

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 543.422.4; 543.27

### ДЕТЕКТИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ АЦЕТИЛЕНА В ГАЗАХ, ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ ИЗ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА, С ПОМОЩЬЮ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО СПЕКТРОМЕТРА НА БАЗЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ЛАЗЕРА\*

Z. Wu<sup>1,2</sup>, L. Zhai<sup>1</sup>, X. He<sup>2</sup>, Q. Yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology,  
Dalian, 116023, PR China*

<sup>2</sup>*Information Engineering Department, Environmental Management College of China,  
Qinhuangdao, 066004, PR China*

*E-mail: eliteceo@263.net*

*yuqx@dlut.edu.cn*

Выделение ацетилена из трансформаторного масла является важным признаком ранних стадий электрического пробоя в цепях трансформаторов. Для обнаружения следов этого газа с успехом может быть применён фотоакустический (ФА) спектрометр на базе перестраиваемого волоконного лазера с детектированием сигнала поглощения на второй гармонике частоты модуляции, так как он обладает быстрой реакцией и хорошей помехоустойчивостью. Проводились ФА-измерения сигнала поглощения ацетилена на второй гармонике частотной модуляции на переходе с длиной волны 1530,3709 нм. Точность измерения концентрации ацетилена в газах, выделяющихся из трансформаторного масла, была достигнута путём анализа независимых компонент в переопределённом базисе на основе модели слепого разделения сигналов с пятью спектральными компонентами, что позволило улучшить предел обнаружения с 1,12 до 0,71 ppb (объёмные единицы). Экспериментально показано, что скорость выделения ацетилена из-за электрического пробоя в масле может достигать 303,72 ppb/с (динамическое время реакции менее 10 с, относительная погрешность около 1,40 %, коэффициент корреляции с линейной зависимостью 0,99946). При комнатной температуре и атмосферном давлении этот метод детектирования ацетилена может быть использован для раннего и сверхраннего обнаружения повреждений трансформатора вследствие электрического пробоя.

*Ключевые слова:* фотоакустическая спектроскопия, ацетилен, вторая гармоника, электрический пробой в трансформаторном масле, перестраиваемый лазер.

**Введение.** Ацетилен, появляющийся в трансформаторном масле, — важный признак ранних стадий неисправностей маслonaполненного электрооборудования. Ацетилен с достаточно низкой концентрацией в газах, выделяемых из трансформаторного масла, образуется в результате искрения и дугообразования, свидетельствующих о серьёзных повреждениях трансформаторов. Технике фотоакустического (ФА) детектирования различных веществ уделяется значительное внимание во многих областях исследований [1–7]. Фотоакустический спектрометр с измерением сигнала поглощения на второй гармонике, основанный на перестраиваемом эрбиевом волоконном лазере (ПЭВЛ), был разработан в [4]. Для обнаружения газов в ближнем инфракрасном диапазоне ПЭВЛ имеет подходящие характеристики, такие как доступность, компактность, высокая монохроматичность линии генерации, помехоустойчивость, диапазон частотной перестройки.

\*Работа выполнена при поддержке Государственного фонда естественных наук Китая (грант № 51277021).

В предлагаемом исследовании ацетилен регистрировался на длине волны 1530,3709 нм. Измеренные данные обрабатывались численно методом анализа независимых компонентов (АНК) в переопределённом базисе на основе модели слепого разделения сигналов (СРС) с выборкой из пяти измеряемых сигналов. Таким образом, ацетилен был обнаружен и точно измерен в калибровочном газе, содержащем мешающий компонент  $H_2O$ , а также в трансформаторном масле, включающем дополнительные растворённые газы.

Цель данной работы — создание методики точного и быстрого измерения концентрации ацетилена, выделяющегося из трансформаторного масла, для ранней диагностики повреждений маслонаполненного оборудования.

**Установка по измерению концентрации ацетилена.** Схема измерений концентрации ацетилена при комнатной температуре и атмосферном давлении изображена на рис. 1. Установка состоит из ФА-детектора, ПЭВЛ, формирующего зондирующее излучение, и электроразрядного бокса с трансформаторным маслом. Длина волны зондирующего излучения ПЭВЛ контролировалась с помощью электрически перестраиваемого волоконного фильтра типа Фабри — Перо, включённого в петлю частотной стабилизации лазера. Выходное излучение ПЭВЛ разделялось на две части волоконным разветвителем. Около 1 % мощности оптического излучения поступало в ячейку с цианистым водородом, служившую в качестве частотного репера для калибровки длины волны лазерного излучения при настройке на линии поглощения детектируемых газов. Остальные 99 % мощности излучения направлялись в эрбиевый волоконный усилитель (ЭВУ) с компьютерным управлением. Диапазон изменения выходной мощности ЭВУ составлял 0–1 Вт, при этом длина волны излучения и ширина спектра оставались, как у задающего лазера. Длина волны ПЭВЛ могла перестраиваться от 1520 до 1610 нм.

