



**РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И  
ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА  
НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ**

**Кенгесбаев Салават Куанишбаевич**

*Докторант кафедры "Системы телерадиовещания" ТИУТ. Тел.: +998 (99) 959-90-65 Эл. почта: salawatkenesbaev@gmail.com*

**Аннотация:** *В данной статье представлено оптоэлектронное устройство, разработанное на основе метода нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Устройство предназначено для безопасного и оперативного контроля в реальном времени физико-химических параметров питьевой воды, нефти, биологических жидкостей и соков. В его состав входят полусферический НПВО-сенсор, светодиоды, фотодетекторы, компенсационный канал и модуль машинного обучения. По результатам анализа призм ZnSe, алмаза и Ge наиболее оптимальным вариантом была выбрана алмазная призма. Модуль машинного обучения осуществляет прогнозирование параметров DOC, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub>, автоматически формируя классификацию «Пригодно/Непригодно».*

**Ключевые слова:** *метод НПВО, оптоэлектронное устройство, полусферический сенсор, питьевая вода, нефть, биологическая жидкость, машинное обучение, оптическая спектроскопия.*

**ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы задача оперативного и достоверного определения физических и химических параметров жидких сред приобретает особую актуальность. В этом контексте метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) занимает особое место, так как он позволяет анализировать оптические свойства жидкостей с использованием неинвазивного подхода, обладающего высокой чувствительностью [1].

Традиционные методы химического анализа — титриметрия, хроматография, гравиметрия и другие лабораторные методики — обеспечивают высокую точность, однако требуют значительных временных и ресурсных затрат, предполагают использование дорогостоящих реагентов и не предоставляют возможности автоматизированного мониторинга. Поэтому потребность в безопасных, компактных устройствах, работающих в режиме реального времени, постоянно возрастает [2].

Особенно актуальной является задача контроля качества питьевой воды, безопасного анализа нефти и нефтепродуктов, а также оперативного



## "INNOVATIVE ACHIEVEMENTS IN SCIENCE 2025"

определения состава биологических жидкостей (например, крови) и фруктовых соков. В данной области применение сенсоров, основанных на методе нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), позволяет упростить процесс мониторинга, обеспечить высокий уровень безопасности и получать результаты с высокой точностью в режиме реального времени [3].

В данной статье подробно рассматриваются процесс разработки оптоэлектронного устройства на основе метода НПВО, его функциональная схема, перечень применяемых оптоэлектронных компонентов и принцип работы.

### II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Взрывопожарная безопасность устройства обеспечивается в соответствии с эксплуатационными требованиями: электрическая часть полностью вынесена на удаление, а к измерительной головке источник излучения и приёмник подключаются через оптоволоконную связь. Такое решение позволяет проводить измерительный процесс безопасно, стабильно и в долговременном режиме в средах с повышенной опасностью возгорания и взрыва, таких как нефть и нефтепродукты, а также при строгих гигиенических требованиях к анализу воды и биологических жидкостей.

