

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 681.2.08

doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Т. И. Мурашкина<sup>1</sup>, В. А. Бадеев<sup>2</sup>, Н. А. Хасаншина<sup>3</sup>, А. В. Бадеев<sup>4</sup>, Е. А. Дудоров<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> timurashkina@mail.ru, <sup>2</sup> vladbadeev4464@gmail.com, <sup>3</sup> nadin.gloria@mail.ru,

<sup>4</sup> badeyev@mail.ru, <sup>5</sup> evgenyudorovo@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Защита окружающей среды предполагает разработку и совершенствование теории проектирования, технологических процессов и процедур изготовления датчиков различных физических величин, среди которых значительное место занимают датчики качества жидкостных сред, в том числе волоконно-оптические датчики параметров жидкостных сред. Для экспресс-анализа состава веществ запатентованы рефрактометрический способ и волоконно-оптическое устройство для его реализации. Объектом исследования являются рефрактометрические волоконно-оптические измерительные преобразователи, основные элементы волоконно-оптических датчиков для систем охраны окружающей среды. Предметом исследования являются физико-технические и геометрические параметры рефрактометрических волоконно-оптических измерительных преобразователей (ВОРИП). Целью работы является повышение чувствительности преобразования ВОРИП волоконно-оптических датчиков качества жидкостных сред, используемых в системах защиты окружающей среды. *Материалы и методы.* Для достижения поставленной цели выполняется математическое моделирование для определения физико-технических и конструктивно-технологических параметров микро-оптической системы ВОРИП. *Результаты.* Приведены результаты моделирования оптических и геометрических параметров чувствительного элемента ВОРИП, представляющего собой прозрачную трубку малого диаметра, сопоставимого с диаметром оптического волокна, применяемого в конструкции датчика. Определены внутренний и внешний диаметры трубки, коэффициент преломления материала трубки, исходя из предполагаемого коэффициента преломления исследуемого вещества. *Выводы.* Определенные физико-технические и геометрические параметры позволяют повысить чувствительность преобразования ВОРИП. Рассчитанные параметры будут использованы при конструировании волоконно-оптических рефрактометрических датчиков систем охраны окружающей среды.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический преобразователь, рефрактометрический способ, диаметр, коэффициент преломления, цилиндрическая трубка, исследуемое вещество

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10017.

**Для цитирования:** Мурашкина Т. И., Бадеев В. А., Хасаншина Н. А., Бадеев А. В., Дудоров Е. А. Моделирование параметров волоконно-оптического рефрактометрического преобразователя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 22–31. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-3

**MODELING OF THE PARAMETERS OF A FIBER-OPTIC REFRACTOMETRIC CONVERTER****T.I. Murashkina<sup>1</sup>, V.A. Badeev<sup>2</sup>, N.A. Khasanshina<sup>3</sup>, A.V. Badeev<sup>4</sup>, E.A. Dudorov<sup>5</sup>**<sup>1,2,3,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia<sup>1</sup>timurashkina@mail.ru, <sup>2</sup>vladbadeev4464@gmail.com, <sup>3</sup>nadin.gloria@mail.ru,<sup>4</sup>badeev@mail.ru, <sup>5</sup>evgenyudorovo@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* Environmental protection involves the development and improvement of the design theory, technological processes and manufacturing procedures for sensors of various physical quantities, among which a significant place is occupied by sensors for the quality of liquid media, including fiber-optic sensors for the parameters of liquid media. For the express analysis of the composition of substances, a refractometric method and a fiber-optic device for its implementation have been patented. The object of research is refractometric fiber-optic measuring transducers, the main elements of fiber-optic sensors for environmental protection systems. The subject of the study is the physical, technical and geometric parameters of refractometric fiber-optic measuring transducers (FOMT). The aim of the work is to increase the sensitivity of the conversion of fiber-optic sensors for the quality of liquid media used in environmental protection systems. *Materials and methods.* To achieve this goal, mathematical modeling is performed to determine the physical, technical, structural and technological parameters of the micro-optical system of the FOMT. *Results.* The results of modeling the optical and geometric parameters of the sensor element FOMT, which is a transparent tube with a small diameter comparable to the diameter of the optical fiber used in the sensor design, are presented. The inner and outer diameters of the tube and the refractive index of the tube material are determined based on the assumed refractive index of the substance under study. *Conclusions.* Certain physical, technical and geometric parameters make it possible to increase the sensitivity of the FOMT transformation. The calculated parameters will be used in the design of fiber-optic refractometric sensors for environmental protection systems.