**Калибровка ФА-спектрометра на чувствительность к ацетилену и скорость выделения ацетилена при электрическом разряде.** Для измерений концентрации ацетилена методом фотоакустической спектроскопии (ФАС) была выбрана его спектраль-

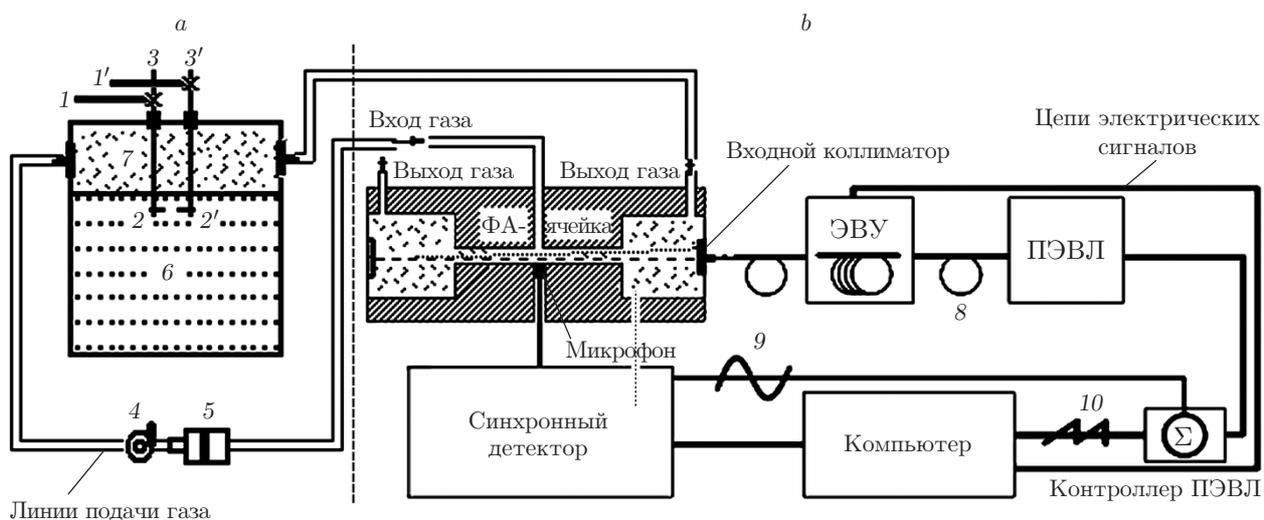


Рис. 1. Установка для экспериментального обнаружения ацетилена: *a* — разрядная камера с трансформаторным маслом, *b* — ФА-спектрометр на основе перестраиваемого лазера. Штриховая линия — входящий лазерный пучок; пунктирная — отражённый лазерный пучок; 1, 1' — подача высоковольтного импульса от генератора Теслы; 2, 2' — разрядные игольчатые электроды; 3, 3' — подводящие электроды; 4 — циркуляционный насос; 5 — масляный фильтр; 6 — трансформаторное масло; 7 — атмосферный газ; 8 — оптическое волокно; 9 — гармонический (синусоидальный) сигнал; 10 — пилообразный сигнал

