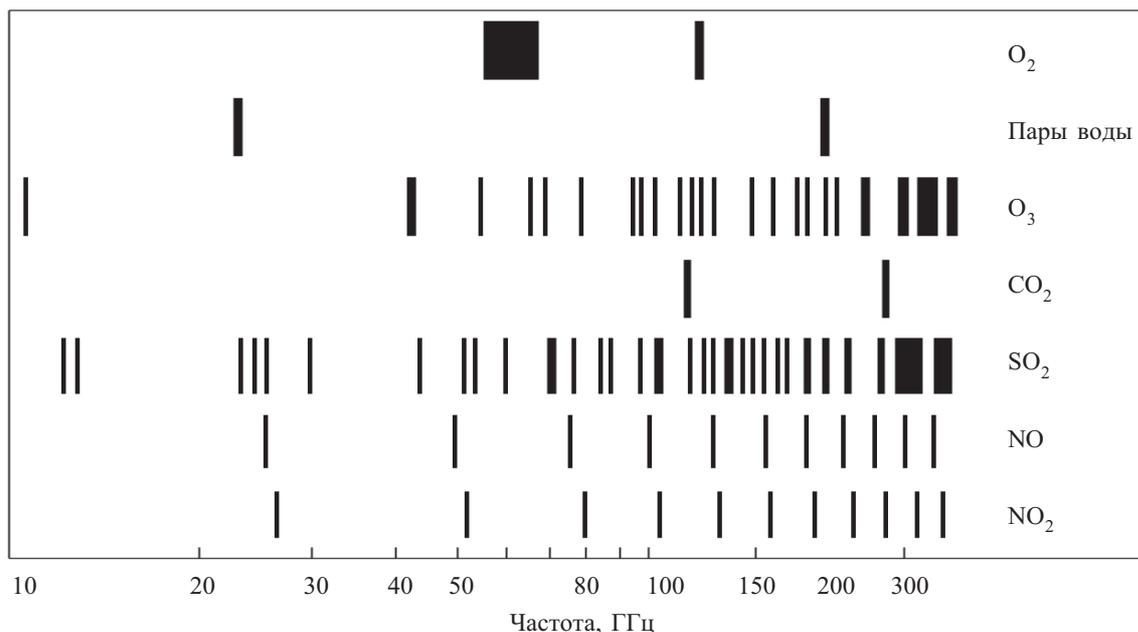


Рис. 1. Линии поглощения атмосферных газов

Таблица 1

Линии поглощения газов, сопутствующих эксплуатации ТЭС

Среда	H ₂ O	NH ₃	N ₂ O	NO ₂	SO ₂	O ₂	CO	NO	O ₃
Частота, ГГц	22,235, 183,31	23,87	25,123	26,619	20,42—29,46	63,56; 118,75	115,79	150	101,74; 142,17; 165,78

радиоастрономии и в структурном анализе веществ, отражены на **рис. 1** [4]. В **табл. 1** представлены сведения Национального бюро стандартов США о наиболее интенсивных линиях поглощения газов, сопутствующих эксплуатации ТЭС. При зондировании газовой среды СВЧ-излучением и измерении резонансного поглощения на разных частотах можно с достаточной степенью достоверности установить уровень концентрации соответствующих газов. Это и составляет суть метода СВЧ-радиоспектроскопии.

Проведенный ранее в [1, 2] обзор ряда патентов СССР, России, Великобритании, США и Германии касался усовершенствований техники СВЧ-измерений в области газовой спектроскопии, направленных на повышение чувствительности СВЧ-спектрометров, их быстродействия и точности измерений, а также на обеспечение возможности одновременной работы с разными газами. Однако найденные решения не могут быть напрямую применены для контроля состава дымовых газов ТЭС, т. к. рассчитаны на давления, которые значительно меньше, чем в газоходах ТЭС.