**Keywords:** fiber-optic converter, refractometric method, diameter, refractive index, cylindrical tube, test substance

**Financing:** the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-29-10017.

**For citation:** Murashkina T.I., Badeev V.A., Khasanshina N.A., Badeev A.V., Dudorov E.A. Modeling of the parameters of a fiber-optic refractometric converter. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):22–31. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-3

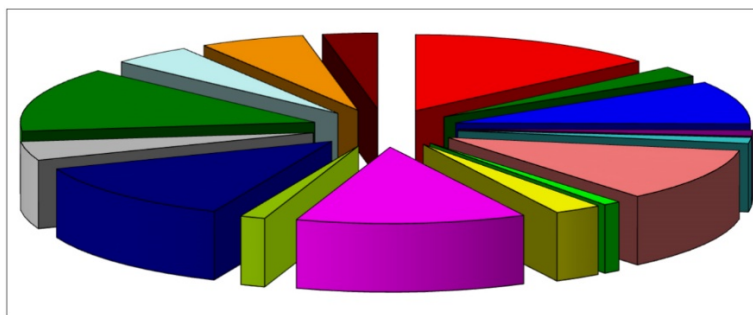
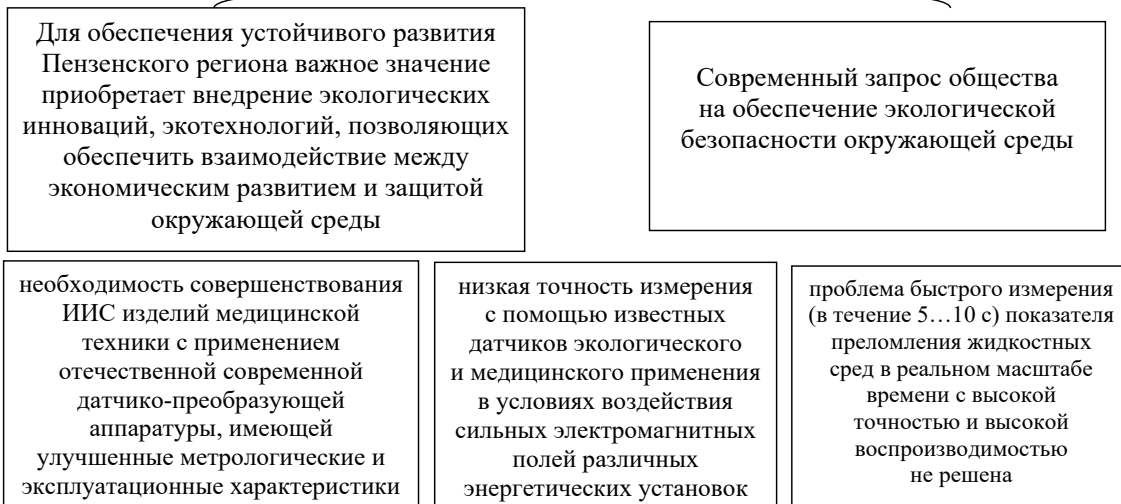
**Введение**

В соответствии с распоряжением Правительства Пензенской области от 21 февраля 2014 г. № 83-рП (с изменениями от 28 июля 2022 г.) «Об утверждении Стратегии инновационного развития Пензенской области до 2021 года и прогнозный период до 2030 года» в п.1.4 «Предназначение Пензенской области в системе инновационного развития России в реальном секторе экономики» Пензенская область претендует стать лидером на рынке разработки и производства датчиков физических величин, систем измерения, диагностики, мониторинга, контроля и управления в интересах космической, оборонной промышленности и специальных проектов. Для обеспечения устойчивого развития Пензенского региона важное значение приобретает внедрение экологических инноваций, экотехнологий, позволяющих обеспечить взаимодействие между экономическим развитием и защитой окружающей среды (там же п. 5.1.1).

Защита окружающей среды предполагает разработку и совершенствование теории проектирования, технологических процессов и процедур изготовления датчиков различных физических величин, среди которых значительное место занимают датчики качества жидкостных сред, в том числе волоконно-оптические датчики (ВОД) параметров жидкостных сред (рис. 1) [1, 2].

Основное преимущество ВОД перед электрическими обусловлено их возможным использованием в ситуациях, в которых либо электронные устройства вообще нельзя использовать, либо такое использование сопровождается значительными трудностями и расходами [3, 4]. ВОД обеспечивают чрезвычайно высокий уровень безопасности при эксплуатации в потенциально искро-, пожаро- и взрывоопасных условиях. Важнейшим достоинством ВОД является невосприимчивость их к высокочастотным и импульсным электромагнитным помехам. Внедрение ВОД существенно уменьшает массу и объем измерительных средств и кабельных сетей на инженерно-технических объектах медицинской техники и других отраслей техники [3, 4].

## Актуальность исследований



■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ 4 ■ 5 ■ 6 ■ 7 ■ 8 ■ 9 ■ 10 ■ 11 ■ 12 ■ 13 ■ 14 ■ 15 ■ 16

Рис. 1. Соотношение между параметрами, измеряемыми в системах жизнеобеспечения или экологической безопасности:

- 1 – перемещение; 2 – скорость; 3 – ускорение; 4 – деформация; 5 – координаты;  
 6 – качество жидкости (состав); 7 – освещенность; 8 – герметичность;  
 9 – давление; 10 – расход жидкости; 11 – уровень; 12 – сила; 13 – температура;  
 14 – наличие загазованности; 15 – газовый состав; 16 – напряженность магнитного поля

Важной прикладной задачей, решаемой с помощью ВОД и систем охраны окружающей среды на их основе, является оперативный контроль параметров жидких, в том числе технологических, сред в таких отраслях хозяйства, как электронная, химическая, нефтехимическая, пищевая промышленность, ядерная энергетика, биомедицинские исследования, экологический мониторинг загрязнения окружающей среды [5]. При этом только волоконно-оптические датчики могут надежно работать в особо агрессивных, взрыво- и пожароопасных средах, в условиях электромагнитных помех различных энергетических установок.

