

К. т. н. Н. А. ДЕНИСОВ

Украина, НТУУ “Киевский политехнический институт”  
E-mail: denysov@hotmail.com

Дата поступления в редакцию  
06.02 2006 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. Ф. КОВАЛЕНКО  
(КНУ им. Тараса Шевченко, г. Киев)

## НОВЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЗОНДЫ ДЛЯ АБСОРБЦИОННОГО АНАЛИЗА

*Предложены новые двухканальные волоконно-оптические зонды для оперативного измерения поглощения или пропускания биологических и техногенных жидкостей и газов.*

В последние годы волоконно-оптические системы находят широкое использование в научных и промышленных лабораториях для проведения аналитических исследований в реальном масштабе времени. Обеспечение возможности оперативного измерения поглощения и пропускания биологических или техногенных жидкостей и газов, особенно в случае их минимального количества, значительной химической реактивности или экологической опасности, является первоочередным требованием при проведении спектрального экспресс-анализа в условиях научных и промышленных лабораторий.

В типовом случае волоконно-оптические системы для измерения поглощения и пропускания включают два базовых модуля (модуль источников излучения и аналитический модуль), а также специальный измерительный блок, конфигурация которого напрямую зависит от используемой измерительной схемы [1]. Модуль источника излучения может быть реализован на базе любого полихроматического источника излучения со спектральной селекцией каналов либо комбинации нескольких монохроматических или квазимонохроматических источников излучения (лазерные диоды или светоизлучающие диоды).

В качестве аналитического модуля наиболее часто используется одно- или двухканальный миниатюрный волоконно-оптический спектрометр с выводением спектров пропускания (поглощения) на экран монитора персонального компьютера. Измерительный блок с линейной оптической схемой с каналом сравнения или без него (рис. 1, а, б) может быть реализован в виде специальной проточной вставки к трубопроводу (дистанционные in-line-измерения с фиксированным рабочим расстоянием) либо со стандартной 1-см-кюветой. Для экспресс-измерения поглощения незначительных количеств биологических или техногенных веществ в открытых резервуарах используются погружаемые зонды с фиксированным или пошагово изменяемым рабочим расстоянием (рис. 1, в). При измерении пропускания и поглощения в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазо-

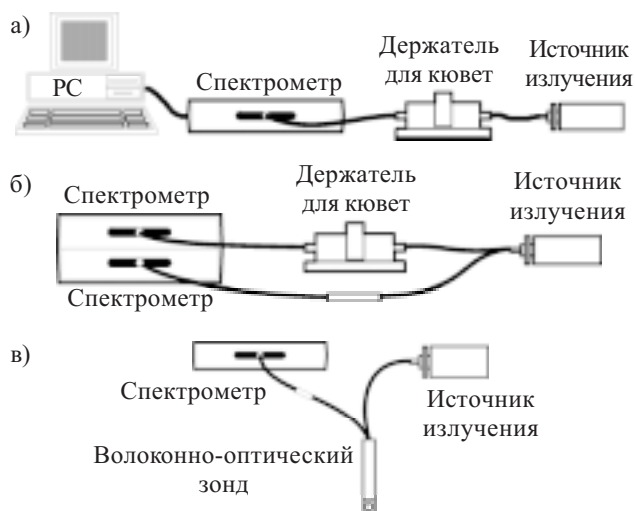


Рис. 1. Типовые схемы для измерения поглощения и пропускания образцов:

а — без канала сравнения; б — с каналом сравнения;  
в — погружением зонда в жидкость

нах спектра рабочее расстояние между облучающим и приемным волокнами варьируется в диапазоне от 1 до 20 мм в зависимости от поглощающей способности исследуемых веществ.

### Методы и средства исследования

Для решения задачи измерения пропускания и поглощения образцов жидких и газообразных веществ в широком спектральном диапазоне при условии фиксированного или пошагово изменяемого рабочего расстояния между облучающим и приемным волокнами была разработана и исследована группа двухканальных волоконно-оптических зондов, соединенных с модулем источника излучения со спектральной селекцией каналов и с волоконно-оптическим спектрометром в качестве регистрирующего прибора. Указанные зонды были разработаны с учетом двух важных предпосылок, а именно: облучающая волоконная система должна обеспечивать на выходе пучок лучей с минимальной расходимостью, а приемная волоконная система должна собирать излучение, прошедшее исследуемый образец вещества, с максимальной оптической эффективностью.