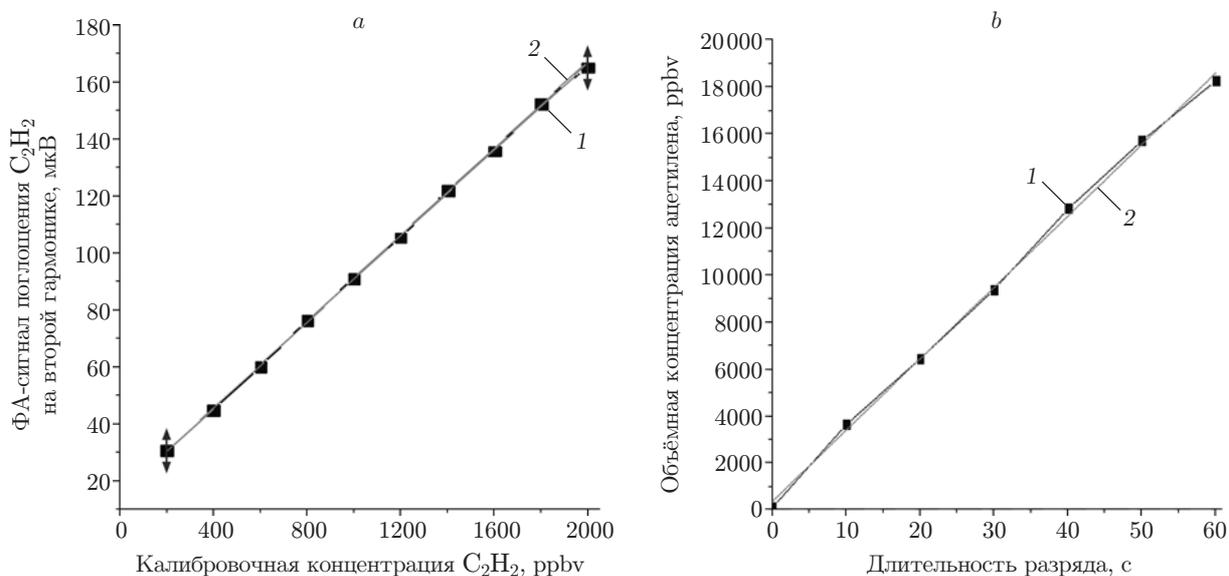


Рис. 2. Измерение концентрации ацетилена: *a* — линейная аппроксимация зависимости калибровочного сигнала от концентрации  $C_2H_2$  (крутизна отклика ФА-сигнала для чистого  $C_2H_2$  0,07542 мкВ/ррб, кривая 1 — калибровочные данные поглощения  $C_2H_2$ , 2 — линейная аппроксимация без смещения  $R = 0,99968$ ); *b* — линейная аппроксимация скорости выделения ацетилена при электрическом пробое в трансформаторном масле (кривая 1 — выделение сигнала  $C_2H_2$  с помощью АНК, 2 — линейная аппроксимация без смещения  $R = 0,9993$ , скорость выделения  $C_2H_2$  303,72 ррбв/с)

ная линия Р9 (с длиной волны линии перехода 1530,3709 нм). На рис. 2, *a* приведён калибровочный график ФА-сигнала в зависимости от концентрации ацетилена, который аппроксимировался линейной функцией с крутизной 0,07542 мкВ/ррб и коэффициентом достоверности 0,99968.

На рис. 2, *b* представлен график, демонстрирующий скорость выделения ацетилена из трансформаторного масла вследствие электрического пробоя, которая достигала 303,720 ррбв/с, погрешность линейной аппроксимации 1,40 % и коэффициент достоверности 0,99946. Динамическое время отклика менее 10 с.

**Фотоакустический сигнал поглощения ацетилена на второй гармонике.** Детектирование любого газа, в том числе и ацетилена, методом ФАС, как правило, производится на фоне некоторого количества других газов. Таким образом, присутствие ацетилена в газовой смеси при модуляции длины волны по закону  $\lambda(t) = \bar{\lambda} + a \cos(2\pi f_{\text{mod}}t)$  ( $t$  — время сканирования,  $a$  — амплитуда модуляции длины волны,  $f_{\text{mod}}$  — частота модуляции длины волны) приводит к изменению коэффициента поглощения и порождает ФА-сигнал на второй гармонике. Математическая модель детектирования ФА-сигнала на второй гармонике может быть записана следующим образом:

$$S(\lambda_i) = H_2(\lambda_i)FP_l(\lambda_i)S_{mp} \sum_{k=1}^N c_k \alpha_k(\lambda_k), \quad (1)$$

где  $\lambda_i = 1530,3709$  нм — аналитическая линия поглощения для ацетилена;  $S(\lambda_i) = A_2(\bar{\lambda}_i + \delta\lambda_i)$  — наблюдаемый ФА-сигнал поглощения на длине волны  $\lambda_i$ ;  $H_2(\lambda_i)$  — коэффициент преобразования модуляции длины волны в ФА-сигнал второй гармонике,  $H_2(\lambda_i) = \frac{1}{4} a^2 \times$

$\times \frac{d^2 g(\lambda_i)}{d\lambda_i^2}$  (при комнатной температуре и атмосферном давлении,  $g(\lambda_i)$  — функция Лоренца для формы спектральной линии поглощения);  $F$  — конструкционная константа ФА-ячейки;  $P_l(\lambda_i)$  — мощность лазера;  $S_{mp}$  — чувствительность микрофона;  $c_k$  — концентрация  $k$ -го газового компонента смеси (в объёмных долях);  $\alpha_k(\lambda_k)$  — коэффициент поглощения  $k$ -го газового компонента на собственной характерной длине волны (для ацетилена  $\lambda_k = \lambda_i = 1530,3709$  нм);  $N$  — число компонентов в газовой смеси.

