

**Ю.Ф. Аршинов, С.М. Бобровников, И.Б. Сериков, Д.И. Шелефонтьук, В.К. Шумский,
П.В. Базылев, В.А. Луговой, Н.Н. Столяров**

КАЛИБРОВКА КР-ЛИДАРНОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ИЗ ТРУБ ПРЕДПРИЯТИЙ С ПОМОЩЬЮ УДАЛЁННОЙ ГАЗОВОЙ КЮВЕТЫ

Обсуждаются калибровочные испытания КР-лидара, предназначенного для дистанционного контроля выбросов в атмосферу из труб предприятий. Эксперименты проводились с целью обоснования способности лидара дистанционно обнаруживать (на срезах труб) наиболее распространенные газовые загрязнения, такие как СО, NO, NO₂ и SO₂. Для этого использовалась специальная газовая кювета пятиметровой длины и 30-см диаметра, которая может поочередно заполняться калиброванными смесями этих газов с чистым азотом. Результаты, полученные в этих экспериментах, наглядно демонстрируют лучшие стороны КР-лидарной методики в применении к измерению концентрации газов, что иллюстрируется идеально линейной зависимостью лидарного отклика от молекул SO₂ в диапазоне его концентраций от 0,05 до 5% по объему. В то же время эксперименты показали, что такие аппаратные шумы, как долгоживущая люминесценция окон кюветы, могут наложить серьезные ограничения на возможность сертификации лидаров в части определения минимально обнаружимой, с их помощью, концентрации газа, поскольку именно этот люминесцентный шум определяет отношение сигнал-шум при низкой концентрации исследуемого газа. Кроме этого чисто аппаратного ограничения, могут возникнуть определенные трудности, обусловленные принципиально неустранимым шумом широкополосной люминесценции некоторых газов, как, например, NO₂, при использовании лазерного излучения видимого диапазона для возбуждения спектров КР исследуемой газовой смеси.

1. Введение

Возможности обнаружения загрязняющих газов в выбросах в атмосферу из труб предприятий и измерения их концентраций КР-лидаром впервые были продемонстрированы более двадцати лет назад [1]. Более того, в наших недавних публикациях [2, 3] по данной проблеме мы показали, что КР-лидарный способ анализа таких выбросов позволяет, дополнительно к информации о концентрации газов, извлекать информацию о валовом выбросе загрязнений, ибо КР-лидарные сигналы от молекул азота, регистрируемые одновременно с сигналами от загрязняющих газов, позволяют оценивать скорость истечения струи выброса из трубы, хотя и при определенных предположениях о механизме подъема газовой смеси в трубе.

Однако для того чтобы использовать КР-лидар в качестве измерительного инструмента в службах защиты окружающей среды, его необходимо сертифицировать. К сожалению, до сих пор нам не удалось найти публикаций по проблеме калибровки КР-лидарных газоанализаторов.

Недавно мы приступили к разработке методики и устройства для калибровки нашего передвижного КР-лидара [4]. Эта работа выполняется совместно с НПО «Дальстандарт» и при поддержке Краевого комитета охраны окружающей среды и природных ресурсов Хабаровского края.

По состоянию работ по данному проекту на настоящий момент нам удалось продемонстрировать осуществимость калибровочных испытаний лидара при применении удаленной от лидара газовой кюветы, которая может поочередно наполняться калиброванными смесями загрязняющих газов с чистым азотом. В то же время первые результаты, полученные при таком подходе, позволили выявить некоторые проблемы, возникающие из специфических обстоятельств, обусловленных необходимостью обнаруживать в такого рода испытаниях газы в замкнутом объеме газовой кюветы, ограниченной оптическими окнами, в отличие от чисто атмосферных лидарных приложений.

