

Р.Р. Агишев, Л.Р. Айбатов, В.А. Власов, Р.К. Сагдиев

**ДИСТАНЦИОННОЕ БЕСКОНТАКТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ УТЕЧЕК АММИАКА  
В ЦЕХОВЫХ УСЛОВИЯХ***Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева*

Поступила в редакцию 15.06.98 г.

Принята к печати 29.10.98 г.

Обсуждаются экономичные и простые в эксплуатации приборы дистанционного действия на основе спектроскопических методов анализа, предназначенные для автоматического контроля за утечками паров аммиака в цеховых условиях.

**Введение**

На производствах, использующих опасные газы, где высока степень риска возникновения аварийной ситуации, необходим непрерывный оперативный контроль, способный вовремя обнаруживать утечки этих газов. Существующие на сегодня подходы основаны либо на лабораторном анализе с предварительным отбором воздуха, либо на различных методах контроля «на месте». Первые характеризуются большим временем отбора, доставки проб и проведения измерений и поэтому не способны проводить оперативный контроль. Вторые позволяют осуществить непрерывный автоматический контроль лишь в нескольких заранее выбранных точках. Поэтому задача разработки дистанционных бесконтактных приборов, способных оперативно обнаруживать утечки вредных газов в производственных и естественных условиях, является весьма актуальной.

К группе приоритетных загрязнителей, для которых необходим постоянный автоматический контроль, относят пары аммиака.

**1. ИК-области спектра, пригодные для регистрации аммиака**

Список наиболее интенсивных линий поглощения аммиака в области от 1,5 до 12,6 мкм, а также сечения поглощения этих линий даны в таблице.

Длина волны, мкм	Сечение поглощения, см <sup>2</sup>	Литература
12,66	$2,35 \cdot 10^{-19}$	[1]
10,58	$2,15 \cdot 10^{-17}$	[1, 2]
6,13	$4,1 \cdot 10^{-18}$	[1]
5,75	$4,17 \cdot 10^{-20}$	[1]
2,0 ... 3,0	$1,4 \cdot 10^{-19}$	[2]
Около 1,5	$(1 \dots 2) \cdot 10^{-21}$	[3]

В спектральной области 1,5 ... 3,0 мкм можно реализовать компактные, недорогие и удобные приборы, не требующие применения источников и приемников излучения с криогенным охлаждением.

Линии в области 1,5 мкм хотя и слабее, чем другие, но их аналитическое применение весьма перспективно. В этом случае можно использовать диодные лазеры (ДЛ) ближнего ИК-диапазона на основе соединений  $A^3B^5$ , работающие при комнатных температурах.

В области 2,0 ... 3,0 мкм целесообразно использовать широкополосные источники («традиционные» тепловые;

светодиоды), а характерные для аммиака полосы поглощения выделять в приемном тракте с помощью светофильтров.

Для создания экономичных приборов удобен метод дифференциального поглощения, сочетающий приемлемую для практики чувствительность и простоту технической реализации [1, 2].

Варианты построения и структурная схема дистанционного обнаружителя аммиака представлены на рис. 1.

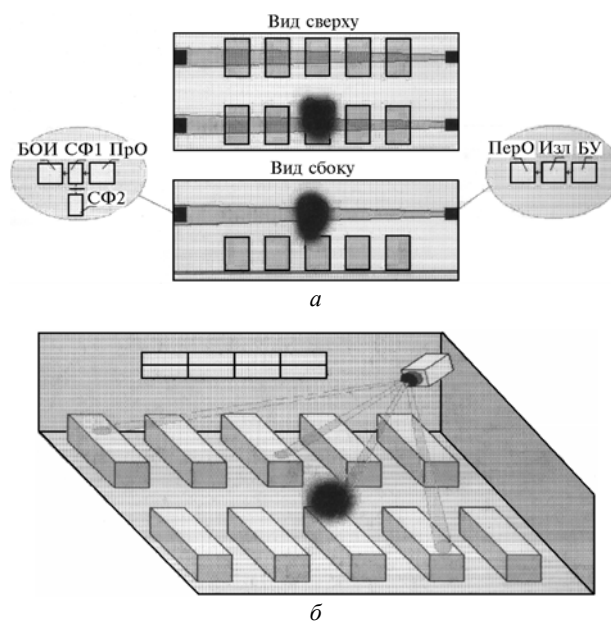


Рис. 1. Иллюстрация функционирования и структура опико-электронной системы контроля аммиака в цеховых условиях