Система контроля дымовых газов на каждом котле ТЭС может быть установлена в одном или в каждом из двух контрольных сечениях газохода — за холодным пакетом конвективного пароперегревателя и за дымососом [5]. В первом сечении дымовые газы не искажены попаданием воздуха, и по составу газов можно судить о характеристиках топочного режима (в частности, по содержанию СО и O₂ — о степени выгорания топлива). Именно в этом сечении про-

водятся измерения при наладочных работах, при диагностике и оптимизации режимов сжигания топлива. Во втором сечении достигается практически полное перемешивание продуктов сгорания и, следовательно, равномерность по сечению концентрационных полей. Поэтому второе сечение газохода наиболее удобно для оценки общего количества вредных выбросов на одном котле. Для каждого варианта размещения контрольного оборудования имеются особые требования, устанавливаемые по экстремальным условиям работы газохода [5].

Радиоволновые системы для контроля дымовых газов

Общие требования к радиоволновым системам и специфика их реализации достаточно полно указывают направление исследований по созданию радиоволновых датчиков дымовых газов. Выбор варианта конструкции датчика зависит от конкретных требований. Принцип действия радиоволновых датчиков основан на спектроскопическом эффекте. Отсюда — важность экспериментальных исследований при выборе оптимальных решений и, следовательно, создании соответствующих измерительных комплексов.

В каждом из таких комплексов должно быть и нерадиотехническое оборудование. При этом традиционные пробоотборные системы не являются обязательными, но для сопоставления и установления достоверности измерений требуется калибровка с помощью эталонных газовых смесей.

В общем случае в состав комплекса должны входить:

— блок датчика, включающий измерительную ячейку, зондирующий генератор, аттенуатор и детекторную камеру;

— блок электроники, включающий блоки питания и обработки сигналов, согласующее устройство, терморегулятор;

— блок стабилизации параметров газа, состоящий из фильтра, переключателя каналов по газу, стабилизаторов расхода и давления газа, стабилизатора общего давления;

— блок транспортировки газа, включающий газозаборное устройство, вентиль, холодильник-фильтр;

— блок калибровки, включающий вентиль и образцовые газовые смеси.

Ниже будут рассмотрены только радиофизические аспекты созданных измерительных комплексов.

Главным узлом в каждом комплексе является датчик. Принцип работы радиоспектроскопического датчика концентрации компонента газа основан на измерении интегрального коэффициента поглощения анализируемого компонента газа на частотах, соответствующих вращательному переходу. По значению коэффициента поглощения на частоте перехода рассчитывается концентрация анализируемого газа [3]

$$N = (\alpha_{\max} 3ckT\Delta f) / (8\pi^2 \chi_{ij}^2 f_0^2).$$

Основным признаком классификации датчиков является различие в измерительных ячейках, обеспечивающих взаимодействие зондирующего излучения с контролируемой газовой смесью. Датчики могут быть выполнены на базе как закрытых, так и открытых волноводов и резонаторов, а также на базе приемопередающих систем пространственного излучения. Ввиду значительной ширины спектральных линий поглощения в обычных условиях работа датчиков возможна и на нерезонансной частоте указанных спектральных линий.

Установки для исследования газов в волноводах

Традиционной измерительной ячейкой при радиоспектроскопических исследованиях газов является волновод, в диапазоне частот которого находится линия поглощения исследуемого газа. Именно такие ячейки необходимы для работы поисковых радиоспектроскопов. Их оптимальная длина зависит от потерь в волноводе и от способа обнаружения линий поглощения. Так, при квадратичном детектировании она равна $1/\alpha_v$, при линейном — $2/\alpha_v$ (α_v — коэффициент поглощения СВЧ-мощности в волноводе). Эффективная длина поглощающей волноводной ячейки

$$L_{\text{эфф}} = L(\lambda_v/\lambda),$$

где L — геометрическая длина ячейки;
 λ — длина волны в свободном пространстве;
 λ_v — длина волны в волноводе.

Наиболее известны измерительные ячейки на прямоугольном волноводе, который для увеличения взаимодействия зондирующего излучения с газом должен быть достаточно длинным [6], а для компактности датчика — согнутым в спираль [7]. Создание та-

ких волноводов, несомненно, весьма сложная техническая задача, хотя примеры ячеек для волн 15- и 8-мм диапазонов известны. Создание же подобных ячеек в 4- и 2-мм диапазонах (для датчиков кислорода и оксида азота) еще более проблематично, т. к. малые размеры волноводов (сечение $1,8 \times 3,6$ и $0,8 \times 1,6$ мм) усложняют и конструктивное исполнение, и подачу газа в волновод. Поэтому применение прямоугольного волновода для измерительных ячеек в указанных диапазонах частот нами исключалось.