Предложенные системы включают четыре возможных комбинации квазиколлимирующих систем, которые реализуют концепцию “steady beam” (SBS) [2], и линзированных оптических волокон с обрат-

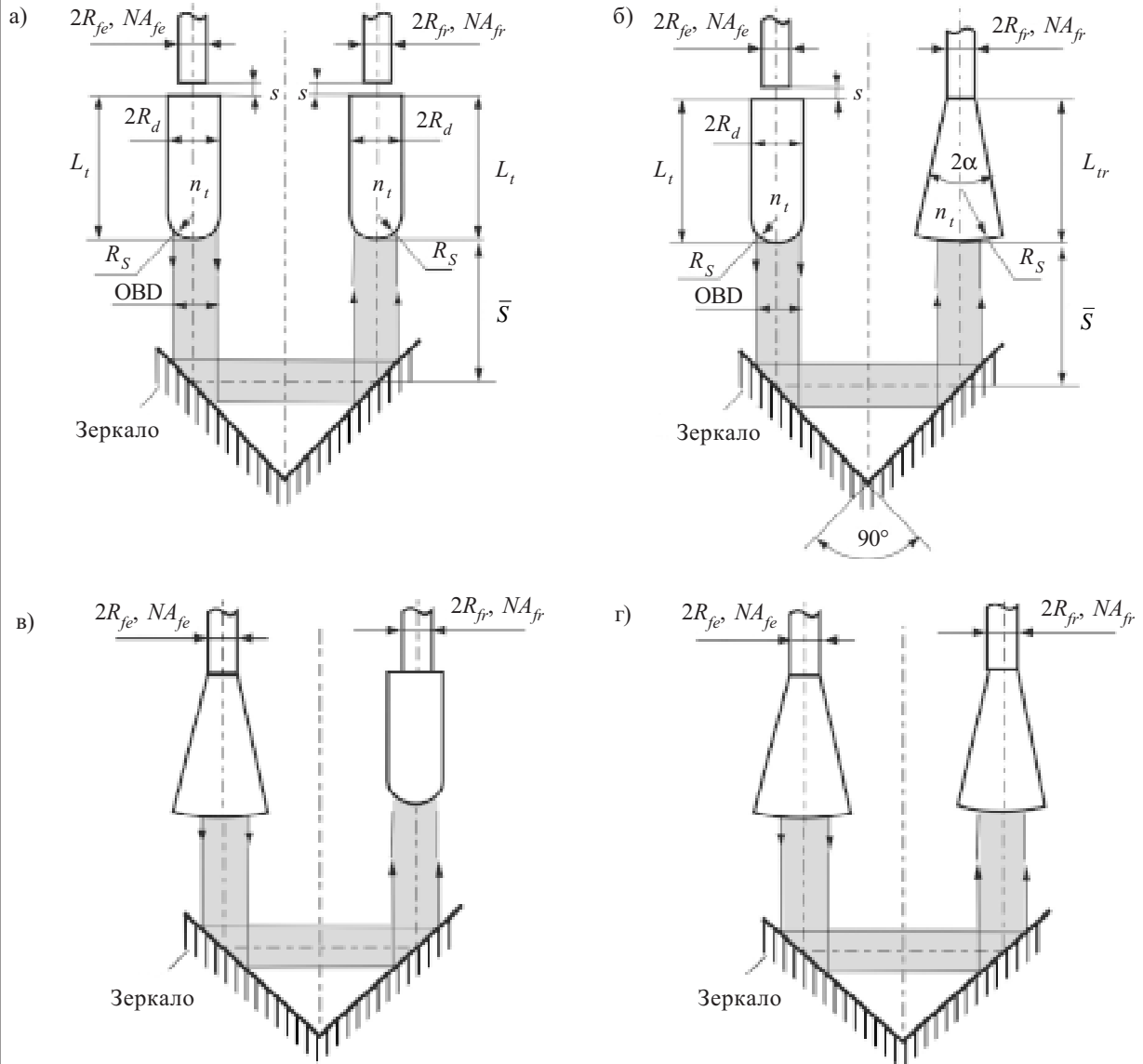


Рис. 2. Схемы волоконно-оптических зондов для измерения поглощения и пропускания веществ биологического и техногенного происхождения