**2. Анализ энергетических характеристик системы на основе лазерных диодов**

Для дифференциального метода измерений мощность сигнала, поступающего на фотоприемник, принято оценивать по формуле

$$P = G P_{\text{изл}} \exp(-\alpha L - \alpha_{\text{атм}} R) t, \quad (1)$$

где  $R$  – длина трассы;  $L$  – линейный размер облака утечки газа вдоль трассы зондирования;  $\alpha$  – показатель поглощения аммиака;  $t$  – пропускание оптики;  $G$  – геометрический

фактор,  $G = (D_{\text{пр}}/D_{\text{пят}})^2$ ,  $D_{\text{пр}}$  – диаметр приемной оптики,  $D_{\text{пят}}$  – диаметр пучка излучения на приемном конце;  $\alpha_{\text{атм}}$  – показатель ослабления атмосферы. В энергетических оценках для условий легкой дымки мы принимали  $\alpha_{\text{атм}} = 10^{-1} \text{ км}^{-1}$  в диапазоне длин волн около  $\lambda = 1,5 \text{ мкм}$ .

Мощность полезного сигнала, содержащего информацию о наличии примесей аммиака, оценивается по разности мощностей, соответствующих краю и центру линии поглощения:

$$P_e = G P_{\text{изл}} \exp(-\alpha_2 L - \alpha_{\text{атм}} R) t [1 - \exp(-\Delta\alpha L)]. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ , где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – показатели поглощения аммиака в центре и на краю линии поглощения соответственно.

По данным [4] приведенная величина показателя поглощения в центре линии аммиака в области 1,5 мкм

$$\alpha_1/N \approx 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{м}^3,$$

где  $N$  – плотность аммиака,  $\text{мг}/\text{м}^3$ , а  $\Delta\alpha/N = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{м}^3$ .

Пороговая мощность для метода прямого фотодетектирования равна

$$P_t = (S \Delta F)^{1/2} / D^*, \quad (3)$$

где  $D^*$  – обнаружительная способность фотоприемника;  $S$  – площадь его фоточувствительной поверхности;  $\Delta F$  – полоса пропускания приемного тракта. Современные фо-

торезисторы на основе PbS в диапазоне  $\lambda = 1,5 \dots 3,0 \text{ мкм}$  имеют  $D^* = (0,3 \dots 1,0) \times 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$  при комнатной температуре и могут быть выполнены с размерами фоточувствительной площадки от долей до единиц миллиметров. Для  $S = 0,25 \times 0,25 \text{ мм}^2$ ,  $D^* = 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$  и  $\Delta F = 100 \text{ Гц}$  получим  $P_t = 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$ .

При работе в условиях яркого внешнего фона необходимо учесть уровень фона дневного неба  $P_b$ . Согласно [5]

$$P_b = \pi B_\lambda \Delta\lambda S_{\text{пр}} t \theta^2/4, \quad (4)$$

где  $B_\lambda$  – спектральная яркость фона неба;  $\Delta\lambda$  – ширина полосы пропускания интерференционного фильтра;  $\theta$  – плоский угол поля зрения приемника;  $S_{\text{пр}}$  – площадь приемного объектива. В предположении, что  $B_\lambda = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм})$ ,  $\Delta\lambda = 0,012 \text{ мкм}$ ,  $\theta = 3 \text{ мрад}$ , получаем  $P_b \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}$ , т.е. в реальных условиях чувствительность фотоприемника будет ограничена внешним фоном. При этом минимальная концентрация аммиака  $N_{\text{пор}}$ , которую способен обнаружить прибор, определяется из условия  $P_{e \text{ min}} = P_b$ .