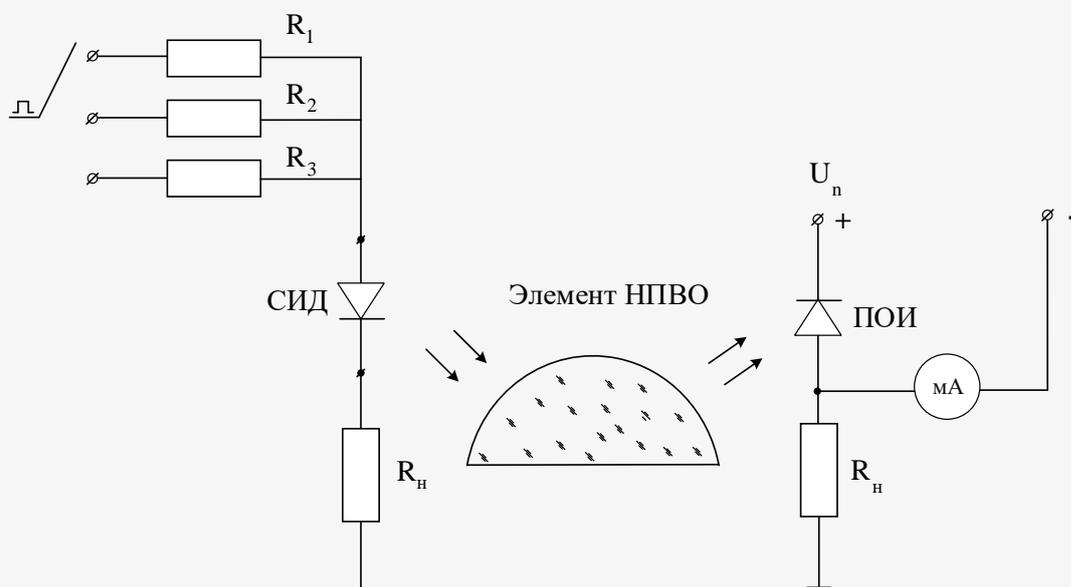


Рис. 1. Структура и электрическая схема полусферического сенсора на основе метода НПВО

В составе сенсора на входной части расположены цепочка сопротивлений ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) и светоизлучающие диоды, которые служат источником оптического излучения. Сформированный свет направляется на полусферический элемент НПВО, через который определяется оптические свойства образца жидкости. Излучение, выходящее из элемента НПВО, преобразуется в электрические



## "INNOVATIVE ACHIEVEMENTS IN SCIENCE 2025"

сигналы с помощью фотодетекторов. На выходной части установлены сопротивления ( $R_n$ ) для стабилизации и измерения, а также миллиамперметр, фиксирующий электрический сигнал в виде тока.

Для спектроскопии НПВО глубина проникновения в образец ( $d_p$ ) была рассчитана при волновом числе  $1000 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda \approx 10 \text{ мкм}$ ) и угле падения  $45^\circ$ . Как видно из Таблицы 1 и Рисунка 2, значения  $d_p$  для призм ZnSe и алмаза практически одинаковы: для образцов воды, биологических жидкостей (крови) и сока они составляют  $\approx 1.5$ – $1.6 \text{ мкм}$ , а для нефти —  $\approx 2.1$ – $2.2 \text{ мкм}$ . В случае призмы из Ge значения  $d_p$  значительно меньше (около  $0.6 \text{ мкм}$ ), что делает её эффективной для анализа поверхностных слоёв [4].

Таблица 1. Показатели преломления призм для НПВО и значения глубины проникновения в различных образцах.

Материал призмы	Показатель преломления призмы ( $n_1$ )	Глубина проникновения ( $d_p$ ) (мкм)				Показатель преломления образца ( $n_2$ ) для условия полного внутреннего отражения	Минимальная граница волнового числа
		Ichimlik suvi ( $n_2=1,33$ )	Neft ( $n_2=1,52$ )	Biologik suyuqlik(qon) ( $n_2=1,36$ )	Sharbat (olma) ( $n_2=1,35$ )		
ZnSe	2.4	1.51	2.10	1.56	1.54	$\leq 1.7$	$\approx 550 \text{ см}^{-1}$
Алмаз	2.4	1.54	2.20	1.60	1.58	$\leq 1.7$	$\approx 400 \text{ см}^{-1}$
Ge	4.0	0.63	0.66	0.64	0.64	$\leq 2.8$	$\approx 650 \text{ см}^{-1}$

На рисунке показана зависимость глубины проникновения ( $d_p$ ) от волнового числа: при уменьшении волнового числа ( $4000$ – $400 \text{ см}^{-1}$ ) величина  $d_p$  возрастает, что означает более глубокое проникновение длинноволнового излучения в образец. Во всех случаях кривая для Ge расположена ниже, тогда как кривые для ZnSe и алмаза совпадают.

