



<sup>1</sup> Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

<sup>2</sup> Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ОБЗОР ФАКТОРОВ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ОПТОВОЛОКОННЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ ПРИ ГРОВОВЫХ РАЗРЯДАХ, И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ УСТАНОВОК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ОПТОВОЛОКНА

В статье дается обзор известных эффектов, оказывающих влияние на передачу информации по оптоволокну и возникающих в результате грозовых разрядов: электрооптический эффект Керра, эффект Фарадея, влияние ионизирующих излучений. Указывается на то, что имеются предварительные эмпирические данные, согласно которым магнитное поле изменяет такой параметр оптоволоконной линии, как затухание. С целью проверки указанных предварительных эмпирических данных планируются дальнейшие экспериментальные исследования предполагаемого влияния магнитного поля на затухание, для чего требуется построить лабораторную установку. Сравнению различных вариантов лабораторных установок и предварительному выбору параметра для сравнения также посвящена настоящая статья. В результате моделирования двух вариантов лабораторной установки и сравнения их по принятому параметру выбран один из двух вариантов установки.

**Ключевые слова:** моделирование, оптоволоконная линия, эффект Фарадея, эффект Керра, магнитное поле, затухание сигнала.

**Обзор состояния вопроса.** В литературе часто отмечается, что одним из преимуществ волоконно-оптических технологий является нечувствительность компонентов к электромагнитным помехам [1, с. 58; 2, с. 10]. В работе [3, с. 68] называется «заблуждением» утверждение о том, что «полностью диэлектрические оптические кабели не подвержены воздействию внешних электромагнитных полей». Следует уточнить, что указанная нечувствительность — это вопрос, с одной стороны, амплитуды влияющих величин, а с другой — специфики эксплуатируемого оборудования.

В работе [3] и других работах этого же исследователя рассматривается ряд физических эффектов, возникающих под действием грозового разряда, а также электрического поля линии электропередачи. Считают, что воздействию грозовых разрядов в особенности подвержены оптические кабели, «расположенные в горах или вблизи молниезащитных и высотных сооружений. В некоторых случаях

вблизи заряженных облаков могут оказаться и летательные аппараты. Хотя длина оптических кабелей внутри аппарата небольшая, но амплитуда воздействия вследствие близости к источнику может быть велика» [4, с. 104].

**Эффект Керра (электрооптический),** согласно работе [3, с. 69], дает поворот плоскости поляризации на угол

$$\varphi = 2\pi K E^2 L, \quad (1)$$

где  $\varphi$  — угол поворота плоскости поляризации;  $K = 0,402 \times 10^{-13}$ , м/В<sup>2</sup> — постоянная Керра;  $E$  — величина поперечного внешнего поля;  $L$  — длина пути, проходимого светом под воздействием поля.

Следует, однако, отметить, что максимально возможный угол поворота плоскости поляризации достигается тогда, когда плоскость поляризации падающего излучения расположена под углом 45 градусов к направлению внешнего электрического

Таблица 1

Число случаев превышения величины  $\varphi_0$  за грозовой сезон при  $q = 0,1$ ;  $L = 100$  км;  $N = 25$  и различных значениях удельного сопротивления земли

$\rho$ , Ом·м	$\varphi_0$ , град.					
	5	10	30	45	90	180
100	0,37	0,29	0,20	0,18	0,14	0,11
200	0,58	0,46	0,32	0,28	0,22	0,18
400	0,92	0,73	0,51	0,44	0,35	0,28
1000	1,7	1,35	0,94	0,82	0,65	0,52
2000	2,7	2,15	1,49	1,3	1,03	0,82
5000	4,97	3,96	2,74	2,4	1,9	1,51

го поля [5]. Иными словами, значение угла поворота плоскости поляризации будет меньше значения, вычисленного по формуле (1), или равно ему. Если направление поляризации совпадает с направлением внешнего электрического поля или перпендикулярно ему, тогда не происходит разложения падающей волны на два компонента (на быструю и медленную волны), и вращения вектора поляризации не происходит.

Для справки приводим данные (табл. 1), взятые из работы [3, с. 69]. Эти данные являются количественной оценкой влияния эффекта Керра, возникающего при грозových разрядах, на полностью диэлектрические оптические кабели «при различных значениях удельного сопротивления грунта  $\rho$ , плотности ударов молнии в грозовой день  $q = 0,1$  удара на кв. км, длине трассы  $L = 100$  км и числа дней с грозой  $N = 25$ » [3, с. 69].

**Эффект Фарадея** (магнитооптический) в работе [3, с. 70] описывается следующими формулами:

$$\Psi = VLB,$$

$$B = \mu\mu_0 H, \quad (2)$$

где  $\Psi$  — угол поворота плоскости поляризации;  $V$  — постоянная Верде;  $L$  — длина пути света *вдоль* (курсив наш. — **В. М., В. О.**) магнитных силовых линий;  $B$  — магнитная индукция в среде распространения;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость вещества;  $H$  — напряженность магнитного поля.