Толчком для создания нового способа измерения коэффициентов преломления жидкостей послужили проблемы в период пандемии при диагностике вирусного заболевания Covid-19, а именно большая длительность диагностики заболевания и малая воспроизводимость результатов измерений. Предложено было адаптировать предшествующие разработки научной школы «Волоконно-оптическое приборостроение» для решения данной проблемы, а именно волоконно-оптические микросенсоры микроперемещений на основе стержневых линз [6, 7]. В результате подана заявка и получен патент на изобретение 2796797 С2 [8]. В этой работе предложен рефрактометрический волоконно-оптический способ измерения показателя преломления прозрачного вещества, а также устройство для его реализации, которые могут быть использованы для получения информации о качестве вещества [9, 10].

Основным элементом предложенного устройства является ВОРИП, в состав которого входят оптические волокна, по которым свет от источника излучения подается в зону преобразования измерительной информации, а потом промодулированный в зависимости от измеряемого параметра направляется на приемник излучения [8]. Между подводящими и отводящими

оптическими волокнами расположена емкость с исследуемым веществом (рис. 2). Данная емкость представляет собой прозрачную трубку, в полости которой размещают небольшое количество исследуемого вещества. С одной стороны трубки на расстоянии  $l_1$  соосно с ней расположен излучающий торец подводящего оптического волокна (ПОВ), с другой стороны трубки на расстоянии  $l_2$  расположены приемные торцы отводящих оптических волокон (ООВ) (рис. 3).