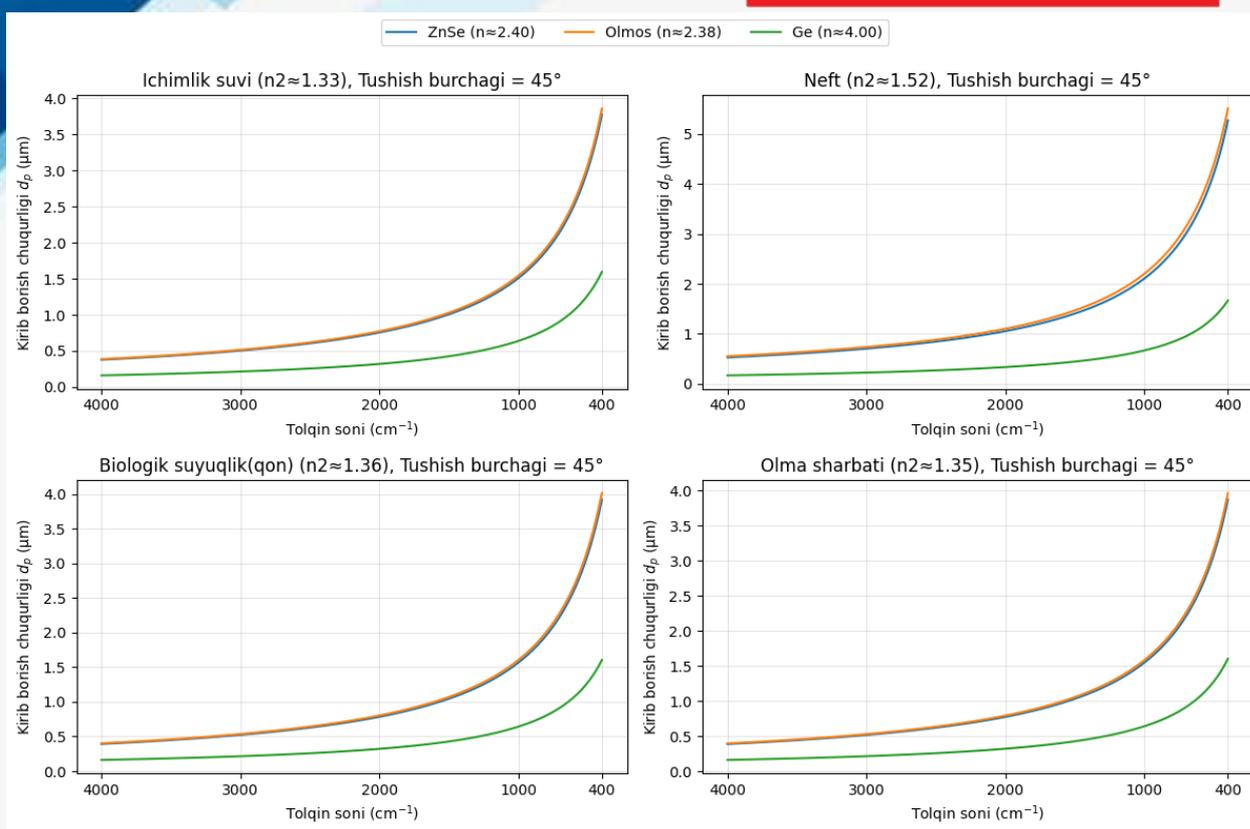


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения от волнового числа для различных образцов жидкостей

Результаты показали, что для комплексных и широкомасштабных анализов наиболее оптимальным выбором является алмазная призма, обладающая высокой химической и механической стойкостью.

Полусферический сенсор, разработанный на основе метода НПВО, а также рассчитанные значения глубины проникновения ( $d_p$ ) и выбранные на их основе материалы призм напрямую связаны с чувствительностью и принципом работы оптоэлектронного устройства.

В конструкции оптоэлектронного прибора используется цилиндрический элемент НПВО, обеспечивающий прохождение или поглощение оптического сигнала.

На основе применения метода НПВО предложено устройство для мониторинга жидкой среды [5].