Среди эффектов, мешающих спектральному выделению КР-лидарных сигналов от компонентов газовой смеси в кювете, выделим люминесценцию входного и выходного окон кюветы и люминесценцию компонентов самой газовой смеси. Мы различаем их по вполне простой причине, что интенсивность люминесцентного свечения окон кюветы можно снижать, подби-

рая материал окон и (или) увеличивая длину кюветы. Последнее позволяет добиться снижения мешающего вклада люминесценции в сигнал КР от газов смеси в центре кюветы за счет экспоненциального затухания люминесценции во времени с учетом того, что в лидаре используются короткие импульсы зондирующего излучения для получения пространственно разрешенных лидарных откликов от зондируемой среды. В то же время если среда содержит компонент, поглощающий зондирующее излучение, то мы неизбежно будем наблюдать в спектре рассеянного средой излучения люминесцентное свечение на длинах волн, сдвинутых в красную сторону от длины волны зондирующего излучения, которое, вполне вероятно, будет мешающим для регистрации КР-сигналов от других компонентов смеси. Очень часто такая люминесценция наблюдается в широком спектральном интервале, охватывающем тысячи обратных сантиметров в шкале частот. Совершенно очевидно, что такого рода мешающий фактор является неустранимым по сути, что, в свою очередь, требует применения более тонкой спектральной аппаратуры для выделения спектральных линий КР-газов смеси, чем это может показаться на первый взгляд. Именно с подобной ситуацией мы, как правило, и имеем дело при попытках контроля таких наиболее распространенных газов, как CO , NO , NO_2 и SO_2 (в смеси), с помощью КР-лидаров, работающих в видимом диапазоне, ибо и NO и NO_2 имеют в нем широкие полосы поглощения [5].

2. Экспериментальная установка

Оптическая схема калибровочных экспериментов изображена на рис. 1, где также показана блок-схема газовой кюветы. Как видно на рисунке, зондирующий луч лазера фокусируется на середину газовой кюветы через ее входное окно. Далее, пройдя сквозь кювету, луч покидает ее через выходное окно и попадает на черный экран, покрытый камфорной сажей, которая полностью поглощает видимое излучение без заметного переизлучения. Излучение, рассеянное в направлении назад молекулами газов вследствие эффекта КР, поступает на приемную оптическую антенну КР-лидара.

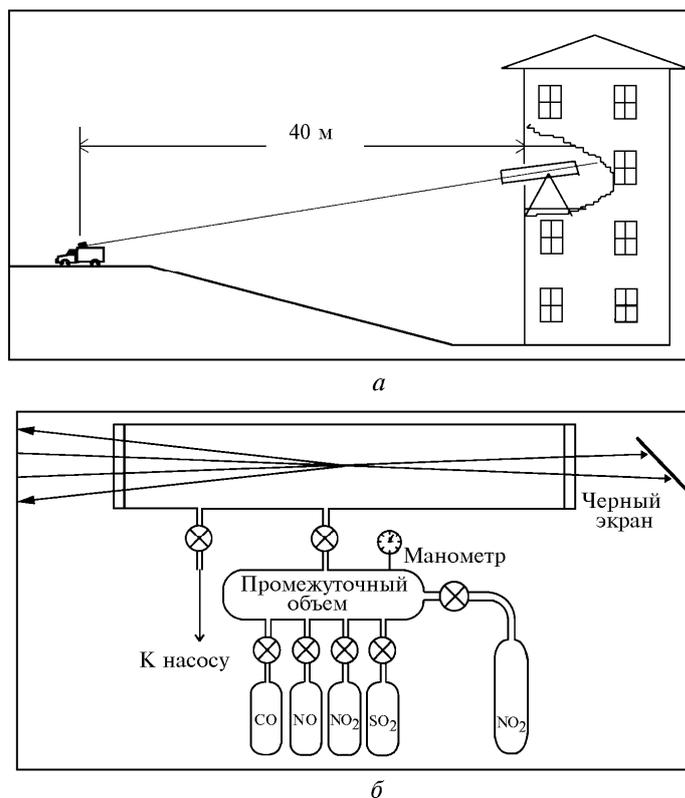


Рис.1. Оптическая схема измерений (а) и блок-схема газовой кюветы (б)