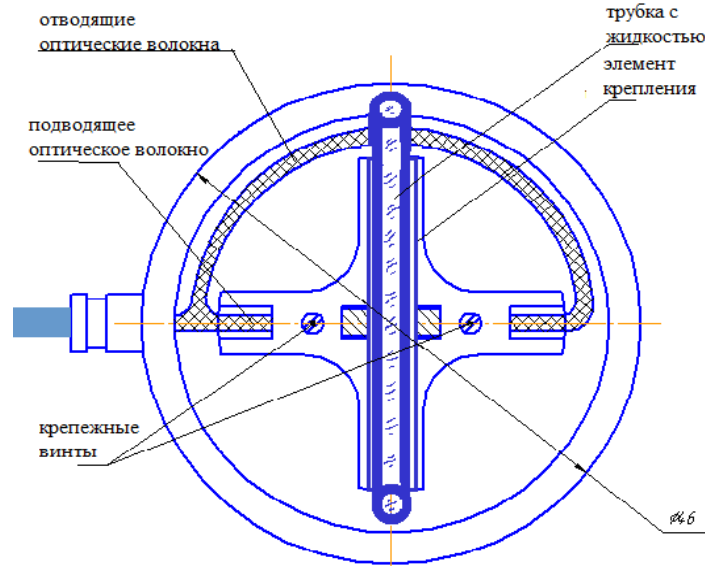


Рис. 2. Рефрактометрический волоконно-оптический датчик

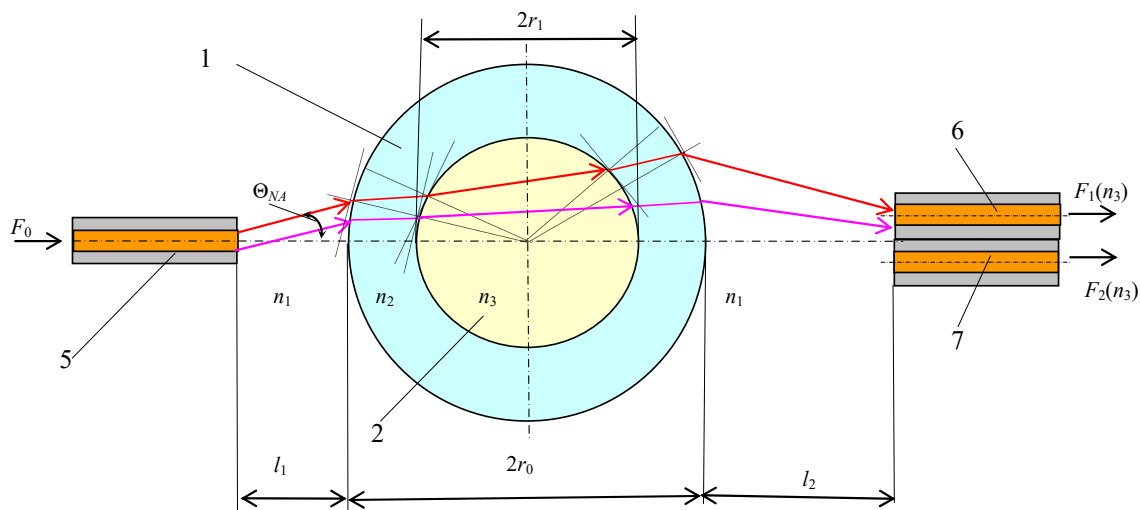


Рис. 3. Ход лучей в рефрактометрическом волоконно-оптическом преобразователе

По изменению сигналов с выхода приемников излучения определяют коэффициент преломления жидкости  $n_{ж}$  по формуле:  $n_{ж} = k_0 n_0$ , где  $k_0$  – коэффициент пропорциональности, равный отношению уровня сигнала с выхода приемника излучения при наличии в трубке калибровочной жидкости (например, дистиллированной воды) к уровню сигнала того же приемника излучения при наличии в трубке жидкости (или другого прозрачного вещества) с измеряемым коэффициентом преломления  $n_{ж}$ .

Основной задачей инженера-разработчика в этом случае является обеспечение максимального перепада сигналов ВОРИП, соответствующих ситуациям, когда в трубке находится калибровочное вещество и когда в трубке находится исследуемое вещество (например, жидкость, состав которой необходимо определить). Чем больше перепад, тем выше чувствительность преобразования ВОРИП, соответственно, можно добиться повышения точности измерения.

**Цель исследований** – повышение чувствительности преобразования ВОРИП волоконно-оптических датчиков качества жидкостных сред, используемых в системах защиты окружающей среды.

### Методы и подходы

Для достижения поставленной цели осуществляется математическое моделирование [11] для определения физико-технических и конструктивно-технологических параметров микро-оптической системы ВОРИП.

Для эффективной работы ВОРИП необходимо определить:

- оптимальные размеры трубки: внешний и внутренний диаметры;
- коэффициент преломления материала, из которого должна быть изготовлена трубка, с дальнейшим подбором материала;
- диаметр сердцевины и оболочки, апертурный угол оптического волокна;
- тип оптического волокна, определяемый материалами, из которых он изготовлен;
- расстояния между элементами ВОРИП: между излучающим торцом подводящего излучение оптического волокна и ближайшей от него точкой трубки с жидкостью и между приемным торцом отводящего излучение оптического волокна и ближайшей от него точкой трубки с жидкостью.

При проведении математического моделирования необходимо учитывать, что световой поток на излучающем торце подводящего оптического волокна распространяется в виде полого усеченного конуса, толщина стенок которого равна диаметру сердцевины оптического волокна, а преобразования оптического сигнала осуществляются в дальней зоне дифракции в зоне с равномерным распределением освещенности в поперечном сечении волоконно-оптического канала [6].

### Вывод функциональных зависимостей ВОРИП

Применение сначала прозрачного вещества (например, жидкости) с известным коэффициентом преломления  $n_0$ , помещенного в цилиндрическую трубку, а потом прозрачного вещества, коэффициент преломления  $n_ж$  которого измеряется, ведет к изменению углов преломления внутри исследуемого вещества и во внутренней и внешней поверхностях цилиндрической трубки и, соответственно, изменить углы  $\Theta_{вх1}$  и  $\Theta_{вх2}$ , под которыми световой поток поступит на приемные торцы ООВ. При изменении углов  $\Theta_{вх1}$  и  $\Theta_{вх2}$  изменяется площадь пересечения светового пятна (изображения излучающего торца) и плоскости торцов ООВ, что ведет к изменению интенсивности оптического сигнала, передаваемому по ООВ на приемники излучения [8]. Поэтому в процессе математического моделирования необходимо в первую очередь определить угол  $\Theta_{вх}$ , под которым лучи света входят в приемный торец отводящего оптического волокна.

В соответствии с графическими построениями на рис. 4 и с учетом теоремы синусов определяем

$$\alpha = \arcsin \left[ \frac{\cos \Theta_{NA} (3r_c + r_1 \operatorname{tg} \Theta_{NA})}{r_1} \right]; \quad (1)$$

$$\alpha' = \arcsin \left[ \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \right], \quad \alpha_1 = \arcsin \left[ \frac{r_1}{r_2} \sin \alpha' \right], \quad \alpha'_1 = \arcsin \left[ \frac{n_2}{n_3} \sin \alpha_1 \right]; \quad (2)$$

$$\gamma_1 = 2 \arcsin \left[ \frac{n_2}{n_3} \sin \alpha_1 \right] + \Theta_{NA} - \alpha - 2\alpha_1 + 2\alpha'_1. \quad (3)$$