**Анализ ацетилена на второй гармонике ФА-сигнала.** Доказано, что значения ФА-сигнала  $S(\lambda_i)$  имеют супергауссово распределение, а спектральные линии газов с малым молекулярным весом, таких как  $C_2H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  и др., имеют форму лоренциана с «острыми» пиками поглощения на характерных длинах волн [8–10]. Изучение данных HITRAN показало, что вблизи пика Р9 имеются линии поглощения мешающих газов  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  и др. (рис. 3). Таким образом, при измерении ФА-сигнала ацетилена  $S(\lambda_i)$ , как показано на рис. 4, *a, b*, в действительности будет измеряться суммарный ФА-сигнал от всех компонентов газовой смеси с учётом положения их спектральных линий поглощения. Примем  $\mathbf{x}_i^*(t) = S(\lambda_i)$  на длине волны  $\lambda_i$  внутри спектрального контура, ограниченного полушириной на полувисоте (ПШПВ), тогда характерные ФА-сигналы от мешающих газов определяются другим вектором —  $\mathbf{s}_k(t)$ . Следовательно, соотношение (1) может быть описано как СРС-модель [10]:

$$\mathbf{x}_i^*(t) = \mathbf{A} \mathbf{s}_k(t), \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}_i^*(t)$  — вектор, состоящий из выборок ФА-данных  $S(\lambda_i)$  внутри ПШПВ на линии лазерного зондирования  $\lambda_i$  (1530,3709 нм);  $\mathbf{s}_k(t)$  представляет собой набор характерных ФА-сигналов ( $i = 1, k > 2$ );  $\mathbf{A}$  — матрица, описывающая ожидаемый специфический вклад скрытых компонентов в измеряемую выборку  $\mathbf{x}_i^*(t)$  ( $t$  соответствует времени накопления или времени сканирования ФА-сигналов  $S(\lambda_i)$ ). При большом количестве мешающих газовых компонентов и измерении концентрации лишь одного из газов ( $i = 1$ ) количество определяемых исходных сигналов должно быть  $k > 2$ , тогда уравнение (2) представляет

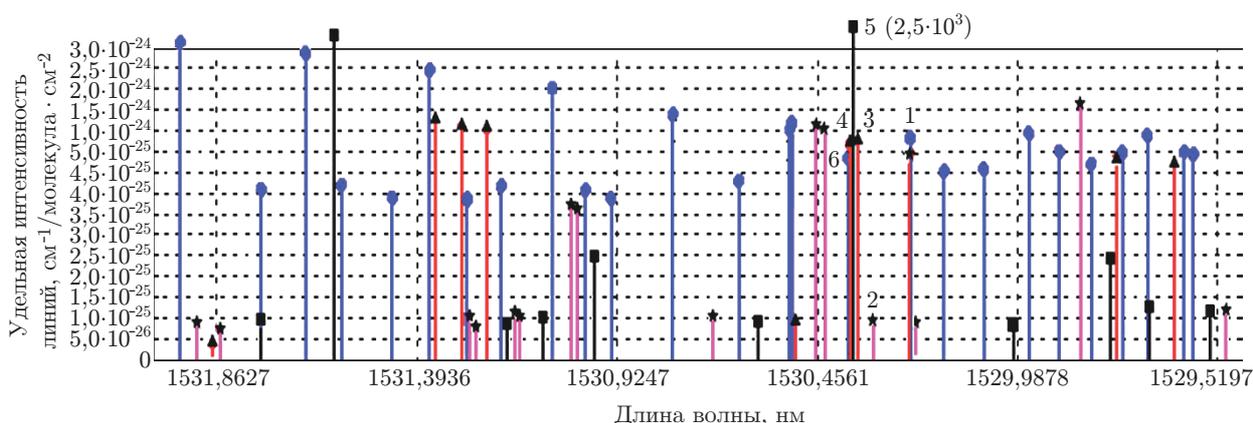


Рис. 3. Положение обертонов поглощения мешающих газов при комнатной температуре и атмосферном давлении в ближнем инфракрасном спектре вблизи пика Р9  $C_2H_2$  (помечен цифрой 5 и показан на рис. 5, *b*). Спектральные линии поглощения молекул:  $H_2O$  (треугольники),  $C_2H_2$  (прямоугольники, интенсивность линий уменьшена в 2500 раз),  $CO_2$  (кружки),  $CH_4$  (звёздочки). Цифрами обозначены линии поглощения мешающих газов вблизи Р9: 1 — линия  $H_2O$  на 1530,2400 нм, 2 —  $CH_4$  на 1530,3608 нм, 3 —  $H_2O$  на 1530,3675 нм, 4 —  $H_2O$  на 1530,3698 нм, 5 —  $C_2H_2$  на 1530,3709 нм, 6 —  $CO_2$  на 1530,3872 нм