Оптическая схема лидара, смонтированного в автомобильном фургоне, представлена на рис. 2. Как видно из данного рисунка, излучение, рассеянное объемом газа внутри кюветы в на-

правлении назад, сначала подвергается оптической фильтрации на входе приемной оптической антенны с целью подавления спектральной линии несмещенного рассеяния и затем поступает в полихроматор лидара. Оптическая приемопередающая антенна лидара представляет собой матрицу из семи идентичных параболических зеркал, центральный элемент которой используется в качестве коллиматора и элемента, направляющего зондирующий пучок к объекту, тогда как шесть других зеркал собирают излучение, рассеянное объектом в направлении назад. Зондирующее излучение лазера доставляется к передающему зеркалу по моноволоконному оптическому световоду из плавленого кварца. Аналогично шесть моноволокон используются для транспортировки излучения, собранного каждым приемным зеркалом матрицы, к полихроматору. Эти шесть приемных световодов собраны в жгут таким образом, чтобы их выходные торцы образовали входную щель спектрометра, как это показано на рисунке. Использование моноволокон в качестве оптических соединителей между отдельными функциональными блоками лидара обеспечивает высокую стабильность оптических юстировок лидара как целого и отвечает требованиям полевого варианта лидара.

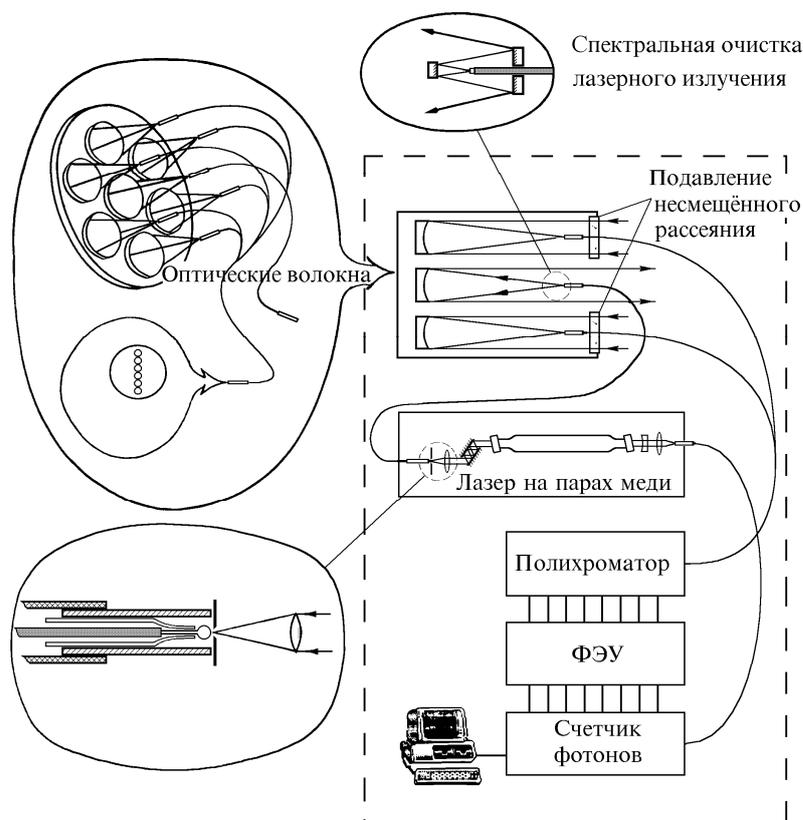


Рис.2. Оптическая схема мобильного КР-лидара

На рис. 3 можно видеть схему размещения нашего лидара в кабине автомобильного фургона. Из рисунка видно, что во время работы только оптика приемопередатчика находится снаружи, тогда как другие функциональные блоки лидара находятся внутри фургона. Основные технические характеристики мобильного КР-лидара приведены ниже.