Значительно удобнее гибкие диэлектрические волноводы, которые, как известно [8], обладают уменьшенными погонными потерями в диапазоне КВЧ, могут быть легко свернуты в спираль и помещены в таком виде в герметичный сосуд с регулируемым давлением. При этом с ростом частоты эти характеристики не ухудшаются, так что ячейки могут быть выполнены и на 150 ГГц. Для подачи газов в такие датчики могут быть использованы известные пробоотборные системы. Поэтому диэлектрические волноводы и соответствующие датчики считаются наиболее подходящими для поисковых радиоспектроскопов во всем КВЧ-диапазоне.

Датчики газа можно выполнить также на базе цилиндрической щелевой линии (ЦЩЛ) [9], обеспечивающей компактность и совместимость с твердотельными электронными компонентами. В системе связанных ЦЩЛ возможно достижение высокой добротности измерительной ячейки и, следовательно, высокой чувствительности спектрометра, хотя весьма малые геометрические размеры ЦЩЛ осложняют ее применение на частотах выше 30 ГГц в широкой полосе частот. Поэтому применение ЦЩЛ для измерительных ячеек на частотах выше 30 ГГц нами тоже исключалось, тем более в спектрометрах поискового типа. Однако считаем возможным выполнение на их основе радиоспектрометров для таких газов как NO_2 , N_2O , SO_2 , NH_3 , линии поглощения которых лежат на частотах ниже 30 ГГц (см. рис. 1).

Установки для исследования газов в объемных резонаторах

В технике СВЧ для измерения параметров материалов широко распространены резонаторные методы. Они основаны на изменении свойств колебательных систем — резонаторов при введении в них образцов исследуемых веществ. Так как резонансную частоту и добротность резонаторов можно измерить с высокой точностью, резонаторные методы измерения параметров вещества оказываются наиболее совершенными. По результатам измерений с помощью простых формул проводится расчет, например, диэлектрической проницаемости и угла потерь исследуемого вещества:

$$\epsilon = (\omega_{p0}/\omega_{pe})^2;$$

$$\text{tg}\delta = 1/Q_\epsilon - 1/Q_0;$$

где ω_{p0} , Q_0 , ω_{pe} , Q_ϵ — резонансная частота и добротность незаполненного и заполненного исследуемым материалом резонатора, соответственно.

Обычно для измерений применяют цилиндрические объемные резонаторы на колебаниях типа H_{011} или E_{010} и минимальную связь их с основным трактом.

Высокодобротные объемные резонаторы удобно применять при исследовании газов в непоисковом режиме, на точно заданной фиксированной частоте, на которую и настраивают резонаторы. В таком случае

$$L_{эфф} \approx (\lambda^2 / \pi \lambda_B) Q_L$$

(Q_L — добротность нагруженного резонатора), что при высокой добротности резонатора эквивалентно большой длине волновода. По изменению добротности резонатора (с газом и без него) можно судить о коэффициенте поглощения газа α_r в резонаторе объемом V :

$$\alpha_r = \frac{2\pi V}{c} \left(\frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q} \right)$$

Измеряя СВЧ-мощность в максимуме резонансной кривой резонатора с газом и без него при помощи квадратичного детектора (при слабой связи с резонатором), будем иметь

$$\alpha_r = \frac{2\pi V}{cQ} \left(\sqrt{\frac{U}{U_r}} - 1 \right)^{-0.5}$$

где U_r и U — показания индикатора при наличии газа и без него.