Используя диодный лазер на основе InGaAsP/InP со средней мощностью излучения 5 мВт, расходимость излучения 3 ... 5 мрад при длине трассы  $R = 30 \text{ м}$  и линейных размерах облака утечки аммиака  $L = 1 \text{ м}$ , на основе (1)–(4) находим  $N_{\text{пор}} = 0,28 \text{ мг}/\text{м}^3$ , что в 100 раз превышает чувствительность человеческого обоняния.

Функциональная схема прибора на основе ДЛ приведена на рис. 2.

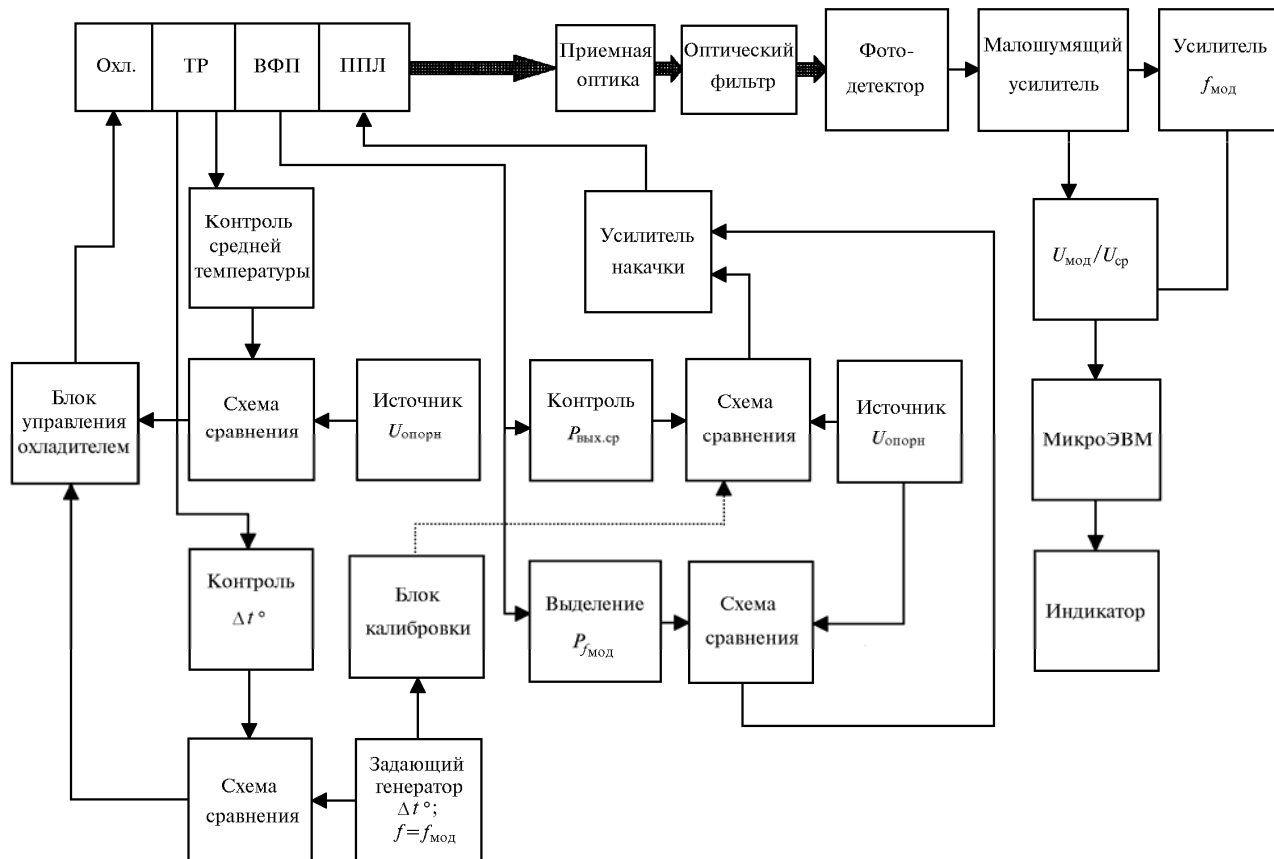


Рис. 2. Функциональная схема обнаружителя утечек аммиака: Охл. – термоэлектрический охладитель; ТР – терморезистор; ВФП – встроенный фотоприемник; ППЛ – полупроводниковый лазер

Кратко поясним работу прибора по этой схеме. Длина волны излучения полупроводникового лазера гармонически модулируется в области линии поглощения газа с частотой  $f_{\text{мод}}$ . В передающей части осуществляются перестройка длины волны излучателя, стабилизация среднего значения длины волны и подавление паразитных колебаний мощности ППЛ. Часть излучения, прошедшего через исследуемое пространство, собирается приемной оптикой, оптический сигнал преобразуется в электрический и усиливается, далее выделяется сигнал на частоте  $f_{\text{мод}}$ , содержащий информацию о концентрации загрязнителя, осуществляется его нормировка на принятую среднюю мощность. Расчет концентрации происходит в микроЭВМ.

### 3. Характеристики измерителя концентрации аммиака на основе ИК-светодиодов

Современные ИК-светодиоды имеют импульсную мощность  $P_{\text{и}}$  в несколько десятков милливольт при длительности импульса порядка 100 нс. Ширина спектра излучения  $\Delta\lambda_{\text{изл}}$  светодиодов составляет десятые доли микрометра. Для выделения более узких спектральных полос в приемной части измерителя необходимо использовать узкополосные