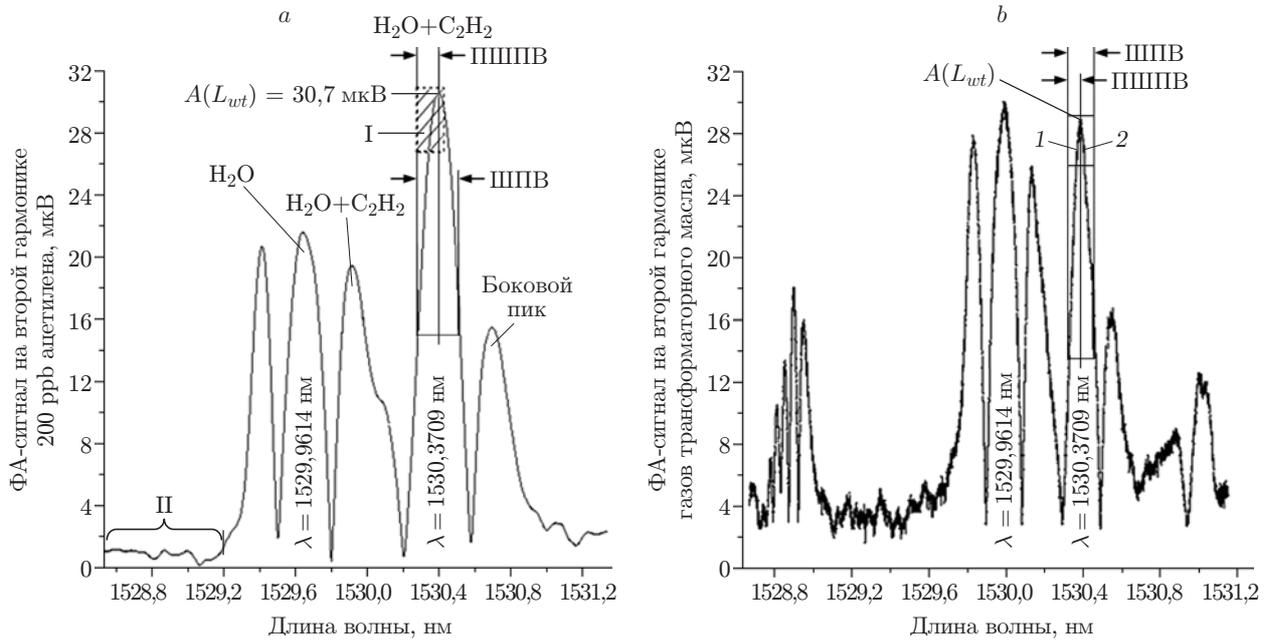


Рис. 4. Профили ФА-сигналов на второй гармонике: *a* — 200 ppb C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> в калибровочной смеси (I — выбранный участок спектра для измерения ацетилена, II — шумовые характеристики: отношение сигнал/шум 99,52, предел обнаружения 1,12 ppb, ошибка измерения ФА-сигнала  $\sigma = 0,1725$  мкВ); *b* — газов, выделяющихся из трансформаторного масла при электрическом пробое (измеряются сигналы выборки  $\mathbf{x}_i^*(t)$  на линии перехода 1530,3709 нм, 1, 2 — левое и правое пространства выборки). Длины волн линий перехода (в нанометрах): H<sub>2</sub>O — 1530,2400, H<sub>2</sub>O — 1530,3675, H<sub>2</sub>O — 1530,3698, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> — 1530,3709 (*a*); H<sub>2</sub>O — 1530,2400, CH<sub>4</sub> — 1530,3608, H<sub>2</sub>O — 1530,3675, H<sub>2</sub>O — 1530,3698, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> — 1530,3709, CO<sub>2</sub> — 1530,3872 (*b*)

собой СРС-модель с переопределённым базисом независимых компонентов (НК) [11–15] и  $\mathbf{x}_i^*(t)$  — некоторый вектор реализации на переопределённом базисе НК [14].