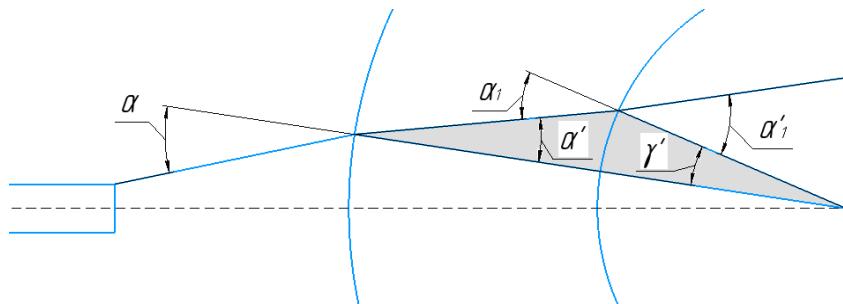


Рис. 4. Геометрические построения к выводу функциональных зависимостей преобразования оптического сигнала в ВОРИП

Согласно теореме косинусов (рис. 5):

$$x = r_1 \sqrt{2(1 - \cos \gamma_1)}, \quad \delta = 90^\circ - \frac{\gamma_1}{2}, \quad \varepsilon = 90^\circ + \frac{\gamma_1}{2}; \quad (4)$$

$$y = \sqrt{x^2 + l_2^2 - 2x l_2 \cos \varepsilon}, \quad \eta = \arcsin \left[ \frac{x}{y} \cos \left( \frac{\gamma_1}{2} \right) \right], \quad \varphi = \arcsin \left[ \frac{l_2}{y} \cos \left( \frac{\gamma_1}{2} \right) \right]; \quad (5)$$

$$\omega_3 = 180^\circ - \omega_1 - \omega_2 = 180^\circ - (180^\circ - \alpha - \varphi - \delta) - (90^\circ - \eta) = \alpha + \varphi + \delta + \eta - 90^\circ; \quad (6)$$

$$\Theta_{\text{exl}} = 90^\circ - \omega_3 = 180^\circ - \alpha - \varphi - \delta - \eta.$$

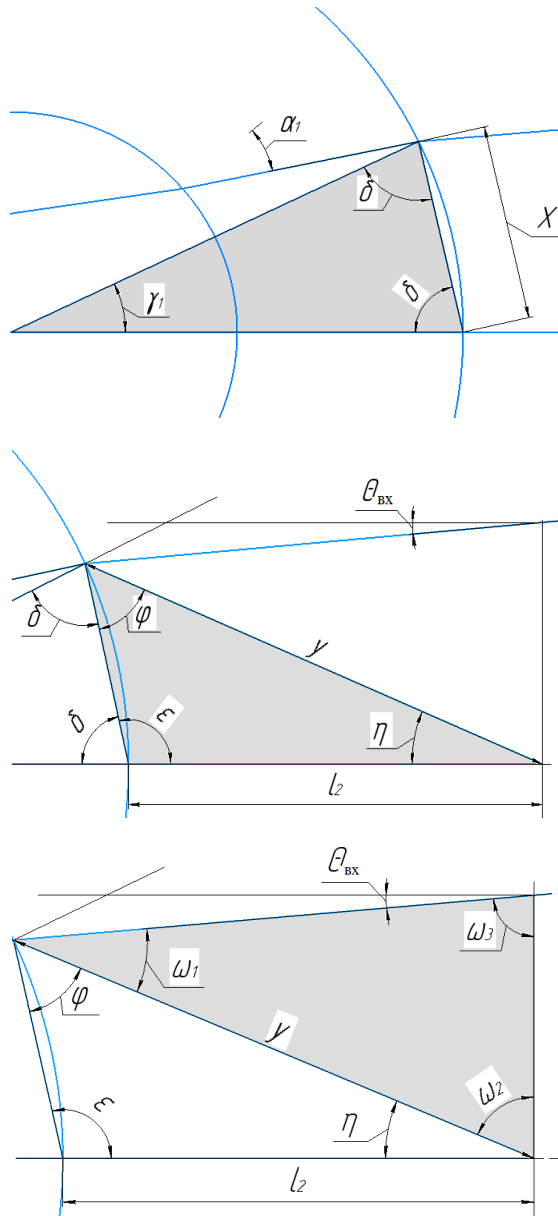


Рис. 5. Геометрические построения к определению  $\Theta_{\text{ВХ}}$

Окончательно  $\Theta_{\text{ВХ}}(n_3)$  для первого луча  $\Theta_1(n_3)$ :

$$\Theta_1(n_3) = 90^\circ - \arcsin \left[ \frac{\cos \Theta_{NA} (3r_c + r_1 \text{tg} \Theta_{NA})}{r_1} \right] - \arcsin \left[ \frac{l_2}{y} \cos \left( \frac{\gamma_1}{2} \right) \right] + \frac{\gamma_1}{2} - \arcsin \left[ \frac{x}{y} \cos \left( \frac{\gamma_1}{2} \right) \right]. \quad (7)$$

Аналогичные рассуждения и выводы осуществляются для второго луча при определении  $\Theta_2(n_3)$ .