В работе [6] дается формула эффекта Фарадея для произвольного угла между направлением оптического излучения и направлением внешнего поля:

$$\varphi = V \cdot H \cdot L \cdot \cos \gamma, \quad (3)$$

где  $\varphi$  — угол поворота плоскости поляризации;  $V$  — постоянная Верде;  $H$  — напряженность магнитного поля;  $L$  — длина волоконного световода в магнитном поле;  $\gamma$  — угол между направлением магнитного поля и оптическим излучением.

**Ионизирующее излучение (гамма- или рентгеновское излучение)** тоже возникает в процессе грозового разряда [4, с. 103, 104; 7, с. 135–137].

Различают три класса макроскопических эффектов, возникающих в оптических волокнах на основе диоксида кремния под действием ионизирующего излучения [8]:

1) *радиационно-индуцированная эмиссия* (РИЭ) — соответствует излучению света внутри об-

разцов, находящихся под облучением. Известна как излучение Черенкова — Вавилова [9, с. 850–851];

2) *радиационно-индуцированное затухание* (РИЗ) — соответствует увеличению линейного затухания стекла за счет увеличения линейного поглощения из-за радиационных дефектов;

3) *уплотнение* — влечет увеличение показателя преломления.

Понятно, что радиационно-индуцированная эмиссия превращается в источник помех на том участке оптоволоконка, на котором направление фронта излучения Черенкова — Вавилова соответствует диапазону углов полного внутреннего отражения.

О локализации во времени известно следующее [8]. Во время импульса облучения конкурируют два механизма: явление сильного РИЗ и явление сильной РИЭ при том, что последняя преобладает. После окончания импульса облучения преобладает РИЗ. Коэффициент пропускания волокна частично восстанавливается во время и после облучения за счет термического отбеливания радиационных точечных дефектов при комнатной температуре. На более длительных временах после облучения вклад в РИЗ вносят только точечные дефекты, устойчивые при температуре эксперимента.

Механизм увеличения затухания. При воздействии излучения образуются дефекты кристаллической решетки, на которых появляются электроны проводимости и дырки, которые, в свою очередь, комбинируясь с вакансиями, «создают центры окраски, поглощающие свет в некоторых частях спектра, что и приводит к дополнительному затуханию» [3, с. 71]. «При облучении вещества фотонами с энергией менее 1 МэВ возникающие дефекты относительно незначительны и могут иметь тенденцию к восстановлению исходного состояния. В некоторых случаях при наличии примесей и дефектов и при относительно малых энергиях фотонов могут возникать более сложные не восстанавливающиеся повреждения структуры, которые приводят к появлению уровней в запрещенной зоне. При более высоких энергиях нарушения будут носить необратимый характер» [7, с. 137].

В самом процессе релаксации после облучения выделяют [10] два этапа: быстротечный и медленный. Быстротечный этап характеризуется значением постоянной времени порядка 1,75 мин., а на медленном этапе — порядка 6000 мин. «Но иногда процесс восстановления занимает время, длящееся годами» [11, с. 200].

Изменение показателя преломления связывают с изменением плотности материала при помощи формулы Лоренца — Лоренца, а также приводят график, показывающий изменение показателя преломления объемного образца аморфного диоксида кремния в зависимости от величины потока быстрых нейтронов [8, р. 2017]. В работе [7, с. 137] сообщается, что при «очень больших энергиях  $\gamma$ -квантов (порядка десятков и сотен МэВ)», как и в случае нейтронных потоков, возможно изменение плотности стекла.

**Новые эмпирические данные.** Выше было сказано, что одним из известных макроскопических эффектов, связанных с ионизирующим излучением, является изменение затухания. Вместе с тем имеются неподтвержденные эмпирические данные, говорящие о том, что затухание света в оптоволоконном волокне изменяется также под воздействием магнитного поля.

**Целью настоящей работы** является выбор лабораторной установки, которая будет использована для последующей проверки указанных эмпирических данных.

**Проверяемая гипотеза и варианты лабораторных установок для ее проверки.** В рамках настоящей работы выдвинута гипотеза о том, что предполагаемое изменение затухания связано с обратимыми изменениями параметров оптического волокна в присутствии магнитного поля, например, по типу магнитооптического эффекта Фарадея, описанного в работе [6]. Из формулы (3) видно, что величина эффекта зависит, в частности, от длины световода и от угла между направлением поля и направлением светового луча. Предполагаем, что указанный эффект увеличения затухания, вызванного магнитным полем, по аналогии с формулой (3) также будет зависеть и от длины световода, и от угла между направлением поля и направлением светового луча.

Суть планируемых лабораторных исследований состоит в том, чтобы поместить оптоволокно в магнитное поле и выполнить ряд оптических (в частности — рефлектометрических) измерений.

Возможны различные варианты лабораторных установок.

Одним из вариантов может быть относительно короткий прямой световод (небольшое значение  $L$ ) в магнитном поле при относительно малых углах  $\gamma$ . При этом конструктивно световод располагается по оси соленоида, и, следовательно, можно принять  $\cos \gamma = 1$ .