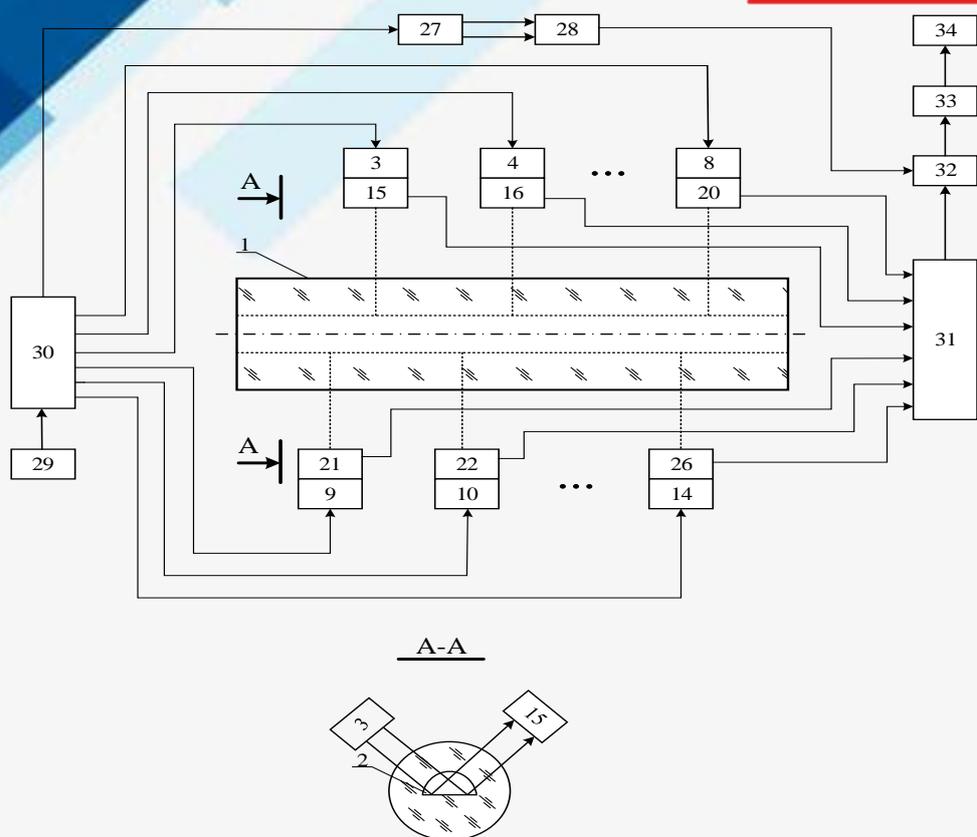


Рис. 3. Блок-схема оптоэлектронного устройства для мониторинга жидкой среды

Устройство, предназначенное для мониторинга жидкой среды, состоит из следующих основных компонентов: полого цилиндра (1) с призмой (2) в центральной части, управляющего генератора (источник импульсного питания) (29), триггера с вычислительным входом (30), светоизлучающих диодов (3–14) и компенсационного светодиода (27), измерительных фотодетекторов (15–26) и компенсационного фотодетектора (28), сумматора сигналов (31), блока фотоэлектрической обработки сигналов (32), модуля машинного обучения (33) и регистратора или компьютера (34).

Принцип работы устройства следующий: при включении управляющего генератора (29) формируются прямоугольные импульсы с частотой 8...10 кГц. Эти импульсы подаются на триггер (30) и разделяются на два потока: один направляется на измерительные светодиоды (3–14), другой — на компенсационный светодиод (27). Излучение, выходящее из измерительных диодов, направляется на измерительную поверхность элемента НПВО, в результате чего сигнал принимается фотодетекторами (15–26). Выходные сигналы фотодетекторов суммируются в сумматоре (31), формируя общий измерительный сигнал. Одновременно излучение компенсационного светодиода (27) через световод подаётся на компенсационный фотодетектор (28).



## "INNOVATIVE ACHIEVEMENTS IN SCIENCE 2025"

Сигнал, полученный от компенсационного фотодетектора (28), поступает в блок фотоэлектрической обработки (32). На этом этапе вычисляется соотношение компенсационного и измерительного сигналов, которое характеризует оптический параметр жидкой среды (оптическую плотность). Полученные электрические сигналы подаются в модуль машинного обучения (33). При подаче новых образцов результаты, полученные от различных регрессоров, объединяются, формируя окончательный прогноз.

В результате определённые физико-химические параметры сравниваются с международными стандартами, и на основе этого формируется вывод о пригодности или непригодности жидкости. Окончательные результаты представляются в визуальной форме с помощью регистратора или компьютера (34).

В рамках исследования был разработан алгоритм работы интеллектуального оптоэлектронного измерительного устройства, который сравнивает текущие значения параметров с предельными нормами и в случае отклонений определяет непригодность качества воды, а при опасных ситуациях автоматически формирует предупреждение в режиме реального времени. Данный алгоритм основан на контроле параметров DOC, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub>, которые сопоставляются с установленными предельными значениями. Если хотя бы один из параметров превышает норму, система автоматически классифицирует результат как «Непригодно» и отправляет SMS-уведомление; если все значения находятся в пределах нормативов, фиксируется результат «Пригодно».