### Результаты моделирования

На рис. 6 приведены графики зависимостей  $\Theta_{\text{вх}} = f(n_3)$  при следующих параметрах оптической системы: 1)  $\Theta_1$  (в градусах) при  $r_1 = 2$  мм,  $r_2 = 1$  мм,  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1,46$ ; 2)  $\Theta_2$  при  $r_1 = 2$  мм,  $r_2 = 1$  мм,  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1,37$ ; 3)  $\Theta_3$  при  $r_1 = 3$  мм,  $r_2 = 2$  мм,  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1,46$ ; 4)  $\Theta_4$  при  $r_1 = 3$  мм,  $r_2 = 2$  мм,  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1,37$ .

При калибровке ВОРИП можно использовать в качестве калибровочного прозрачного вещества газ, жидкость, гелеобразное вещество, твердый прозрачный материал (например, стеклянный стержень с известным коэффициентом преломления  $n_0$ , внешний диаметр которого равен внутреннему диаметру трубки).

Расстояния  $l_1$  и  $l_2$ , внешний и внутренний диаметры цилиндрической трубки  $2r_{\text{ц}}$ ,  $2r_{\text{ж}}$  выбираются из условия максимального ввода светового потока и конструктивного согласования элементов оптической системы. ПОВ располагается перед цилиндрической трубкой для равномерного освещения и увеличения освещенности торцов ООВ на расстоянии, равном или большем двух дистанций формирования  $L_{\Phi}$  [6]:

$$2L_{\Phi} = l_1 = \frac{2r_c}{\text{tg}\Theta_{NA}}. \quad (8)$$

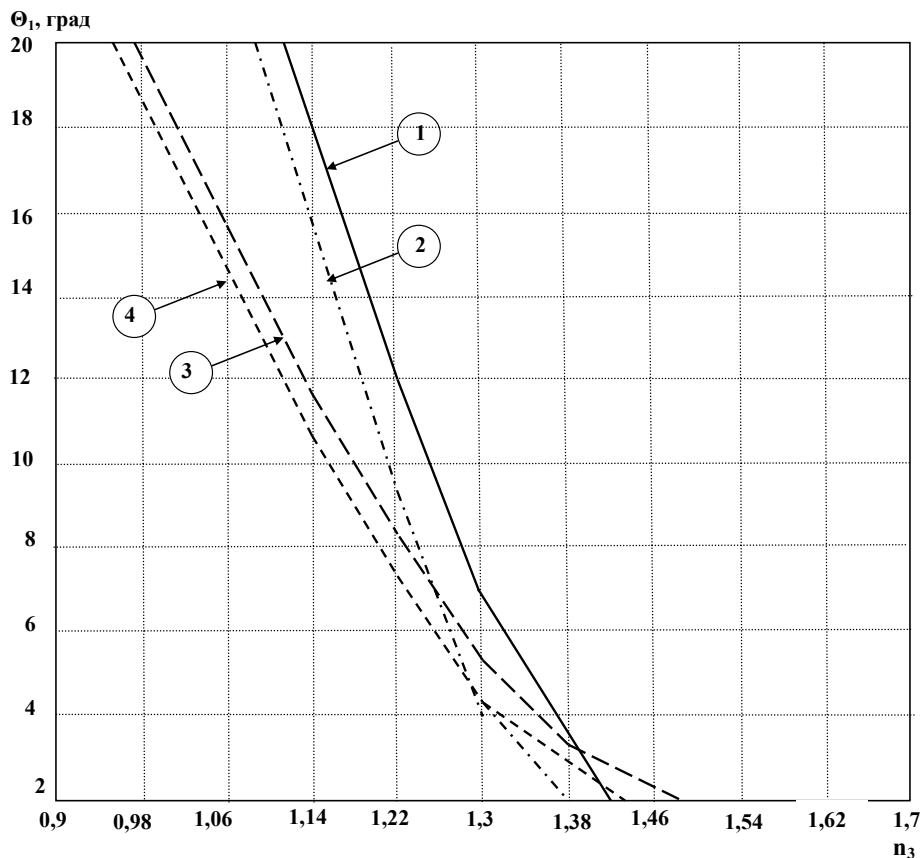


Рис. 6. Графики зависимостей входного угла от коэффициента преломления жидкости  $\Theta = f(n_3)$

Параметр  $l_2$  выбирается таким образом, чтобы при калибровке свет максимально перекрывал приемные торцы ООВ, а при измерении показателя преломления вещества — минимально.

С этой целью расстояние  $l_2$  определяется выражением

$$l_2 = \frac{\cos \Theta_{NA} (4r_c + r_{\text{ц}} \text{tg} \Theta_{NA})}{\sin \Theta_{NA}} - r_{\text{ц}}. \quad (9)$$

Например, для «кварц-кварцевых» оптических волокон с параметрами: диаметр сердцевины  $d_c = 0,2$  мм, апертурный угол  $\Theta_{NA} = 12^\circ$ , цилиндрической трубки с внешним радиусом  $r_{ц} = 2,5$  мм и внутренним радиусом  $r_{тр} = 1,5$  мм – передача максимально возможной мощности излучения в зону преобразования оптических сигналов достигается при  $0,5 \text{ мм} \leq l_1$  и  $1,5 \text{ мм} \leq l_2$ .