В процессе измерений зондирующий АМ-сигнал с частотой, равной частоте основного перехода анализируемого компонента газа, поступает от СВЧ-генератора к измерительному цилиндрическому объемному резонатору. Его резонансная частота при фиксированном диаметре зависит только от диэлектрической проницаемости заполняющей среды — газа. В резонатор, настроенный на частоту основного перехода, подается анализируемая газовая смесь, и фиксируется сигнал с детектора при наличии газа (U_2) и без него (U_1). Для повышения точности измерений используются образцовые смеси газов (т. е. с известной концентрацией отдельных компонентов). В таком случае с помощью газового переключателя в резонатор подается последовательно воздух, образцовая газовая смесь, контролируемая смесь, и фиксируются три значения выходного сигнала: при наличии воздуха (U_1), образцовой смеси (U_2) и контролируемой смеси (U_3). Искомое значение концентрации анализируемого компонента вычисляется по формуле

$$N_{rx} = N_{го} \ln \frac{1 - U_x / U_1}{1 - U_0 / U_2}$$

где $U_0 = U_1 - U_2$;

$U_x = U_1 - U_3$;

$N_{го}$ — концентрация анализируемого компонента в образцовой смеси.

Относительная погрешность измерений определяется амплитудными флуктуациями зондирующего ге-

нератора и погрешностью аттестации поверочной газовой смеси.

Нижний предел измерения концентрации анализируемого компонента определяется минимальной величиной поглощенной мощности СВЧ-сигнала на частоте вращательного перехода, при которой еще возможно детектирование. В миллиметровом диапазоне порядок коэффициента поглощения α_r в режиме квадратичного детектирования составляет 10^{-9} см^{-1} . Верхний предел измерения коэффициента поглощения может быть поднят за счет уменьшения представительности пробы.

Положительными качествами данного способа измерений является высокая селективность анализа, неперекрываемость спектральных линий (при низких давлениях) и относительно невысокая погрешность (порядка $\pm 3\%$), которая может быть еще существенно снижена за счет уменьшения погрешности аттестации поверочной смеси и снижения амплитудных флуктуаций генератора зондирующих сигналов.

Ранее были рассмотрены основные элементы конструкции объемного резонатора для датчиков кислорода и оксида азота. Достоинством представленного решения является унификация — конструкции резонаторов идентичны для разных газовых компонентов, т. е. для разных резонансных частот. Отличающимися узлами конструкции являются согласующие трансформаторы и переходы-возбудители, а в полной конструкции датчика на каждую частоту — также генераторы зондирующего сигнала и детекторные секции.

Выходной сигнал датчика может подаваться на стандартный АЦП, а с него — на ЭВМ, входящую в состав АСУ ТП.

Устройство подачи газа через штуцеры в резонатор допускает применение обычных пробоотборников; перед началом рабочего цикла необходимо продуть систему сухим воздухом. Диагностирование работы всей системы проводится с помощью образцовых газовых смесей. Метрологическое обеспечение измерений содержания анализируемых газовых компонентов может быть проведено или путем самокалибровки с помощью поверочных газовых смесей, или посредством экспресс-анализа с применением отбора проб и сличения полученных результатов с результатами измерения аттестованными газоанализаторами.

Установки для исследования газов в резонаторах Фабри–Перо

Как уже отмечалось выше, радиоспектроскопические датчики могут быть выполнены на базе не только объемных, но и других резонаторов, обладающих высокой добротностью — в частности, на базе открытых резонаторов Фабри–Перо. Такие датчики, как следует из [1, 2], получили особенно широкое распространение вследствие простоты конструкции и чрезвычайно высокой добротности резонаторов. Нами были выполнены резонаторы Фабри–Перо в 4-мм диапазоне волн (для датчиков кислорода) и в 2-мм диапазоне (для датчика оксида азота). Отметим, что резонатор 2-мм диапазона может быть применен не только для датчика оксида азота на частоте 150 ГГц, но и для датчика кислорода на частоте 118,875 ГГц.