$$M_{\text{DOC, NH}_4, \text{PO}_4, \text{SO}_4, \text{NO}_3, \text{NO}_2} =$$

$$=$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{DOC} \geq \text{DOC}_{\text{порог}} \rightarrow \text{"Непригодно", SMS – уведомлениеотправлено} \\ \text{NH}_4 \geq \text{NH}_{4\text{порог}} \rightarrow \text{"Непригодно", SMS – уведомлениеотправлено} \\ \text{PO}_4 \geq \text{PO}_{4\text{порог}} \rightarrow \text{"Непригодно", SMS – уведомлениеотправлено} \\ \text{SO}_4 \geq \text{SO}_{4\text{порог}} \rightarrow \text{"Непригодно", SMS – уведомлениеотправлено} \\ \text{NO}_3 \geq \text{NO}_{3\text{порог}} \rightarrow \text{"Непригодно", SMS – хуведомлениеотправлено} \\ \text{NO}_2 \geq \text{NO}_{2\text{порог}} \rightarrow \text{"Непригодно", SMS – уведомлениеотправлено} \\ \text{иначе } \text{DOC} < \text{DOC}_{\text{порог}}, \text{NH}_4 < \text{NH}_{4\text{порог}}, \text{PO}_4 < \text{PO}_{4\text{порог}}, \\ \text{SO}_4 < \text{SO}_{4\text{порог}}, \text{NO}_3 < \text{NO}_{3\text{порог}}, \text{NO}_2 < \text{NO}_{2\text{порог}} \rightarrow \text{"Пригодно"} \end{array} \right. \quad (1)$$

где DOC, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> - прогнозируемые в реальном времени параметры, влияющие на качество питьевой воды; DOC<sub>порог</sub>, NH<sub>4</sub><sub>порог</sub>, PO<sub>4</sub><sub>порог</sub>, SO<sub>4</sub><sub>порог</sub>, NO<sub>3</sub><sub>порог</sub>, NO<sub>2</sub><sub>порог</sub> - установленные предельные значения этих параметров.



## "INNOVATIVE ACHIEVEMENTS IN SCIENCE 2025"

Данный механизм обеспечивает оперативное и надёжное принятие решений при оценке качества воды и повышает эффективность процесса мониторинга.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлена разработка оптоэлектронного устройства на основе метода нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), рассмотрены его состав и принцип работы. Устройство обеспечивает безопасный и точный контроль в реальном времени физико-химических параметров питьевой воды, нефти, биологических жидкостей и соков. В ходе исследования были проанализированы призмы ZnSe, алмаза и Ge; в качестве наиболее оптимального варианта рекомендована алмазная призма благодаря своей механической и химической устойчивости. Интегрированный модуль машинного обучения продемонстрировал высокую точность в прогнозировании параметров DOC, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub>. Полученные результаты были сопоставлены с международными стандартами, что позволило устройству автоматически определять классификацию «Пригодно/Непригодно» и отправлять SMS-уведомления в опасных ситуациях. Таким образом, предложенная методология обладает научной и технологической значимостью и представляет собой практическое решение для оперативной, эффективной и надёжной оценки качества воды и других жидкостей.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

[1] Рахимов Б.Н., Кенгесбаев С.К. Оптоэлектронного автоматического колориметра для контроля физико-химических параметров нефтепродуктов. O'zbekiston Respublikasi mudofaa vazirligi axborot-kommunikatsiya texnologiyalari va aloqa harbiy instituti "Smart armiyada axborot-kommunikatsiya texnologiyalari, intellektual tizimlar va innovatsiyalarni joriy qilish istiqboli" mavzusida Respublika ilmiy-amaliy konferensiya, 2023 yil, 31 oktabr, С 51-57

[2] P. R. Griffiths and J. A. de Haseth, Fourier Transform Infrared Spectrometry, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2007.

[3] B. Stuart, Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2004.

[4] Raximov B.N., Kengesbayev S.K., Berdiyev A.A. Development of Optoelectronic Control Measurement System Based on Attenuated Total Reflectance Effect. 2024 4th INFORMATION TECHNOLOGIES, NETWORKS AND TELECOMMUNICATIONS International Scientific and Technical Symposium (ITN&T-2024) P 2640-2643

[5] Turdiyev, B., Rakhimov, N. R., Turaev, B. E., & Sultonova, U. (2020). Development of optoelectronic device for control of technological parameters of drinking water. International Scientific Journal Theoretical & Applied Science, 9(91), 2210–2214.