интерференционные фильтры. Для типичных и относительно дешевых фильтров минимальная полоса пропускания составляет величину  $\Delta\lambda_{\text{ф}} \approx (0,005 \dots 0,01) \lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – длина волны, соответствующая максимальному пропусканию фильтра. При этом выражения для мощности принимаемых сигналов необходимо дополнить множителем

$$\eta_{\lambda} = \Delta\lambda_{\text{ф}} / \Delta\lambda_{\text{изл}},$$

где  $\eta_{\lambda}$  – спектральный КПД источника излучения.

Спектр поглощения аммиака в диапазоне 1,9 ... 3 мкм имеет линии с максимальным сечением поглощения  $\sigma_{\text{max}} \approx 1,4 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$ . При этом возможен выбор соседних спектральных участков шириной  $\Delta\lambda_{\text{ф}}$ , в одном из которых среднее сечение поглощения близко к максимальному, а в другом может составлять половину этой величины. Тогда для соседних полос можно получить оценку:  $\Delta\alpha/N \approx 2,4 \times 10^{-6} \text{ см}^{-1} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{м}^3$ .

### 4. Характеристики измерителя концентрации аммиака на основе ИК-светодиодов

При работе светодиода в импульсном режиме требуется полоса пропускания приемного тракта  $\Delta F = 10^7$  Гц. Тогда пороговая мощность оптического сигнала на входе фотоприемника (3) возрастает до  $7,9 \cdot 10^{-10}$  Вт, что превышает уровень фона (4). При этом чувствительность прибора должна определяться из условия  $P_{\text{с мин}} = P_{\text{т}}$ . Для светодиода LED21 ( $\lambda \sim 2$  мкм), имеющего импульсную мощность 60 мВт, при расходимости излучения светодиодного передатчика  $\theta = 1^\circ$  обеспечиваемая пороговая чувствительность прибора  $N_{\text{т}} = 0,05 \text{ мг/м}^3$ .