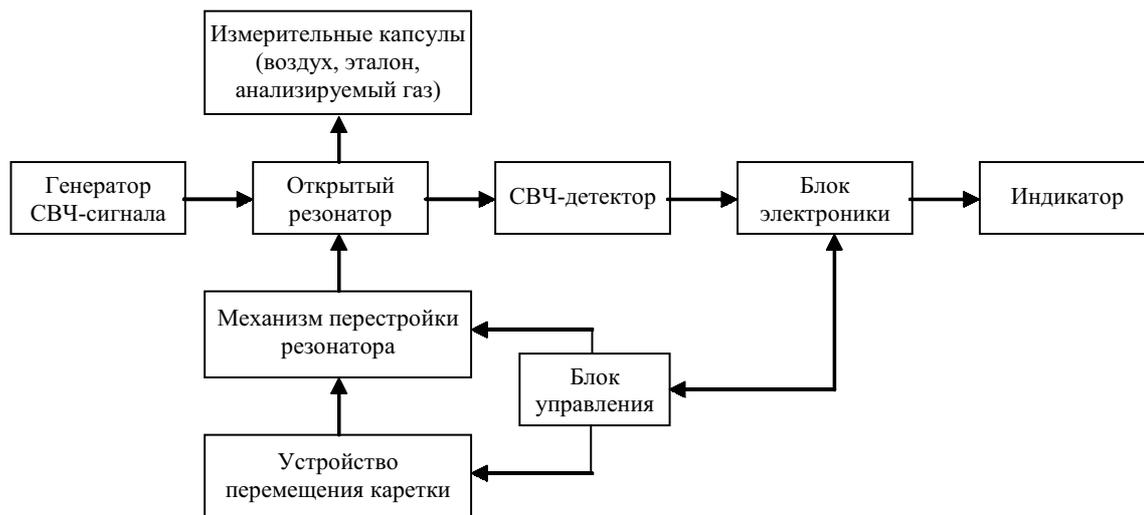


Рис. 2. Блок-схема измерения состава газовой смеси

Для подачи газа в пространство взаимодействия его с СВЧ-полем возможны варианты размещения резонатора как в объеме, который находится вне газохода и в который газ подается с использованием известных систем пробоотбора, так и непосредственно в самом газоходе (с соответствующей защитой поверхности стенок резонаторов газостойким покрытием). Кроме того, газ можно подавать в пространство между зеркалами резонатора с использованием капсул из радиопрозрачного материала и систем пробоотбора. В этом случае можно реализовать оригинальную систему измерения состава многокомпонентных газовых смесей, блок-схема которой представлена на рис. 2, взаимное расположение узлов — на рис. 3. В системе имеются:

- три несообщающиеся капсулы — ячейки из радиопрозрачного материала, заполненные воздухом, образцовой и анализируемой смесью; ячейки закреплены неподвижно на общем основании вдоль его оси;
- резонатор Фабри–Перо, одно из зеркал которого соединено с СВЧ-генератором, а второе — с СВЧ-детектором; взаимным перемещением зеркал достигается настройка резонатора на заданную резонансную частоту;
- генератор, зеркала и детектор закреплены на общей подвижной каретке, которая может перемещаться вдоль ячеек.

Перед началом измерений резонатор настраивают на частоту перехода анализируемого компонента. Собственно измерения выполняют в три этапа следующим образом.

Сначала перемещают каретку до совпадения оси зеркала генератора с капсулой, содержащей воздух, проводят зондирование капсулы сигналом резонансной частоты и измеряют выходное напряжение U_1 с детектора. Затем проводят аналогичные измерения, перемещая каретку к капсуле с образцовой смесью (U_2) и к капсуле с анализируемым газом (U_3).

Для измеренных значений выходного напряжения можем записать

$$U_1 = P_{\text{вх}} S \exp(-\alpha_p L_{\text{эфф}}),$$

$$U_2 = P_{\text{вх}} S \exp[-(\alpha_p + \alpha_{\text{го}}) L_{\text{эфф}}],$$

$$U_3 = P_{\text{вх}} S \exp[-(\alpha_p + \alpha_{\text{гх}}) L_{\text{эфф}}],$$

где $P_{\text{вх}}$ — мощность зондирующего сигнала;
 S — чувствительность детектора;
 $\alpha_p, \alpha_{\text{го}}, \alpha_{\text{гх}}$ — коэффициенты поглощения стенок резонатора, заполненного соответственно воздухом, образцовой смесью и анализируемым газом;
 $L_{\text{эфф}}$ — эффективная длина резонатора.