На рис. 5 показано формирование переопределённого базиса НК, описываемого уравнением (2) в виде выборки с пятью измеряемыми величинами, полученными на основе метода взвешенного усечения выбранных сигналов, обозначенных как *A* (здесь параметр взвешенного усечения  $L_{wt}$ ) [14]. Таким образом, вектор  $\mathbf{x}_i(t)$  в полном базисе НК может быть описан как [14]

$$\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}_k(t). \tag{3}$$

Вектор  $\mathbf{x}_i(t)$  проанализирован в [14] с помощью быстрого АНК-алгоритма (FastICA), основанного на негэнтропии. По результатам численного моделирования видно, что для калибровочной смеси с концентрацией ацетилена 200 ppb предел обнаружения может быть улучшен с 1,12 (см. рис. 4, *a*) до 0,71 ppb (предел обнаружения метода показан на рис. 6, *a*) после того, как из выборки  $\mathbf{x}_i^*(t)$  внутри ПШПВ (см. рис. 4, *a*) удаляется вклад H<sub>2</sub>O. Фотоакустический сигнал чистого ацетилена 24,9 мкВ (что соответствует концентрации ацетилена около 170 ppb, рис. 6, *b, c*) замаскирован ФА-сигналами газов, растворённых в трансформаторном масле, в выборке  $\mathbf{x}_i^*(t)$  внутри ПШПВ (см. рис. 4, *b*). Модуляционный индекс *m* определяется как  $m = a/\text{ПШПВ}$  (*a* — амплитуда гармонической частотной модуляции  $\lambda(t)$ ).

**Результаты и обсуждение.** Анализ особенностей ФА-сигналов на линии поглощения ацетилена показал, что путём измерения набора из пяти ФА-сигналов в узком спектральном диапазоне внутри ПШПВ можно более точно определить полный базис НК для