Технические характеристики мобильного КР-лидара

Передачик (лазер на парах меди, соединенный посредством оптического моноволоконка с центральным зеркалом матрицы приемопередатчика):

Рабочая длина волны, нм	510,6
Средняя мощность, Вт	6
Частота повторения, кГц	7
Длительность импульса, нс	10
Расходимость пучка, мрад	0,5

Калибровка КР-лидарного газоанализатора выбросов в атмосферу 355

Пр и е м н и к (шесть внешних зеркал матрицы, соединенных посредством моноволокон с полихроматором лидара):

Диаметр отдельного зеркала, м	0,15
Фокусное расстояние, м	0,4
Ширина спектральных интервалов, выделяемых на выходе полихроматора, нм	0,6

Система регистрации и обработки данных (8-канальный счетчик фотонов, совместимый с IBM PC):

Число каналов	8
Число стробов в канале	1024
Длительность строба, нс	10

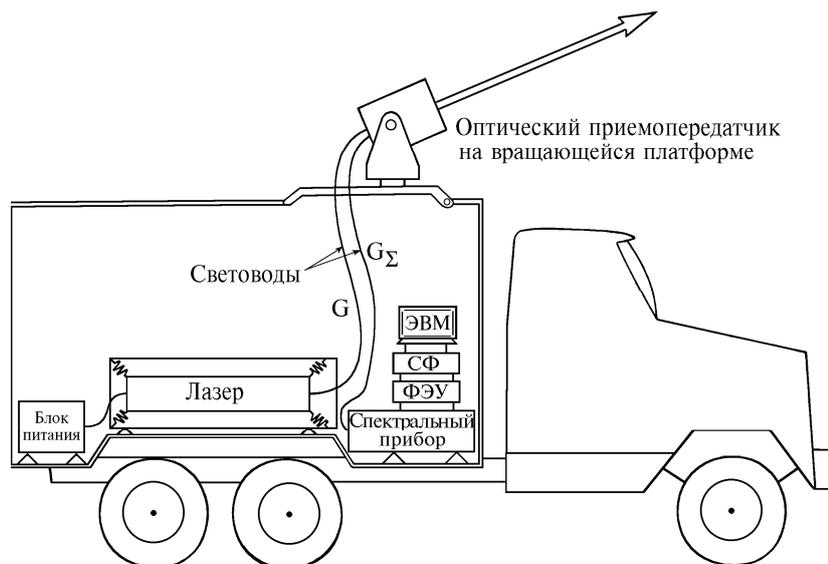


Рис.3. Блок-схема мобильного КР-лидара

3. Методическая основа и экспериментальные результаты

Известно, что преимуществом КР-лидарной методики обнаружения молекул газовых загрязнений воздуха является то, что отношение лидарного сигнала от загрязняющего компонента к одновременно зарегистрированному в том же объеме сигналу от молекул азота прямо пропорционально его концентрации. Другими словами, сигнал от азота используется как внутренний стандарт, ибо концентрацию азота в атмосфере можно считать известной, а ее изменения вдоль трассы зондирования можно легко оценивать из самого лидарного сигнала, например по алгоритму из работы [3]. Отношение КР-лидарных сигналов R , зарегистрированное от одного и того же рассеивающего объема, обычно записывают следующим образом:

$$R = \frac{N^{SO_2}}{N^{N_2}} = \frac{\sigma^{SO_2}}{\sigma^{N_2}} \frac{\tau_{SO_2}}{\tau_{N_2}} \frac{q_{SO_2}}{q_{N_2}} \frac{n_{SO_2}}{n_{N_2}}, \quad (1)$$