Проведя несложные преобразования, получим:

$$\frac{\alpha_{\text{гх}}}{\alpha_{\text{го}}} = \ln \frac{U_1}{U_3} / \ln \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_{\text{гх}}}{N_{\text{го}}}.$$

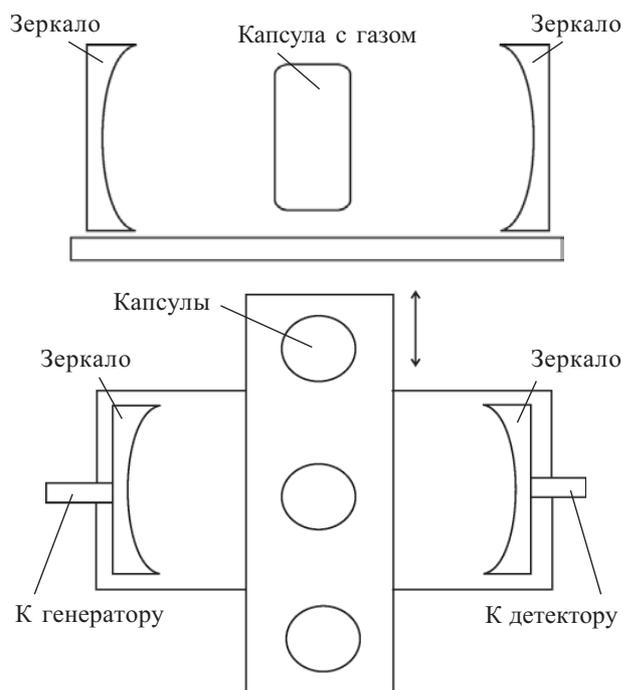


Рис. 3. Расположение элементов в системе измерения состава газовой смеси

Здесь $N_{\text{гх}}$ и $N_{\text{го}}$ — концентрация неизвестного и известного компонентов газовых смесей, соответственно.

Таким образом, концентрация анализируемого компонента газа определяется как

$$N_{\text{гх}} = N_{\text{го}} \ln \frac{U1}{U3} / \ln \frac{U1}{U2}.$$

Отсюда следует, что для измерения концентрации анализируемого компонента газовой смеси необходимо и достаточно измерить выходное напряжение СВЧ-детектора в указанных трех случаях и знать концентрацию образцовой смеси. Из процесса измерения исключается необходимость сложных измерений добротности нагруженного резонатора и, следовательно, ее влияние на точность измерений. Несомненное достоинство описанной системы — возможность измерения концентрации нескольких газов, линии поглощения которых лежат в пределах перестройки резонатора (например, NO_2 , N_2O , SO_2 в диапазоне 8 мм).

Приемопередатчики с амплитудной модуляцией

Как отмечалось выше, радиоволновые системы контроля дымовых газов могут быть выполнены на базе приемопередающих систем пространственного излучения с размещением их вне газохода и в связью с последним через радиопрозрачные окна. При этом устройством подачи газа в пространство взаимодействия газа с СВЧ зондирующим сигналом является сам газоход. Подобные радиоволновые системы различают по типу модуляции несущей частоты, по уровню мощности, по вариантам исполнения антенн и приемопередающих модулей и ряду других характеристик. Общим для радиоспектроскопии является низкий уровень излучаемой СВЧ-мощности — чтобы исключить эффект насыщения газа и застраховать персонал от СВЧ-облучения.

Авторами был выполнен вариант маломощной системы с отдельными модулями приемника и передатчика, работающими в режиме амплитудной модуляции. Эти модули могут быть установлены напротив друг друга с наружной стороны газохода и связаны со средой в нем через радиопрозрачные окна.

Излучающий модуль системы предназначен для формирования электромагнитного сигнала КВЧ-диапазона. Основным узлом модуля является генератор колебаний на лавинно-пролетном диоде (ЛПД). Функционирование генератора обеспечивает электронная схема, включающая в себя стабилизатор тока ЛПД, задающий генератор частоты модуляции с кварцевым резонатором, предварительный усилитель и модуляторный каскад. К волноводной камере генераторного диода прикреплены возбудитель диэлектрического волновода и сам фторопластовый диэлектрический волновод прямоугольного сечения. При установке электронной части модуля в корпус диэлектрический волновод входит в металлический волновод круглого сечения, заканчивающийся антенной — коническим рупором.