Другим вариантом установки является длинное оптоволокно, смотанное в бухту (относительно большое значение  $L$ ), расположенную вблизи рамки с током. На рамку намотан 1 виток. Угол  $\gamma$  будет изменяться от 0 до  $2\pi$  в различных элементах объема бухты. Таким образом, наряду с увеличением длины  $L$ , что хорошо для обнаружения эффекта, будет происходить компенсация за счет суммы положительных и отрицательных косинусов, что плохо для обнаружения эффекта.

Отметим, что второй вариант лабораторной установки, где оптоволокно намотано на катушку, рассматривается в настоящей работе не потому, что оптоволокно будет эксплуатироваться в таком виде, но для того, чтобы в лабораторных условиях было легче выявить предполагаемый эффект путем выбора установки более чувствительной к исследуемому фактору. Чувствительность лабораторной установки будем оценивать с помощью параметра  $k$ , который рассмотрим далее.

**Общая постановка задачи.** В настоящей работе сравниваются два указанных выше варианта лабораторной установки по интегральному параметру  $k$ , вычисляемому следующим образом:

$$k = \sum_{i=1}^{nel} k_i, \quad (4)$$

$$k_i = \frac{|\vec{H}_i| \cdot L_i \cdot \cos \gamma_i}{I}, \quad (5)$$

где  $k$  — интегральный параметр сравнения лабораторных установок;  $k_i$  — компонент с номером  $i$ ;  $nel$  — количество компонентов;  $\vec{H}_i$  — вектор напряженности магнитного поля, соответствующий  $i$ -му компоненту;  $L_i$  — длина оптоволокон, соответствующая  $i$ -му компоненту;  $\gamma_i$  — угол между направлением магнитного поля  $\vec{H}_i$  и направлением оптического излучения для компонента с номером

$i$ ;  $I$  — ток в проводнике, индуцирующем магнитное поле.

Поясним, чем обусловлен выбор структуры формул (4), (5). Предположим, что исследуемый эффект пропорционален величине, умноженной на постоянную Верде в формуле (3). Отсюда появился числитель в формуле (5). Ток в знаменателе формулы (5) обусловлен желанием отвязать параметр сравнения установок от тока, который может быть как постоянным, так и импульсным; чтобы при сравнении установок имели значение лишь конструктивные параметры установок:  $L_i$  и  $\cos \gamma_i$ . Кроме того, двум лабораторным установкам, рассматриваемым в настоящей работе, соответствуют два различных числа компонентов, что будет пояснено ниже.

Анализ размерностей формулы (5) показывает, что выбранный нами параметр сравнения является безразмерной величиной:

$$\begin{aligned} \dim(k_i) &= \dim\left(\frac{|\vec{H}_i| \cdot L_i \cdot \cos \gamma_i}{I}\right) = \\ &= \dim\left(\frac{|\vec{H}_i| \cdot L_i}{I}\right) = \frac{A \cdot m}{A} = 1, \end{aligned}$$

где  $A$  — ампер;  $m$  — метр.

**Модель с бухтой** включает в себя следующие геометрические объекты (рис. 1):

— прямоугольную рамку 5, имеющую четыре стороны: 1, 2, 3, 4. По ней протекает ток. Стороны 2 и 4 имеют длину  $L_1$ , а стороны 1 и 3 — длину  $L_2$ ;

— бухта 6 (диэлектрическая катушка, на которую намотано оптоволокно);

— декартова система координат 7 с координатными осями  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ . Горизонтальная ось  $X_1$  и вертикальная ось  $X_2$  находятся в плоскости чертежа, а ось  $X_3$  расположена перпендикулярно плоскости чертежа и направлена к читателю. В данной системе координат задается, в частности, расстояние между центром рамки 5 и центром бухты 6: по координатам  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  расстояние соответственно равно  $X_{1c}$ ,  $X_{2c}$  и  $X_{3c}$ ;

— в цилиндрической системе координат 8: ось высоты  $h$  совпадает с осью вращения бухты, радиус  $r$  отсчитывается от оси  $h$ , угол  $\alpha$  отсчитывается от направления, совпадающего с направлением оси  $X_3$  указанной декартовой системы координат;

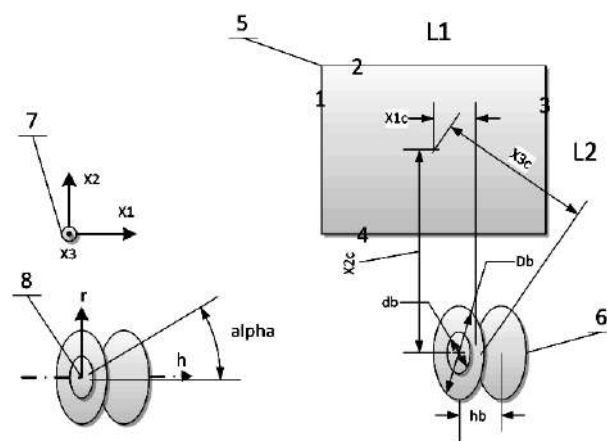


Рис. 1. Модель, описывающая геометрию и взаимное расположение рамки с током и бухты с оптическим волокном