### Обсуждения

Для того, чтобы при переходе оптического луча из среды с более высоким коэффициентом преломления (материал трубки) в среду с меньшим коэффициентом преломления (например, исследуемая жидкость) не проявился эффект полного внутреннего отражения, необходимо, чтобы коэффициент преломления жидкости был меньше или равен показателю преломления материала цилиндрической трубки.

Для того, чтобы можно было зафиксировать минимальное изменение коэффициента преломления вещества при незначительном изменении его состава, необходимо добиться максимального перепада коэффициента преломления исследуемого вещества относительно коэффициента преломления вещества, при котором осуществлялась калибровка датчика.

Для достижения максимального перепада значений оптических сигналов между калибровочным веществом и веществом, коэффициент преломления которого измеряется, необходимо позиционировать излучающие торцы подводящего оптического волокна относительно приемных торцов отводящих оптических волокон таким образом, чтобы оптические лучи попадали в них под углами  $\Theta_{вх1}$  и  $\Theta_{вх2}$ , не превышающими апертурный угол оптического волокна  $\Theta_{NA}$ , т.е.

$$\Theta_{вх1} \leq \Theta_{NA} \text{ и } \Theta_{вх2} \leq \Theta_{NA}. \quad (10)$$

Коэффициенты преломления, соответствующие расчетным, имеют плавленные кварцевые стеклянные трубки ТКГДА, ТКГДБ, ТКГОВ, ТКГОА ТУ 5932-014-00288679-01, которые кроме того устойчивы к потемнению, термически стабильны. Так, при температуре нагрева  $1000 \pm 20$  °С и с последующим охлаждением в воде при температуре не более 25 °С плавленные кварцевые стеклянные трубки с толщиной стенки от 0,6 до 3,0 мм не трескаются, не режутся, не ломаются после 15 смен нагрева. Их диаметр лежит в пределах 5–40 мм. Их можно применять для анализа химических продуктов. Поэтому они рекомендуются для конструирования ВОРИП.

### Заключение

Научная и практическая значимость работы состоит:

- в повышении чувствительности преобразования оптических сигналов в ВОРИП на основе определения их физико-технических, оптических и математических закономерностей функционирования;
- определении параметров ВОРИП, которые будут использованы при конструировании волоконно-оптических рефрактометрических датчиков, основных элементов систем мониторинга качества жидкостных сред в системах охраны окружающей среды;
- развитию волоконно-оптических, высокорезультативных экологических технологий.

### Список литературы

1. Назарова И. Т. Волоконно-оптические системы измерения уровня искро-взрыво-пожароопасных жидкостей // Фундаментальные исследования. 2014. № 51. URL: <http://www.science-education.ru/117-13472>
2. Зыков В. Н. Метрологические основы систем экологических измерений // Вестник РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2009. № 1. С. 60–68.
3. Гармаш В. Г., Егоров Ф. А., Коломиец Л. Н. [и др.]. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических информационно-измерительных систем в современном приборостроении // ФОТОН-ЭКСПРЕСС-НАУКА, 2005. № 6. С. 128–140
4. Волкова Г. В. Световодный рефрактометрический датчик контроля химического состава жидких сред : дис. ... канд. техн. наук. 05.11.13. М., 2004. 145 с. РГБ ОД, 61:05-5/817.
5. Апкин Р. Н., Минакова Е. А. Экологический мониторинг : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Казань : Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. 127 с.
6. Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А. Волоконно-оптические приборы и системы : научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета. СПб. : Политехника, 2018. Ч. I. 187 с.



7. Зуев В. Д., Кривулин Н. П., Волков В. С. Моделирование распределения интенсивности светового потока в пространстве волоконно-оптического преобразователя перемещений с управляющим элементом в виде сферической линзы // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. 1. С. 320–322.
8. Патент РФ 2796797 С2. Волоконно-оптический способ определения коэффициента преломления прозрачного вещества и реализующий его ВОРИП / Бадеева Е. А., Бадеев В. А., Мурашкина Т. И., Серебряков Д. И., Хасаншина Н. А., Васильев Ю. А., Кукушкин А. Н. № 2021130405 ; заявл. 18.10.2021 ; опубл. 29.05.2023, Бюл. № 16.
9. Бадеев В. А., Шачнева Л. А., Шапетько Е. А., Мурашкина Т. И. Применение волоконно-оптических микросенсоров при мониторинге состояния водной среды // Материалы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Шлядинские чтения-2022) : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд.-во ПГУ, 2022. С. 106–108.
10. Бадеев В. А., Мурашкина Т. И., Шачнева Е. А. Волоконно-оптический рефрактометрический способ мониторинга жидкостных сред // Оптические методы исследования потоков : труды XVII Междунар. науч.-техн. конф. (26–30 июня 2023). М. : Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023. С. 184–190.
11. Вавилин В. А. Математическое моделирование – метод исследования при решении задач регионального гидробиологического мониторинга // Мониторинг состояния окружающей среды. Л. : Гидрометеиздат, 1977. С. 131–139.