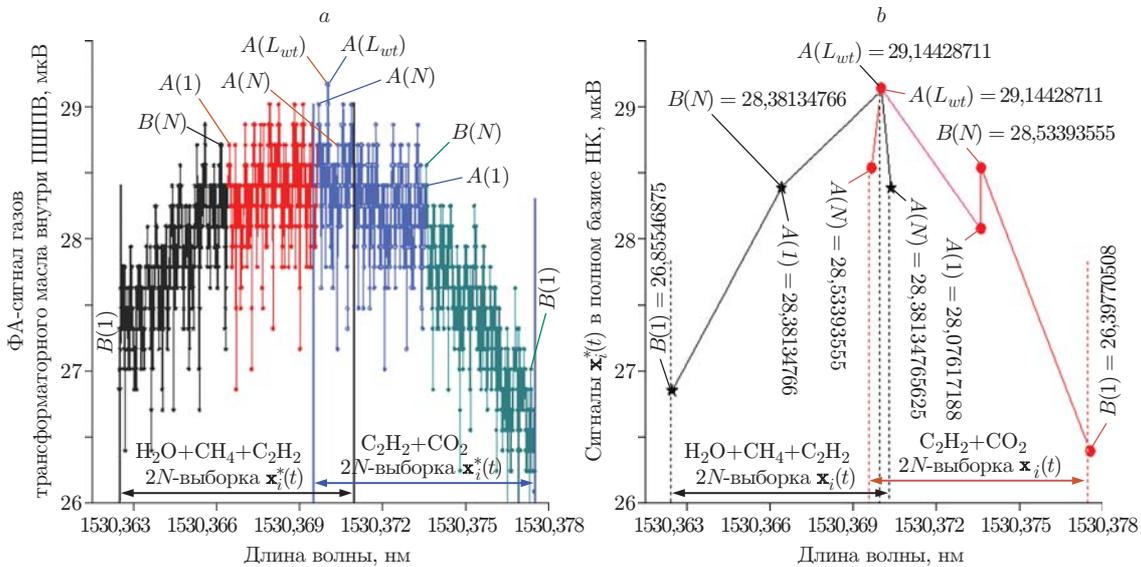


Рис. 5. Метод пятиточечной выборки, основанный на взвешенном усечении системы уравнений [14]: *a* — измерение ФА-сигналов на второй гармонике газов трансформаторного масла внутри ПШПВ с малым шагом перестройки частоты лазера до электрического пробы (слева исходный вектор  $\mathbf{s}_k(t)$  содержит сигналы  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{C}_2\text{H}_2$ , которые дали вклад в наблюдаемый сигнал  $\mathbf{x}_i^*(t)$  в левой части ПШПВ, справа — сигналы  $\text{C}_2\text{H}_2$  и  $\text{CO}_2$ , которые дали вклад в правой части ПШПВ,  $A(L_{wt})$  — глобальный максимум в пространстве  $\mathbf{x}_i^*(t) = 29,14$  мкВ; длины волн линий перехода (в нанометрах):  $\text{CH}_4$  — 1530,3608,  $\text{H}_2\text{O}$  — 1530,3675,  $\text{H}_2\text{O}$  — 1530,3698,  $\text{C}_2\text{H}_2$  — 1530,3709,  $\text{CO}_2$  — 1530,3872); *b* — обработка данных полного базиса НК вектора  $\mathbf{x}_i(t)$  методом пятиточечной выборки в левой (правой) части ПШПВ (см. рис. 4, *a*) (полупространство слева от максимума  $\mathbf{x}_i(t) = [B, A]$  и справа  $\mathbf{x}_i(t) = [A, B]$ ), в левом полупространстве  $\mathbf{x}_i(t) = \{B(1), \dots, B(N), A(1), \dots, A(L_{wt}), \dots, A(N)\}$ , в правом —  $\mathbf{x}_i(t) = \{A(N), \dots, A(L_{wt}), \dots, A(1), B(N), \dots, B(1)\}$  ( $A$  — заданный набор данных исследуемой выборки,  $B$  — итоговый набор данных [14])

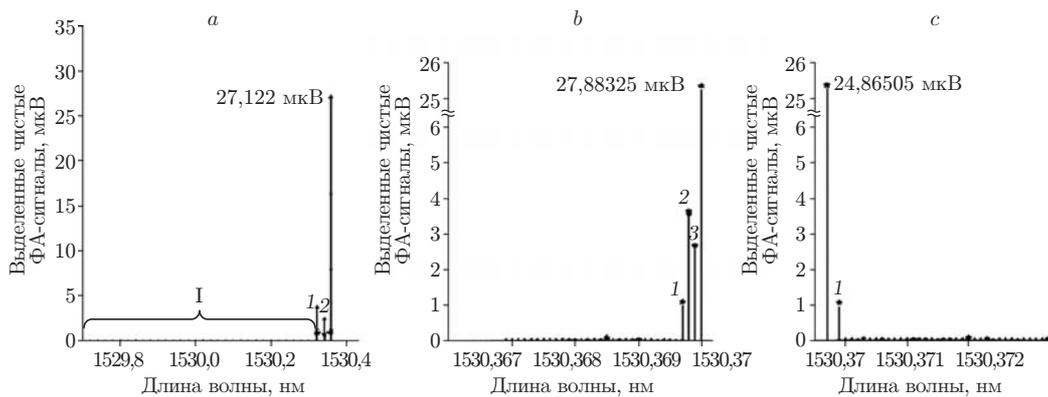


Рис. 6. Отфильтрованный ФА-сигнал ацетилена (модуляционный индекс  $m = 0,2$ ): *a* — после устранения влияния  $\text{H}_2\text{O}$  в калибровочной смеси с концентрацией 200 ppb (сигнал  $\text{H}_2\text{O}$  на 1530,3675 нм (1), на 1530,3698 нм (2), I — улучшение предела обнаружения до 0,71 ppb,  $\sigma = 0,096620709$  мкВ); *b* — в смеси газов, выделяющихся из трансформаторного масла, из выборки  $\mathbf{x}_i^*(t) = \{\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_2\}$  в левой части ПШПВ (сигнал  $\text{CH}_4$  на 1530,3608 нм (1),  $\text{H}_2\text{O}$  на 1530,3675 нм (2),  $\text{H}_2\text{O}$  на 1530,3698 нм (3)); *c* — из выборки  $\mathbf{x}_i^*(t) = \{\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CO}_2\}$  в правой части ПШПВ (1 — сигнал  $\text{CO}_2$  на 1530,3872 нм) (см. рис. 4, *b*)

анализа многокомпонентной газовой смеси методом фотоакустической спектроскопии. Этого достаточно для выделения сигнала ацетилена даже на значительном шумовом фоне, в том числе на фоне других газовых компонентов. Предложенная методика позволяет достичь высокого предела обнаружения 0,71 ppb и аналитической точности 1,40 %. Таким образом, можно в дальнейшем ещё больше повысить скорость обнаружения газов методом ФАС, что даст возможность анализировать концентрацию ацетилена в реальном времени, а также прогнозировать ранние или даже сверхранные стадии возникновения неисправностей маслонаполненного оборудования вследствие электрического пробоя.