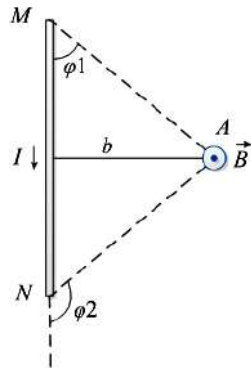


Рис. 2. К расчету магнитной индукции

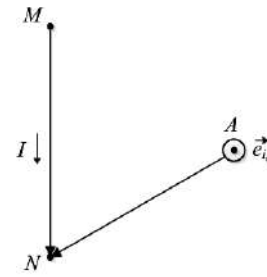


Рис. 3. К расчету орта вектора магнитной индукции: отрезок MN — одна из четырех сторон рамки с током I, точка A — центр элемента объема бухты

— величины  $Db$ ,  $db$ ,  $hb$  — соответственно: внешний диаметр, внутренний диаметр и высота бухты.

При расчетах весь объем  $V$ , занимаемый бухтой, разбивается на множество из нескольких сотен элементов  $V_i$ . Эти элементы объема  $V_i$  взаимно однозначно соответствуют компонентам  $k_i$  в формулах (4), (5). Указанное множество элементов объема образуется путем деления каждой координаты цилиндрической системы координат, в которой представлена бухта, на заданное число дискретов  $Nd$  (равных частей). При  $Nd = 7$  получаем  $73 = 343$  объемных элемента. Поскольку шаг деления по радиусу не меняется, то объемы элементов, расположенных ближе к оси бухты, будут меньше, чем объемы элементов, расположенных дальше от оси.

Принимаются следующие допущения.

1. Модуль и направление вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$  (индуцируемого рамкой с током) по всему конкретному элементу объема  $V_i$  принимаются равными расчетным значениям соответственно модуля и направления вектора  $\mathbf{B}$  в центре элемента объема.

2. Направление оптического излучения по всему  $V_i$  совпадает с направлением оси волокна в центре объема и вычисляется как касательная к окружности, касающейся центра объема  $V_i$  (в указанной цилиндрической системе координат).

3. Длина оптоволоконной  $L_i$ , помещающаяся в объем  $V_i$ , равна

$$L_i = L \cdot \frac{V_i}{V}, \quad (6)$$

где  $L$  — длина оптоволоконной в бухте.

В расчетах отталкиваемся от формулы Био-Савара, примененной к прямолинейному проводнику с током. На рис. 2 [12, с. 454] изображены:

— отрезок  $MN$  — прямолинейный проводник, по которому протекает ток  $I$ . Точки  $M$  и  $N$  — концы проводника;

—  $A$  — произвольная точка пространства, в которой рассчитывается вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$ ;

—  $b$  — расстояние от точки  $A$  до прямой, на которой отложен отрезок  $MN$ ;

—  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  — углы между прямой, на которой лежит отрезок  $MN$ , и прямыми, соединяющими концы отрезка  $MN$  с точкой  $A$ .

Магнитную индукцию рассчитывают по следующей формуле [12, с. 454]:

$$B = \mu_0 \mu H = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{b} \cdot (\cos \phi_1 - \cos \phi_2), \quad (7)$$

где  $B$  — магнитная индукция;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $H$  — напряженность магнитного поля;  $b$  — расстояние от точки  $A$ , в которой рассчитывается поле (рис. 2), до прямой, на которой расположен проводник  $NM$ ;  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  — углы, образованные радиус-векторами, проведенными в точку  $A$  из начала и конца проводника.

Полагая, что бухта — есть чистый диэлектрик (оптоволоконная, являющаяся диэлектриком, намотана на диэлектрическую катушку), получаем следующую формулу [13, с. 25]:

$$B = \mu_0 \cdot H. \quad (8)$$

Применительно к автоматизированным расчетам и с учетом (8) переписываем формулу (7) следующим образом:

$$\vec{B}_{i,j} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{b} \cdot (\cos \phi_{1,i,j} - \cos \phi_{2,i,j}) \cdot \vec{e}_{i,j}, \quad (9)$$

$$\vec{e}_{i,j} = \frac{\vec{AN} \times \vec{MN}}{|\vec{AN} \times \vec{MN}|},$$

где  $\vec{B}_{i,j}$  — вектор магнитной индукции в центре  $i$ -го элемента объема бухты, индуцируемый током через  $j$ -ю сторону рамки;  $\phi_{1,i,j}$ ,  $\phi_{2,i,j}$  — углы, под которыми видны концы  $j$ -ой стороны рамки из центра  $i$ -го элемента объема;  $\vec{e}_{i,j}$  — орт вектора  $\vec{B}_{i,j}$ ;  $A$  — точка центра элемента объема бухты (рис. 3);  $M$  — точка начала стороны рамки;  $N$  — точка конца стороны рамки.