Электронная часть приемного модуля содержит КВЧ-узлы и НЧ-элементы. Антенна и диэлектрический волновод, соединяющий антенну с детекторной камерой, выполнены так же как и в излучающем мо-

дуле. При наличии сигнала от излучающего модуля на нагрузке КВЧ-детектора возникает периодический сигнал с частотой модуляции генератора, который усиливается полосовым усилителем с частотнозависимой обратной связью и поступает на многодиодный детектор. Постоянное напряжение на выходе детектора при этом управляет компаратором, состояние которого соответствует либо наличию КВЧ-сигнала либо его отсутствию. Схема многодиодного детектора содержит инерционные цепочки, обеспечивающие временную задержку переключения компаратора при появлении или исчезновении сигнала. Такая задержка предусмотрена на случай ложных срабатываний при наличии электрических помех и неравномерном потоке газа. Конструктивно излучающий и приемный модули выполнены одинаково. Описанные модули созданы для 8-мм диапазона и могут быть применены для контроля оксида азота на одной из «слабых» субгармоник линии поглощения, а также для контроля «сильных» линий поглощения ряда газов из числа дымовых — конкретно для NO_2 , N_2O , SO_2 .

Радиолокационный модуль с линейной частотной модуляцией

Систему контроля газа в газоходе можно, как и в предыдущем варианте, размещать вне газохода и выполнить ее функционально подобным образом, но с общей антенной и, соответственно, с одним радиопрозрачным окном в газоходе. В качестве датчика при этом применяется радиолокационный модуль. В созданном нами модуле 8-мм диапазона использована линейная частотная модуляция и обеспечена повышенная точность оценки изменения параметров пространственной среды.

Результаты исследования датчиков различных газов

Из числа созданных и описанных выше измерительных комплексов в экспериментальных исследованиях газов были применены установки с объемными резонаторами и с резонаторами Фабри–Перо. Проведены спектроскопические исследования таких газов как кислород, угарный газ, смесь NO и NH_3 .

Как показывают результаты наблюдения линий поглощения газов в реальных условиях, форма спектральных линий усложнена, особенно когда при высоком давлении близкие друг к другу линии перекрываются. В частности, это напрямую касается поглощения СВЧ-энергии кислородом и является явным источником возможной ошибки радиоспектроскопического анализа при фиксированной частоте наблюдения. Для исключения этого разработан довольно простой метод расчета поглощения при большом числе близко расположенных линий [10]. В [11] представлены результаты экспериментальной проверки точности этого метода на основе исследований поглощения СВЧ-энергии кислородом на частотах 58—78 ГГц.

Результаты измерений зависимости погонного коэффициента поглощения излучения кислородом от частоты при комнатной температуре и при давлении 1987 мбар (≈ 2 ат) приведены на **рис. 4**. Вертикальные отрезки характеризуют ошибки измерений, а кривые соответ-

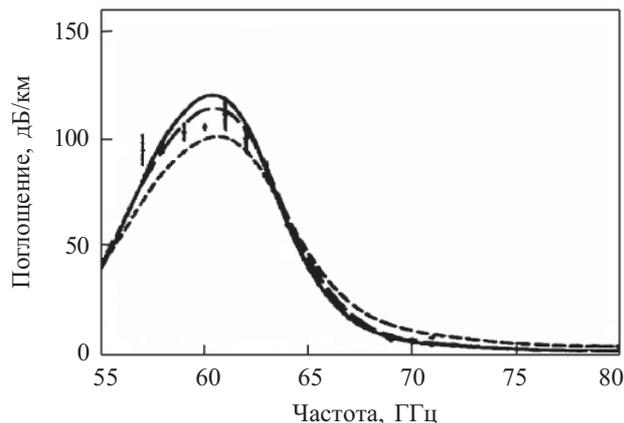


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента поглощения СВЧ-энергии кислородом

ствуют расчетам по разным теоретическим моделям. Из представленных результатов следует, что существует возможность экспериментального наблюдения в нормальных условиях линий поглощения для кислорода (причем, плотно размещенных) на частотах вблизи 60 ГГц. Для наблюдения более чистой линии поглощения для кислорода — на частоте около 119 ГГц — требуется существенно более сложная, дорогостоящая и дефицитная аппаратура. Тем не менее, работа на этой частоте представляет несомненный интерес в связи с тем, что в этом же стандартном волновом диапазоне на частоте около 150 ГГц находится также «сильная» линия поглощения для оксида азота — другого из отходящих газов ТЭС, выбранных для контроля. Это открывает перспективу определенной унификации измерительной аппаратуры и, соответственно, снижения стоимости всего измерительного комплекса.