где N^i – число фотоотсчетов в соответствующем канале; σ^i – дифференциальное сечение КР i -й молекулы в направлении назад; τ_i – сквозное пропускание соответствующего спектрального канала лидара; q_i – квантовая эффективность i -го ФЭУ; n_i – счетная концентрация i -го газа. В наших калибровочных экспериментах мы сначала откачивали воздух из кюветы, а затем наполняли ее калиброванной газовой смесью до атмосферного давления. Содержание исследуемых газов в стандартной смеси с азотом составляло до 5% по объему. Затем смесь ступенчато разбавлялась чистым азотом. Обычно мы производили по десятку 5-минутных измерений при одном и том же значении установившейся в кювете концентрации примеси. Временной ход КР-лидарных откликов в спектральных каналах, соответствующих линиям КР исследуемых газов, нормированных на лидарный сигнал от азота, приведен на рис. 4,а для случая, когда кювета

наполнялась смесью $\text{SO}_2 + \text{N}_2$. На рис. 4, б представлено отношение лидарных сигналов от SO_2 и N_2 как функция концентрации SO_2 , измерявшейся независимо. Из рис. 4, а хорошо видно, что временной ход нормированного лидарного отклика от SO_2 четко следует за ступенчатым ходом концентрации SO_2 при разбавлении чистым азотом. Соответственно зависимость величины нормированного лидарного отклика SO_2 от его концентрации очень хорошо аппроксимируется прямой линией. На рис. 4,а для сравнения показаны нормированные лидарные отклики, зарегистрированные одновременно в спектральных каналах, соответствующих другим газам. Низкие значения этих отношений, наряду с их слабым изменением во времени (в основном за счет небольшого роста концентрации азота при разбавлении стандартной смеси), наглядно демонстрируют спектральную независимость всех каналов. Однако ситуация в корне меняется, если в смеси имеются газы, которые поглощают излучение зеленой линии лазера на парах меди, использованного в экспериментах. Именно это наблюдается в смесях азота с NO и NO_2 . В этом случае из-за долгоживущей (при низком давлении) и широкополосной по спектру люминесценции лидарные отклики во всех спектральных каналах сильно зависят от концентрации этих молекул в смеси.

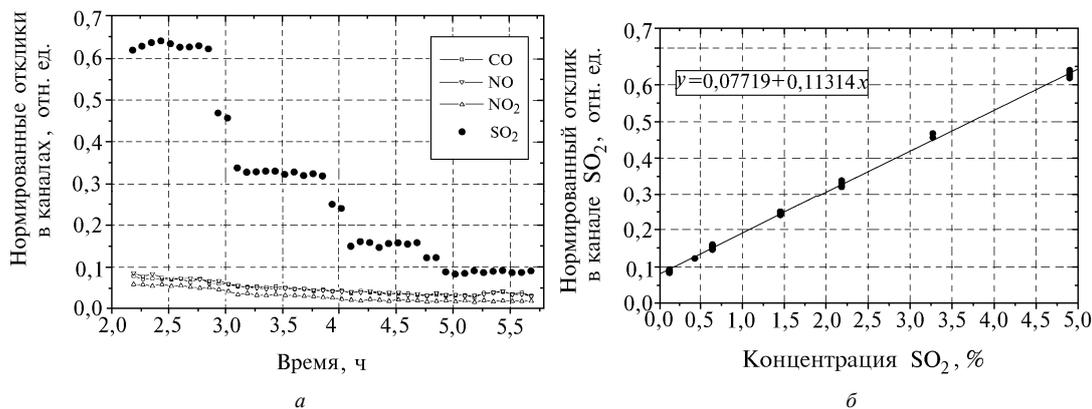


Рис. 4. Нормированные лидарные отклики как функции времени (а) и концентрации SO_2 (б)