С учетом (8) записываем сумму векторов, нужную для вычисления (5):

$$\vec{H}_i = \sum_j \frac{\vec{B}_{i,j}}{\mu_0}. \quad (10)$$

С учетом (9) и (10) переписываем формулу (5) следующим образом:

$$k_i = \left| \sum_j \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{b} \cdot (\cos \phi_{1,i,j} - \cos \phi_{2,i,j}) \cdot \vec{e}_{i,j} \right| \cdot L_i \cdot \cos \gamma. \quad (11)$$

Результаты расчета модели с бухтой. Расчет выполнен в среде Matlab. К расчету приняты следующие значения параметров модели:

— длина оптоволоконной в бухте  $L = 4456$  м;



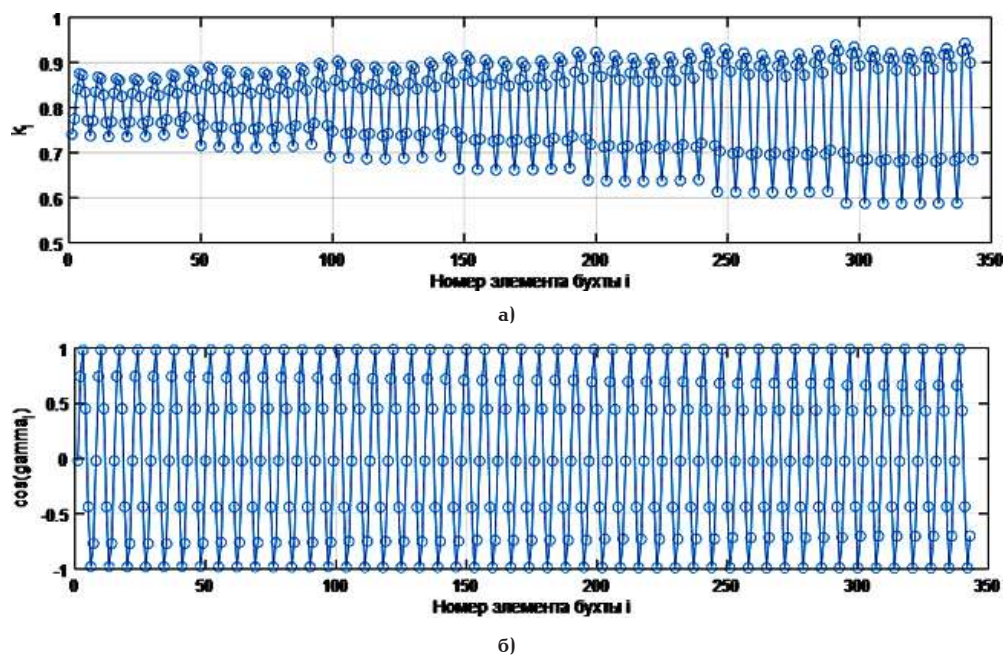


Рис. 4. Результаты расчетов по элементам объема бухты: компоненты параметра сравнения (а); косинус угла между направлением внешнего магнитного поля и направлением оптического излучения (б)

- внешний диаметр бухты  $Db = 0,35$  м;
- внутренний диаметр бухты  $db = 0,1$  м;
- высота бухты  $hb = 0,21$  м;
- количество дискретов по каждой цилиндрической координате  $Nd = 7$ ;
- расстояния между центром бухты и центром рамки с током по координатам (рис. 1):  $X1c = 0,01$  м,  $X2c = 0,02$  м,  $X3c = 0,15$  м;
- длины сторон рамки с током  $L1 = L2 = 1$  м.

На рис. 4 приведены результаты расчета по 343 элементам объема бухты. Порядковые номера элементов начинаются с внутреннего слоя (примыкающего к малому радиусу бухты) и заканчиваются внешним слоем (примыкающим к внешнему радиусу бухты). Быстрее всех в циклах расчета пробегает индекс, соответствующий углу  $\alpha$  (рис. 1), медленнее — индекс, соответствующий движению вдоль оси бухты, и медленнее всех изменяется индекс, отвечающий за радиус. Расчетные значения на графиках обозначены маркерами.

Из нижнего графика на рис. 4 видно, что косинус угла изменяется циклически от  $-1$  до  $1$ .

Предположим, что интересующий нас эффект будет компенсироваться при интегрировании эффекта по элементам, в которых поле сонаправлено с направлением излучения (вдоль оси волокна) и элементам, где поле противоположно.

Эта предполагаемая компенсация вытекает из формул (4), (5). Расчет по формулам (4), (11), (6) дает  $k = 0,2$ .

**Модель с соленоидом.** В лабораторной установке на основе соленоида прямолинейный световод располагается внутри соленоида, имеющего длину  $L_s$  (рис. 5).