**Заключение.** В данном исследовании измерения концентрации ацетилена ФА-спектрометром и последующий анализ выделения его ФА-сигнала, основанный на СРС-модели с переопределённым базисом НК, продемонстрировали достаточность проведения измерений на пяти длинах волн. В частности, после анализа ФА-сигналов второй гармоники калибровочной смеси ацетилена был достигнут порог предела обнаружения на уровне субмиллиардных объёмных долей (0,71 ppb). Узкий диапазон частотной перестройки зондирующего лазера с измерением сигнала поглощения на пяти длинах волн улучшает скорость обнаружения и анализа ацетилена методом ФАС в многокомпонентных газовых смесях, где примеси порождают фоновые помехи. Эксперименты по обнаружению ацетилена, выделяющегося из трансформаторного масла вследствие электрического пробоя, показывают, что при комнатной температуре и атмосферном давлении предложенная методика удовлетворяет требованиям быстрого обнаружения ацетилена и точного прогнозирования ранних и сверхранных повреждений трансформаторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бессмельцев В. П., Голошевский Н. В., Смирнов К. К.** Особенности управления лазерными системами микрообработки движущихся носителей // *Автоматрия*. 2010. **46**, № 1. С. 98–106.
2. **Zhang W., Wu Z., Yu Q.** Photoacoustic spectroscopy for fast and sensitive ammonia detection // *Chin. Opt. Lett.* 2007. **5**, Is. 11. P. 677–679.
3. **Wang J., Zhang W., Li L., Yu Q.** Breath ammonia detection based on tunable fiber laser photoacoustic spectroscopy // *Appl. Phys. B*. 2011. **103**, Is. 2. P. 263–269.
4. **Wang J., Zhang W., Liang L., Yu Q.** Tunable fiber laser based photoacoustic spectrometer for multi-gas analysis // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2011. **160**, Is. 1. P. 1268–1272.
5. **Liu J. T. C., Jeffries J. B., Hanson R. K.** Large-modulation-depth 2f spectroscopy with diode lasers for rapid temperature and species measurements in gases with blended and broadened spectra // *Appl. Opt.* 2004. **43**, Is. 35. P. 6500–6509.
6. **Sun M., Feng N., Shen Y. et al.** Photoacoustic image reconstruction based on Bayesian compressive sensing algorithm // *Chin. Opt. Lett.* 2011. **9**, Is. 6. P. 061002–061005.
7. **Liu S., Zhang W., Yu Q.** Photoacoustic spectrometer based on the combination of tunable erbium doped fiber laser and erbium doped fiber amplifier // *Chin. Journ. Las.* 2009. **36**, N 4. P. 964–967.
8. **Palmer J. A., Kreutz-Delgado K., Makeig S.** Super-Gaussian mixture source model for ICA // *Lecture Notes in Computer Sci.* 2006. **3889**. P. 854–861.
9. **A brief comparison of 2f and broadly swept detection techniques** / Daylight Solutions, Inc. 2007. URL: <http://www.daylightsolutions.com/assets/002/5190.pdf> (дата обращения: 24.01.2014).
10. **Huvarinen A., Oja E.** Independent component analysis: algorithms and applications // *Neural Networks*. 2000. **13**, Is. 4–5. P. 411–430.

11. **Amari S.-I., Cichocki A., Yang H. H.** A new learning algorithm for blind source separation // Advances in Neural Information Processing Systems 8. Cambridge, USA: MIT Press, 1996. P. 757–763.
12. **Lewicki M. S., Sejnowski T. J.** Learning overcomplete representations // Neural Computat. 2000. **12**, N 2. P. 337–365.
13. **Wu Z., Zhang W., Wang J., Yu Q.** Improvement of signal to noise ratio and detection limit for gas-photoacoustic-signal detection based on feature extraction in blind source separation // Anal. Chem. Lett. 2012. **2**, N 1. P. 27–32.
14. **Wu Z., Zhang W., Wang J., Yu Q.** Feature extraction for gas photoacoustic spectroscopy and content inverse based on overcomplete ICA bases // Opt. and Laser Technol. 2013. **48**. P. 580–588.
15. **Olshausen B. A., Field D. J.** Sparse coding with an overcomplete basis set: A strategy employed by V1? // Vis. Res. 1997. **37**, Is. 23. P. 3311–3325.

*Поступила в редакцию 16 июня 2012 г.*

---