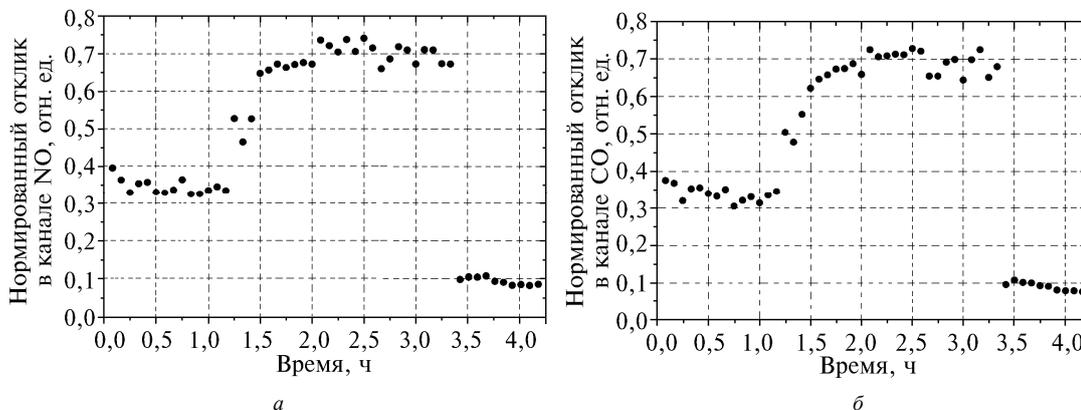


Рис. 5. Нормированные лидарные отклики в спектральных каналах NO (а) и CO (б) как функции времени

На рис. 5 для иллюстрации приведен временной ход нормированных лидарных откликов, зарегистрированных в спектральных каналах, соответствующих КР-линиям NO и CO , при заполнении кюветы смесью $\text{NO} + \text{N}_2$ до давления в несколько десятков торр. Из рисунка хорошо видно, как одновременно с ростом сигнала в канале NO растет и сигнал в канале CO . Для определенности следует заметить, что уровень люминесценции в обоих каналах высок при низком давлении смеси, когда люминесценция не потушена. Резкий спад сигналов в районе трех часов от начала этих измерений связан с эффективным тушением люминесценции молекулами азота, добавленными в смесь при доведении общего давления смеси до 1 атм.

2. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., et al. An Extension of the Raman-Lidar Technique to Measure the Velocity and Temperature of the Atmospheric Emission Jets from Stacks. 16th ILRC, 20-24 July 1992. Cambridge, Mass., USA.
3. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., et al. // Atmos.Oceanic Opt. 5 (1992). 323-329.
4. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., et al. Revised Version of a Raman Lidar for Remote Monitoring of Atmospheric Emissions from Plant Stacks. 17th ILRC. July 25-29, 1994, Sendai Japan.
5. Sidebottom H.M., et al. // J.Am.Chem.Soc. 1997. V 93. P. 2587.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск
НПО «Дальстандарт», Хабаровск

Поступила в редакцию
24 декабря 1996 г.

Yu.F. Arshinov, S.M. Bobrovnikov, I.B. Serikov, D.I. Shelefontyuk, V.K. Shumskii, P.V. Bazylev, V.A. Lugovoi, N.N. Stolyarov. **Calibration of a Raman-Lidar Gas Analyzer of Atmospheric Emissions from Plant Stacks Using a Remote Gas Chamber.**

We discuss calibration tests of our mobile Raman lidar intended for remote monitoring of atmospheric emissions from plant stacks. The calibration experiments have been conducted to validate its capability of remotely detecting, at the stack mouth, the most common gaseous pollutants like CO, NO, NO₂, and SO₂ using a specially designed gas chamber five meters long and 30 cm in diameter that can alternatively be filled with standard mixtures of the above contaminating species with pure nitrogen. The results obtained in these experiments well demonstrate the best features of the Raman-lidar technique in application to gas concentration measurements and this is illustrated with a perfectly linear concentration behavior of the Raman-lidar return from SO₂ molecules in the concentration range of the latter from 0.05 to 5% by volume. At the same time the experiments have clearly shown that such instrumental noises as long-lived broad-band luminescence of the chamber windows can impose a serious limitation on the possibility of certifying lidars as regards the minimum detectable concentration, since just this luminescence noise determines the signal-to-noise ratio at low concentration of a gas species. In addition to this instrumental limitation there can occur certain troubles due to an unavoidable broad-band luminescence of a gas species, like for example NO and NO₂, when using visible laser radiation to excite Raman effect in a gas mixture under study.