ным конусом (up-tapered lens-ended fiber — ULF), которые используются в качестве облучающих и приемных волоконно-оптических систем (рис. 2). Эти системы на выходе наконечника облучающего волокна формируют поток излучения с минимальной расходимостью, что способствует повышению фотометрической точности измерений поглощения образцов исследуемых веществ. Использование SBS и ULF оптических систем позволяет реализовать преимуще-

ства U-образной измерительной схемы при конструировании малогабаритных погружаемых зондов для измерения поглощения различных веществ — как техногенного, так и биологического происхождения.

Геометрические размеры предложенных волоконно-оптических зондов представлены в таблице.

Во всех вариантах зондов в облучающем и приемном каналах используются кварцевые волокна с диаметром сердцевины соответственно  $2R_{fe}=300$  мкм

Тип зонда	Рабочая среда	Облучающая система	Размеры, мм			Приемная система	Размеры, мм		
			$2R_{fe}$	$L_t$ или $L_{tr}$	$R_s$		$2R_{fr}$	$L_t$ или $L_{tr}$	$R_s$
Ia	Воздух	SBS	0,3	7,0	2,2	SBS	0,6	9,0	3,2
Ib	Жидкость	SBS	0,3	7,0	1,7	SBS	0,6	6,0	1,8
IIa	Воздух	SBS	0,3	5,4	1,5	ULF	0,6	17,0	3,0
IIb	Жидкость	SBS	0,3	4,8	1,1	ULF	0,6	17,0	3,0
IIIa	Воздух	ULF	0,3	16,0	2,6	SBS	0,6	8,5	1,8
IIIb	Жидкость	ULF	0,3	16,0	2,6	SBS	0,6	8,5	1,8
IVa	Воздух	ULF	0,3	16,0	2,7	ULF	0,6	17,0	4,0
IVb	Жидкость	ULF	0,3	15,6	1,0	ULF	0,6	17,5	1,2

и  $2R_{fr}=600$  мкм и числовой апертурой  $NA=0,22$ . Облучающие и приемные ULF-системы при специфицированной длине конуса  $L_{tr}$  имели отрицательный угол конусности  $2\alpha$  1,21 и 1,47°, соответственно. Изготовителем ULF-систем является компания InnoVa-Quartz, Inc. (Феникс, AZ, США). SBS-системы были разработаны на кафедре ООЭП НТУУ “КПИ” и изготовлены ООО “Фотоника Плюс”, г. Черкассы (оптические волокна) и ООО “Точприбор”, г. Харьков (оптические наконечники). Оптические наконечники SBS-систем изготавливались из кварца (для рабочей среды воздух/газ) или из синтетического сапфира (для жидкой рабочей среды).

Приведенные в таблице геометрические размеры наконечников SBS-систем оптимизированы для спектрального диапазона от 193 до 1100 нм, нулевого зазора ( $s=0$ ) между волокном и наконечником и специфицированных диаметра сердцевины волокна и его числовой апертуры. В случае необходимости для конкретной длины волны излучения длина наконечника  $L_t$  и кривизна его выходной поверхности  $R_s$  могут быть незначительно изменены (не более чем на 20% от значений, приведенных в таблице) для оптимизации таких выходных параметров как интервал квазиколлимированного пучка (steady beam distance — SBD)  $L_{SB}$  и выходной диаметр пучка (output beam diameter — OBD)  $D_{SB}$  [2]. Оптимизационный эффект также может быть достигнут минимальным изменением зазора  $s$  между волокном и наконечником (до 100 мкм).