При работе светодиода в непрерывном режиме мощность излучения составляет около 1,5 мВт. При этом может быть выбрана полоса пропускания приемного тракта  $\Delta F = 100$  Гц и чувствительность фотоприемника ограничивается фоновыми шумами (4). В этом случае чувствительность прибора уменьшается до значения  $N_{\text{т}} = 0,07 \text{ мг/м}^3$ , что также вполне достаточно для практического использования.

Функциональная схема прибора на основе светодиодов, построенного по обычной двухканальной схеме, представлена на рис. 3. Широкополосное излучение светодиода, прошедшее исследуемый объем, собирается приемной оптикой. Светофильтр СФ1 настроен на центр линии поглощения аммиака, светофильтр СФ2 – на край этой линии. В дифференциальном усилителе происходит вычитание двух сигналов. Вычисление концентрации загрязнителя происходит в блоке обработки и индикации.

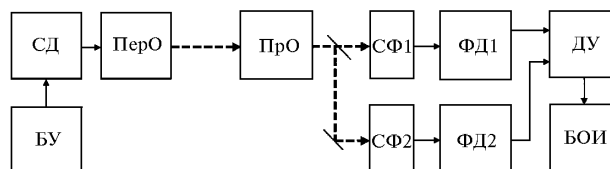


Рис. 3. Функциональная схема газоанализатора на основе светодиодов: БУ – блок управления; СД – светодиод; ПерО – передающая оптика; ПрО – приемная оптика; СФ – светофильтр; ФД – фотодетектор; ДУ – дифференциальный усилитель; БОИ – блок обработки и индикации

### 5. Оценка энергетических характеристик теплового источника излучения

В спектральном диапазоне 2 ... 4 мкм возможно применение тепловых источников излучения. При нагреве спирали лампы до 1000 К максимум интенсивности излучения приходится на 3 мкм. Аппроксимируя спектральную характеристику теплового источника равномерным законом распределения с шириной  $\Delta\lambda_{\text{изл}} = 3$  мкм и полагая, что полоса пропускания светофильтра  $\Delta\lambda_{\text{ф}} = 0,01$  мкм, находим спектральную эффективность источника  $\eta_{\lambda} = \Delta\lambda_{\text{ф}} / \Delta\lambda_{\text{изл}} = 3 \cdot 10^{-3}$ . При мощности источника 300 Вт на интервал полосы пропускания светофильтра приходится эффективная мощность  $P_{\text{эф}} = 900$  мВт. Это в сотни раз превышает мощность рассмотренных ранее светодиодов. Поэтому тепловой источник может обеспечить лучшую концентрационную чувствительность прибора, а в силу большой ширины спектра излучения пригоден для анализа разнообразных загрязнителей. В этом случае выбор анализируемых компонент обеспечивается простой сменой светофильтров.

### 6. Оценки характеристик ИК-ЛЧМ-лидара для дистанционного контроля утечек аммиака

Лидары с непрерывным излучением зондирующего сигнала и линейной частотной модуляцией интенсивности оптического пучка обеспечивают пространственное разрешение по дальности на протяженных трассах при малой средней мощности (единицы мВт) передающего лазера [6]. В этом случае используется метод дифференциального поглощения и рассеяния и лидарное уравнение имеет вид

$$P = G E c S_{\text{пр}} \beta \exp(-2\alpha R) t/R^2,$$

где  $c$  – скорость света;  $E$  – энергия излучения лазера;  $E = P_{\text{изл}} t_{\text{н}}$ ,  $P_{\text{изл}}$  – мощность излучения лазера в непрерывном режиме,  $t_{\text{н}}$  – время накопления принятого сигнала;  $\beta$  – объемный коэффициент обратного рассеяния. Аппроксимируя индикатрисы рассеяния под углом  $\pi$  согласно [7]:

$$i_{\pi} = 0,01 \alpha^{-0,43},$$

можно оценить эквивалентную мощность сигнала на входе фотодетектора:

$$P = 0,01 G E c G_{\text{пр}} \alpha^{0,57} \exp(-2\alpha R) t/R^2.$$

При работе в диапазоне  $\lambda = 1,5$  мкм в качестве фоточувствительного элемента можно использовать указанные выше фоторезисторы. Фотоэлектронные умножители, допускающие работу в режиме гетеродинамирования, здесь неприемлемы. Схема приемника содержит фоторезистор, преобразующий оптический ЛЧМ-сигнал обратного рассеяния в электрический. Далее сигнал поступает на смеситель, к которому также подводится ЛЧМ-сигнал гетеродина. На выходе смесителя выделяется сигнал разностной частоты, пропорциональный дальности до исследуемых участков трассы [6, 7, 9].

Для обеспечения требуемой разрешающей способности по дальности ( $\Delta R$  в несколько метров) необходима полоса модулирующих частот  $\Delta F \approx 10 \dots 25$  МГц и, соответственно, такая же полоса пропускания фотодетектора. Тогда для отмеченных выше фоторезисторов пороговая чувствительность составляет  $P_t = 8 \cdot 10^{-10}$  Вт при  $\Delta F = 10$  МГц.

В качестве источника излучения лидара можно использовать рассмотренный выше ДЛ на основе соединений InGaAsP/InP, но среднюю мощность с учетом сто процентной модуляции по интенсивности необходимо принять равной 2,5 мВт. В этом случае для трассы длиной 100 м и времени накопления около  $T_n = 1$  мс при концентрации аммиака  $N = 1$  мг/м<sup>3</sup> оценка отношения мощности принимаемого сигнала к пороговой дает величину  $P_c/P_t \approx 2$ .

*R.R. Agishev, L.R. Aibatov, V.A. Vlasov, R.K. Sagdiev.* **Remote Contactless Detection of Ammonia Leakage Under Indoor Conditions.**

Economical and simple in operation remote instruments based on spectroscopic analysis methods and designed for contactless monitoring the ammonia vapors leakages under indoor conditions are discussed.

## Закключение

Таким образом, проведенный анализ показывает, что с учетом сделанных допущений применение относительно простых технических решений позволяет создавать недорогие приборы дистанционного контроля утечек аммиака и других газов, обладающие приемлемыми для практики характеристиками и обеспечивающие пространственное разрешение.

1. Rothman L.S., Goldman A. AFGL trace gas compilation: 1982 version // Applied Optics. 1983. V. 22. N 11. P. 1616–1627.
2. Laser Diodes and Applications. Editors: Kurt J. Linden, Prasad R. Akkapeddi // SPIE Proceedings. 1996. V. 2682.
3. Application of Tunable Diode and Other Infrared Sources for Atmospheric Studies & Industrial Process Monitoring. Editor: Alan Fried // SPIE Proceedings. 1996. V. 2834.
4. Гуревич Л.И., Дураев В.П., Иванов В.А. и др. // Журнал прикладной спектроскопии. 1993. Т. 58. № 3–4. С. 318–324.
5. Kopeika N.S., Borodonja J. // IEEE Proceedings. 1970. V. 58. № 10. P. 1571–1577.
6. Агишев Р.Р., Айбатов Л.Р., Польский Ю.Е. Непрерывный ИК-лидар для дистанционного контроля утечек газа // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 11. С. 1–6.
7. Агишев Р.Р. Защита от фоновой помехи в оптико-электронных системах контроля состояния атмосферы. М.: Машиностроение, 1994. 128 с.
8. Агишев Р.Р. Системы оптической локации и дистанционного зондирования: особенности защиты от внешних помех: Учебное пособие. Казань: Изд. КГТУ, 1996. 32 с.
9. Агишев Р.Р., Галеев М.М., Савин Д.Е., Сагдиев Р.К. Некоторые особенности аппаратной реализации модулированных непрерывных лидаров // IV Симпозиум «Оптика атмосферы и океана». (Тезисы докладов). Томск: ИОА, 1997. С. 196–198.