В свое время в НПО «Метрология» Госстандарта СССР были проведены экспериментальные исследования по применению в радиоспектроскопии газов коротких закрытых металлических резонаторов, обеспечивающих требуемую эквивалентную длину. Так, например, были проведены частотные измерения поглощения зондирующего сигнала агрессивным газом (смесью азота и аммиака с объемной долей последнего $0,767 \pm 0,03\%$) — результаты отражены в табл. 2. На частоте основного перехода 23870 МГц резонансное поглощение составило 14,2 дБ, т. е. в резонаторе с эквивалентной длиной 20 м коэффициент поглощения на единицу длины поглощающей ячейки (резонатора) составил $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$.

Таким образом, из полученных экспериментальных результатов следует, что для регистрации линии поглощения в контролируемом газе на частоте зондирующего сигнала необходимо обеспечить резонансное ослабление поглощения более чем на 0,05 дБ,

Таблица 2

Поглощение зондирующего сигнала газом

Частота, МГц	Выходное напряжение детектора, мВ		Поглощение мощности, дБ
	Воздух	Аммиак	
23868	40,0	7,5	7,25
23869	62,2	4,1	10,7
23870	100,0	3,8	14,2
23871	68,4	5,2	11,3
23872	44,5	8,0	7,4

что вполне реально при использовании современной техники обработки результатов наблюдений.

Заключение

Таким образом, радиоволновые методы можно применять для контроля состава дымовых газов. Имеющиеся теоретические и экспериментальные результаты по радиоспектроскопии газов, накопленный опыт разработок специальных радиоволновых систем миллиметрового диапазона и отсутствие особых технологических трудностей представляют основу для создания достаточно простых, экономичных и надежных радиоволновых систем контроля состава дымовых газов ТЭС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гусев В. В., Иванова Е. П., Смольский С. М. и др. Радиоспектроскопия и контроль газов ТЭС.— Сб. докл. XI междунар. конф. по спиновой электронике и гировекторной электродинамике.— Москва.— 2002.— Изд. УНЦ-1 МЭИ (ТУ).— С. 447—486.
2. Иванова Е. П., Смольский С. М., Ханамиров А. Е., Хрюнов А. В. О радиоволновом контроле в тракте газового выброса ТЭС // Вестник МЭИ.— 2004.— № 1.— С. 64—69.
3. Таунс Ч., Шавлов А. Радиоспектроскопия.— М.: Изд. иностранной. лит., 1959.
4. Техника субмиллиметровых волн / Под ред. Р. А. Валитова.— М.: Сов. радио, 1969.
5. Росляков П. В., Закиров И. А., Ионкин И. Л., Егорова Л. Е. Методические проблемы контроля газовых выбросов на ТЭС и в котельных // Вестник МЭИ.— 1997.— № 4.— С. 25—32.
6. А. с. 278775 СССР. Автогенератор / А. В. Хрюнов, Г. М. Уткин.— 03.06.70.
7. Горди В., Смит В., Трамбаруло Р. Радиоспектроскопия.— М.: Гос. изд. технико-теоретической лит., 1955.
8. Шестопалов В. П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 1. Открытые структуры.— Киев: Наукова думка, 1985.
9. Взятыхшев В. Ф. Диэлектрические волноводы.— М.: Сов. Радио, 1970.
10. Rosenkranz P. W. Shape of 5mm oxygen band in the atmosphere// IEEE Trans. Antennas Propagat.— 1975.— Vol. AP-23, N 4.— P. 498—506.
11. Read W. G. The measurement of absolute absorption of millimeter radiation in gases: The absorption of CO and O₂// IEEE Trans. Antennas Propagat.— 1988.— Vol. AP-36, N 9.— P. 1136—1143.