### References

1. Nazarova I.T. Fiber-optic systems for measuring the level of spark-explosive-flammable liquids. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2014;(51). (In Russ.). Available at: <http://www.science-education.ru/117-13472>
2. Zykov V.N. Metrological foundations of environmental measurement systems. *Vestnik RUDN. Ser.: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Bulletin of the RUDN. Ser.: Ecology and life safety*. 2009;(1):60–68. (In Russ.)
3. Garmash V.G., Egorov F.A., Kolomiets L.N. et al. Possibilities, tasks and prospects of fiber-optic information and measuring systems in modern instrumentation. *FOTON-EKSPRESS-NAUKA*. 2005;(6):128–140. (In Russ.)
4. Volkova G.V. *Light-guide refractometric sensor for monitoring the chemical composition of liquid media*. PhD dissertation: 05.11.13. Moscow, 2004:145. RGB OD, 61:05-5/817. (In Russ.)
5. Apkin R.N., Minakova E.A. *Ekologicheskij monitoring: ucheb. posobie. 2-e izd., ispr. i dop. = Environmental monitoring : a textbook. 2nd ed., rev. and exp.* Kazan: Kazan. gos. energ. un-t, 2015:127. (In Russ.)
6. Murashkina T.I., Badeeva E.A. *Volokonno-opticheskie pribory i sistemy: nauchnye razrabotki NTTs «Nanotehnologii volokonno-opticheskikh sistem» Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Fiber-optic devices and systems : scientific developments of the Scientific Research Center "Nanotechnology of fiber-optic systems" of Penza State University*. Sait Petersburg: Politekhnik, 2018;I:187. (In Russ.)
7. Zuev V.D., Krivulin N.P., Volkov V.S. Modeling of the intensity distribution of the luminous flux in the space of a fiber-optic displacement transducer with a control element in the form of a spherical lens. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;1:320–322. (In Russ.)
8. Patent Russian Federation 2796797 C2. *Volokonno-opticheskiy sposob opredeleniya koeffitsienta prelomleniya prozrachnogo veshchestva i realizuyushchiy ego VORIP = Fiber-optic method for determining the refractive index of a transparent substance and its VORIP*. Badeeva E.A., Badeev V.A., Murashkina T.I., Serebryakov D.I., Khasanshina N.A., Vasil'ev Yu.A., Kukushkin A.N. № 2021130405; appl. 18.10.2021; publ. 29.05.2023, Bull. № 16. (In Russ.)
9. Badeev V.A., Shachneva L.A., Shapet'ko E.A., Murashkina T.I. The use of fiber-optic microsensors in monitoring the state of the aquatic environment. *Materialy, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii (Shlyandinskie chteniya-2022): materialy XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Materials, means and technologies for obtaining and processing measuring information (Shlyandinsky readings-2022) : materials of the XIV International scientific and technical conf.* Penza: Izd.-vo PGU, 2022:106–108. (In Russ.)
10. Badeev V.A., Murashkina T.I., Shachneva E.A. Fiber-optic refractometric method for monitoring liquid media. *Opticheskie metody issledovaniya potokov: trudy XVII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (26–30 iyunya 2023) = Optical methods of flow research : proceedings of the XVII International Scientific and Technical conf. (June 26–30, 2023)*. Moscow: Nauchno-tekhnologicheskij tsentr unikal'nogo priborostroeniya RAN, 2023:184–190. (In Russ.)
11. Vavilin V.A. Mathematical modeling – a research method for solving problems of regional hydrobiological monitoring. *Monitoring sostoyaniya okruzhayushchey sredy = Monitoring of the state of the environment*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977:131–139. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Татьяна Ивановна Мурашкина**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры приборостроения,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: timurashkina@mail.ru

**Tatyana I. Murashkina**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department  
of instrument engineering,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Владислав Александрович Бадеев**

студент,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: vladbadeev4464@gmail.com

**Vladislav A. Badeev**

Student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Надежда Александровна Хасаншина**

магистр, научный сотрудник,  
НТЦ «Нанотехнологии  
волоконно-оптических систем»,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: nadin.gloria@mail.ru

**Nadezhda A. Khasanshina**

Master degree student, researcher,  
Scientific Research Center  
"Nanotechnology of Fiber-optic systems",  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Александр Валентинович Бадеев**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
НТЦ «Нанотехнологии  
волоконно-оптических систем»,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: badeyev@mail.ru

**Aleksandr V. Badeev**

Candidate of technical sciences, senior researcher,  
Scientific Research Center  
"Nanotechnology of Fiber-optic systems",  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Евгений Андреевич Дудоров**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: evgenydudorovo@yandex.ru

**Evgeny A. Dudorov**

Postgraduate student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 20.12.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 15.01.2024**

**Принята к публикации/Accepted 12.02.2024**