**Обсуждение результатов и выводы**

В качестве числовой меры оценки эффективности волоконно-оптических зондов для измерения поглощения и пропускания использовался расчетный коэффициент оптической эффективности информативного сигнала (SOE)  $S_{EF}$  [3]. Указанный коэффициент позволяет учитывать геометрию облучающей и приемной волоконно-оптических систем, их взаимное расположение и эффективность их оптического сопряжения. Эффективность предложенных волоконно-оптических зондов численно исследовалась в диапазоне изменения рабочих расстояний от 1 до 20 мм.

Графики зависимости SOE-коэффициентов зондов от рабочего расстояния, рассчитанные с использованием специальной компьютерной программы SPERA, разработанной в НТУУ “КПИ”, приведены на рис. 3.

Легко видеть, что зонды III и IV, за исключением исполнения IIIb, являются оптимизированными и имеют четкий максимум SOE-коэффициентов для стандартного 10-мм рабочего расстояния, которое является общепринятым при измерениях поглощения. Вместе с тем оптическая эффективность всех зондов с SBS-системами (исполнения I и II) медленно меняется вдоль всего диапазона рабочих расстояний. SOE-коэффициент “чистых” SBS-систем (исполнения Ia и Ib) меняется не более чем на 12% с четким миниму-

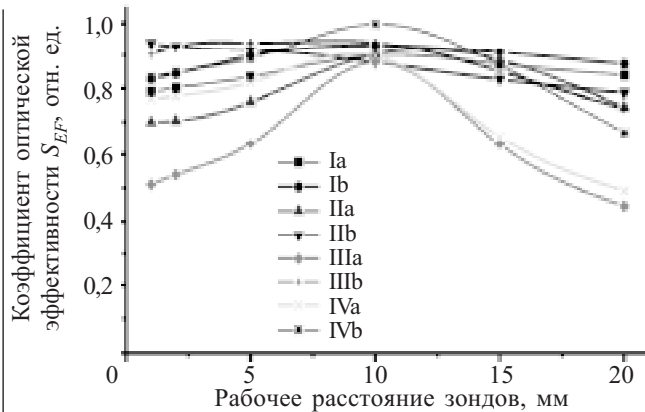


Рис. 3. Зависимость коэффициента оптической эффективности исследуемых типов зондов (см. таблицу) от измерительного рабочего расстояния

мом на стандартном 10-мм рабочем расстоянии. Зонды “смешанной” конфигурации (с одновременным использованием SBS- и ULF-систем, исполнения IIa, IIb и IIIb) имеют большую вариацию значений SOE-коэффициентов (22, 16 и 21%, соответственно) без четко определенного максимума.

По мнению автора, ULF-системы могут быть рекомендованы как для in-line потокового мониторинга пропускания или поглощения, так и для измерений погружением — для волоконно-оптических зондов с фиксированным рабочим расстоянием. “Чистые” SBS-системы имеют существенное преимущество перед другими исполнениями измерительных зондов благодаря расширенному диапазону SBD-интервала (варьируется от 22,5 до 24,1 мм для диаметра сердцевины облучающего волокна  $2R_{fe}=300$  мкм). Этот параметр является важным при конструировании погружаемых зондов с переменным рабочим расстоянием. Следует отметить, что SBD-интервал может быть существенно увеличен (в 1,5 или даже в 3 раза) для меньших диаметров сердцевины облучающих волокон (соответственно для  $2R_{fe}$  200 и 100 мкм).

Использование U-образной схемы компоновки волоконно-оптического зонда позволяет разместить волоконные наконечники облучающей и приемной части, а также угловое (90°) зеркало, внутри кварцевой или стальной трубки с внутренним диаметром 4 мм и внешним диаметром 5—6 мм, что дает возможность изготавливать малогабаритные погружаемые зонды для экспресс-анализа образцов разнообразных веществ.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Grim K. Optical fiber reaches from lab to factory // Photonics Spectra.— 1996.— N 12.— P. 91—96.
2. Denisov N. A., Griffin S. E. Non-contact laser fiber delivery systems for endoscopic medical applications // Proc. SPIE.— 1998.— Vol. 3567.— P. 2—9.
3. Denisov N. A., Griffin S. E. Contact fiber probes for in-vivo optical spectroscopy: comparative analysis // Proc. SPIE.— 1998.— Vol. 3250.— P. 44—55.