В первом приближении полагаем, что во всех точках пространства внутри соленоида вектор магнитной индукции одинаков. Согласно [14, с. 268],

$$B_0 \cdot L_s = \frac{N \cdot I}{\epsilon_0 \cdot c^2}, \quad (12)$$

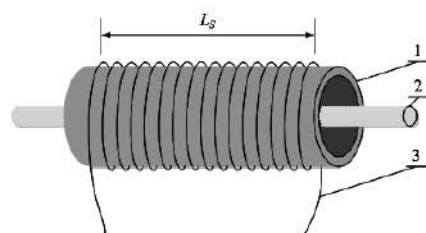


Рис. 5. Элементы лабораторной установки на основе соленоида: труба из диэлектрика (1), оптоволокно (2), электрический провод (3)

где  $B_0$  — магнитная индукция внутри соленоида;  $L_s$  — длина соленоида;  $N$  — число витков в соленоиде;  $I$  — ток соленоида;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $c$  — скорость света в вакууме.

Учтем [15, с. 19], что

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}. \quad (13)$$

Тогда из (12), (8) и (13) получаем:

$$\mu_0 \cdot H \cdot L_s = \frac{N \cdot I}{\epsilon_0 \cdot \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} = N \cdot I \cdot \mu_0, \quad (14)$$

$$H \cdot L_s = N \cdot I,$$

где  $H$  — напряженность магнитного поля внутри соленоида.

Предполагая, что исследуемый эффект в оптоволокне происходит в магнитном поле, а оно имеет существенное значение внутри соленоида, считаем, что длина оптоволокна, на которой наблюдается эффект, равна длине соленоида. То есть

$$L_s = L.$$

Кроме того, считаем, что на оси соленоида, где расположено оптоволокно,

$$\cos \gamma = 1.$$

Исходя из того, что вектор напряженности магнитного поля внутри соленоида по всей его длине в первом приближении не изменяется, а направление излучения совпадает с направлением магнитного поля также по всей длине соленоида, считаем, что в сумме (4) имеет смысл оставить только одно слагаемое  $k_1$ . То есть

$$n_{el} = 1, L_1 = L_s = L, |\vec{H}_1| = H. \quad (15)$$

С учетом (4), (5), (14), (15) получаем для соленоида:

$$k = \frac{H \cdot L \cdot \cos \gamma}{I} = \frac{H \cdot L_s \cdot 1}{I} = \frac{N \cdot I}{I} = N. \quad (16)$$

Для однослойного соленоида с шагом намотки, равным  $tmm$ , мм/виток, при длине соленоида в миллиметрах равной  $1000 \cdot L_s$ , получаем

$$N = \frac{1000 \cdot L_s}{tmm}. \quad (17)$$

**Результаты расчета модели с соленоидом.** Задавая шаг  $tmm = 2$  мм/виток и  $L_s = 3$  м, из (17) получаем  $N = 1500$ , а из (16) получаем  $k = 1500$ .

**Обсуждение.** Несмотря на сравнительно большую длину оптоволокну в бухте (почти 4,5 км), компенсация предполагаемого положительного и отрицательного эффекта в различных элементах объема бухты дает для установки с бухтой  $k = 0,2$ , что на 4 порядка меньше, чем  $k = 1500$  для установки с соленоидом трехметровой длины (внутри которого пролегает оптоволокно).

Отсюда следует ожидать, что в установке с соленоидом трехметровой длины и постоянным током в 1 А эффект будет на порядок больше, чем в установке с бухтой и импульсным током амплитудой 1 кА, проходящим через рамку.

**Закключение.** В настоящей работе дан обзор факторов, влияющих на прохождение сигнала по оптоволокну вблизи грозового разряда. Выдвинута гипотеза о влиянии магнитного поля на коэффициент затухания сигнала в оптоволокну.

Осуществлено моделирование двух типов лабораторных установок, предназначенных для изучения влияния магнитного поля на параметры оптоволокну. Также в работе предложен параметр для численного сравнения эффективности (или чувствительности) рассмотренных лабораторных установок.

Результаты расчетов значений предложенного параметра для обеих установок показали, что лабораторная установка с соленоидом, имеющим 1500 витков, длину 3 м и ток 1 А, предположительно даст больший исследуемый эффект, чем установка, включающая, во-первых, квадратную рамку с длиной стороны 1 м и импульсным током 1 кА, и, во-вторых, бухту с оптоволокну длиной 4456 м. Поэтому принято решение для дальнейших лабораторных исследований предполагаемого эффекта выбрать установку в виде прямолинейного соленоида, содержащего около 1500 витков электрического провода; внутри соленоида должен будет проходить коммутационный оптоволоконный шнур.

1. Halski D. FLASH fly-by-light flight control demonstration results overview // Proc. SPIE. Fly-by-Light III, 1996. Vol. 2840. DOI: 10.1117/12.254228.
2. Урик В. Дж. (мл.), МакКинни Дж. Дж., Вильямс К. Дж. Основы микроволновой фотоники. Москва: Техносфера, 2016. 376 с. ISBN 978-5-94836-445-2.
3. Соколов С. А. Воздействие внешних электромагнитных полей на полностью диэлектрические оптические кабели // Первая миля. 2013. Т. 36, № 3. С. 68–72. EDN: QCSJLHJ.
4. Соколов С. А. Воздействие грозových разрядов на оптические кабели в горной местности и вблизи высотных сооружений // Первая миля. 2013. Т. 35, № 2. С. 102–108. EDN: PZMWAP.
5. Запасский В. С. Керра эффекты // Большая российская энциклопедия 2004–2017. URL: <https://old.bigenc.ru/physics/text/2061749?ysclid=1qmdshepjc526245439> (дата обращения: 27.12.2023).
6. Мильков Ю. А. Поляризационные явления в волоконных световодах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2004. 20 с.
7. Соколов С. А. Физические процессы в грозовом облаке и их воздействие на оптические линии // T-COMM: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7, № 8. С. 135–137. EDN: RMMYUJ.
8. Girard S., Kuhnhen J., Gusarov A. [et al.]. Radiation Effects on Silica-Based Optical Fibers: Recent Advances and Future Challenges // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013. Vol. 60, no. 3. P. 2015–2036. DOI: 10.1109/TNS.2012.2235464.
9. Франк И. М. Черенкова–Вавилова излучение (Черенкова–Вавилова эффект) // Физический энциклопедический словарь. Москва: Сов. энциклопедия, 1983. 928 с.
10. Иманов Р. М., Бутримов И. М., Попова А. В. Влияние внешних климатических условий на характеристики работы оптических волокон // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2021. Т. 1. С. 165–170. EDN: TSQYNI.
11. Соколов С. А. Воздействие молнии и сильных электромагнитных полей на современные оптические кабели // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: материалы междунар. науч.-техн. конф. «INTERMATIC-2016», Москва, 21–25 ноября. 2016. Т. 16, № 5. С. 199–202. EDN: YSZEVR.
12. Яворский Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. Москва: Мир и Образование, 2022. 1056 с.
13. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн. Москва: ЛИБРОКОМ, 2012. 544 с. ISBN 978-5-9710-4654-7.
14. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. В 9 т. Т. 5. Электричество и магнетизм. Москва: Мир, 1977. 300 с.
15. Яриш А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. Москва: Мир, 1987. 616 с.

**МИТРОХИН Валерий Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск; профессор кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагно-

стики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 4123-7921

AuthorID (РИНЦ): 385311

Адрес для переписки: mitrokhin@list.ru

**ОСИПОВ Вадим Евгеньевич**, аспирант, старший преподаватель кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3430-5160

ORCID: 0000-0003-1859-1374

ResearcherID: AАН-6573-2019

Адрес для переписки: osvad@list.ru

#### Для цитирования

Митрохин В. Е., Осипов В. Е. Обзор факторов, воздействующих на оптоволоконные линии связи при грозовых разрядах, и моделирование лабораторных установок, предназначенных для изучения влияния магнитного поля на параметры оптоволокон // Омский научный вестник. 2024. № 3 (191). С. 142 – 149. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-142-149.

Статья поступила в редакцию 21.02.2024 г.

© В. Е. Митрохин, В. Е. Осипов

UDC 535.92

DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-142-149

EDN: VAIMRO

**V. E. MITROKHIN<sup>1,2</sup>**

**V. E. OSIPOV<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Omsk State Transport University,  
Omsk, Russia

<sup>2</sup> Omsk State Technical University,  
Omsk, Russia

## AN OVERVIEW OF THE FACTORS AFFECTING FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES DURING LIGHTNING DISCHARGES AND MODELING OF LABORATORY INSTALLATIONS DESIGNED TO STUDY THE EFFECT OF A MAGNETIC FIELD ON FIBER PARAMETERS

The article provides an overview of the known effects that influence the transmission of information over optical fiber and that arise as a result of lightning discharges: the electro-optical Kerr effect, the Faraday effect, the influence of ionizing radiation. It is indicated that there is preliminary empirical data according to which the magnetic field changes such an optical fiber parameter as attenuation. In order to verify these preliminary empirical data, further experimental studies of the supposed influence of the magnetic field on attenuation are proposed, for which it is necessary to build a laboratory installation. This article is also devoted to a comparison of various options for laboratory installations and the preliminary selection of a parameter for comparison. As a result of modeling two options for a laboratory installation and comparing them according to the accepted parameter, one of two installation options is selected.

**Keywords:** modeling, optical fiber, Faraday effect, Kerr effect, magnetic field, signal attenuation.

#### References

1. Halski D. FLASH fly-by-light flight control demonstration results overview // Proc. SPIE. Fly-by-Light III, 1996. Vol. 2840. DOI: 10.1117/12.254228. (In Engl.).
2. Urik V. Dzh. (Jr.), MakKinni Dzh. D., Vill'yams K. Dzh. Osnovy mikrovolnovoy fotoniki [Fundamentals of microwave photonics]. Moscow, 2016. 376 p. ISBN 978-5-94836-445-2. (In Russ.).

3. Sokolov S. A. Vozdeystviye vneshnikh elektromagnitnykh poley na polnost'yu dielektricheskiye opticheskiye kabeli [External electromagnetic field effect on full-dielectric optical cables] // Pervaya milya. Last Mile. 2013. Vol. 36, no. 3. P. 68 – 72. EDN: QCJLHJ. (In Russ.).
4. Sokolov S. A. Vozdeystviye grozovykh razryadov na opticheskiye kabeli v gornoy mestnosti i vblizi vysotnykh sooruzheniy [Lightning stroke affecting optical cable in mountainous terrain and nearby high-rise structures] // Pervaya

milya. *Last Mile*. 2013. Vol. 35, no. 2. P. 102–108. EDN: PZMWAP. (In Russ.).

5. Zapasskiy V. S. Kerra efekty [Kerr effects] // *Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya 2004–2017. The Big Russian Encyclopedia 2004–2017*. URL: <https://old.bigenc.ru/physics/text/2061749?ysclid=lqmdshepjc526245439> (accessed: 27.12.2023). (In Russ.).

6. Milkov Yu. A. Polyarizatsionnyye yavleniya v volokonnykh svetovodakh [Polarization phenomena in fiber optic light guides]. Khabarovsk, 2004. 20 p. (In Russ.).

7. Sokolov S. A. Fizicheskiye protsessy v grozovom oblake i ikh vozdeystviye na opticheskiye linii [Physical processes in a thunderstorm cloud and their effect on optical lines] // *T-COMM: Telekommunikatsii i transport. T-Comm*. 2013. Vol. 7, no. 8. P. 135–137. EDN: RMMYUJ. (In Russ.).

8. Girard S., Kuhnhehn J., Gusarov A. [et al.]. Radiation Effects on Silica-Based Optical Fibers: Recent Advances and Future Challenges // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2013. Vol. 60, no. 3. P. 2015–2036. DOI: 10.1109/TNS.2012.2235464. (In Engl.).

9. Frank I. M. Cherenkova–Vavilova izlucheniye (Cherenkov–Vavilov effekt) [Cherenkov–Vavilov radiation (Cherenkov–Vavilov effect)] // *Fizicheskiy entsiklopedicheskiy slovar'. Physical Encyclopedic Dictionary*. Moscow, 1983. 928 p. (In Russ.).

10. Imanov R. M., Bugrimova I. M., Popova A. V. Vliyaniye vneshnikh klimaticheskikh usloviy na kharakteristiki raboty opticheskikh volokon [Influence of external climate conditions on optical fiber operation characteristics] // *Nauchno-tekhnicheskoye i ekonomicheskoye sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke. Scientific, Technical and Economic Cooperation of APR Countries in the XXI Century*. 2021. Vol. 1. P. 165–170. EDN: TSQYNI. (In Russ.).

11. Sokolov S. A. Vozdeystviye molnii i sil'nykh elektromagnitnykh poley na sovremennyye opticheskiye kabeli [Effects of lightning and strong electromagnetic fields on modern optical cables] // *Fundamental'nyye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya. Fundamental Problems of Radio engineering and Device Construction*. 2016. Vol. 16, no. 5. P. 199–202. EDN: YSZEVR. (In Russ.).

12. Yavorskiy B. M. Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov [Handbook of physics for engineers and university students]. Moscow, 2022. 1056 p. (In Russ.).

13. Nikolskiy V. V., Nikolskaya T. I. Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln [Electrodynamics and radio wave propagation]. Moscow, 2012. 544 p. ISBN 978-5-9710-4654-7. (In Russ.).

14. Feynman R., Leyton R., Sands M. Feynmanovskiye lektzii po fizike. V 9 t. T. 5. Elektrichestvo i magnetizm [Feynman Lectures on Physics. In 9 vols. Vol. 5. Electricity and magnetism.]. Moscow, 1977. 300 p. (In Russ.).

15. Yariv A., Yukh P. Opticheskiye volny v kristallakh [Optical waves in crystals]. Moscow, 1987. 616 p. (In Russ.).

**MITROKHIN Valeriy Evgenyevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Telecommunications, Radio Engineering Systems and Networks Department, Omsk State Transport University, Omsk; Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 4123-7921

AuthorID (SCOPUS): 385311

Correspondence address: mitrokhin@list.ru

**OSIPOV Vadim Evgenyevich**, Graduate Student, Senior Lecturer of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3430-5160

ORCID: 0000-0003-1859-1374

ResearcherID: AAH-6573-2019

Correspondence address: osvad@list.ru

#### For citations

Mitrokhin V. E., Osipov V. E. An overview of the factors affecting fiber-optic communication lines during lightning discharges and modeling of laboratory installations designed to study the effect of a magnetic field on fiber parameters // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 3 (191). P. 142–149. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-142-149.

Received February 21, 2024.

© V. E. Mitrokhin, V. E. Osipov