

Влияние глубины, температуры и давления на параметры затухания сигнала в подводном оптоволоконном кабеле

М.А. Лаврентьев, Н.С. Мальцева

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация – В статье рассматривается влияние глубины, температуры и давления на величину затухания сигнала в подводных оптоволоконных кабелях типа ТсПС2 при прокладке на сравнительно малых глубинах (10–20 м) в Каспийском море. Анализируется физическая природа основных видов потерь, включая поглощение, рассеяние Рэлея и нелинейные эффекты, а также приводятся формулы для расчета вклада гидростатического давления и температурных изменений в общее затухание. На основе полученных результатов показано, что влияние давления на таких глубинах несущественно и составляет порядка 0,0002–0,0004 дБ/км, тогда как температурные колебания могут приводить к дополнительному затуханию до 0,025 дБ/км. Итоговые значения суммарных потерь на магистрали длиной 170 км колеблются в пределах 41,68–41,72 дБ. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации подводных линий связи, обеспечивая более точный прогноз эксплуатационных характеристик и надежность передачи данных

Ключевые слова – затухание сигнала, подводный оптоволоконный кабель, гидростатическое давление, температурные колебания, коэффициент преломления, поглощение в оптоволокне, рассеяние Рэлея, нелинейные эффекты, глубина укладки, температурный коэффициент затухания.

I. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования обусловлена тем, что Каспийский регион в последние годы стал ареной активного строительства цифровой инфраструктуры. Прокладываются новые маршруты оптоволоконных линий связи (ВОЛС), обеспечивающие высокоскоростную передачу данных между странами региона, а также соединяющие Европу и Азию. Такие проекты, как межгосударственная ВОЛС между Казахстаном и Азербайджаном, протяжённостью около 370 километров, являются частью глобальной инициативы по развитию транзитных коридоров [1]. Однако специфика прибрежной зоны Каспийского моря, особенно на мелководье, требует применения инновационных инженерных решений [2].

Именно в этих условиях впервые в Каспийском регионе применяется технология прокладки самозаглубляющегося оптоволоконного кабеля. Суть технологии заключается в том, что кабель укладывается по дну моря без предварительного рыления или копки траншеи, а затем под воздействием собственного веса, подвижных осадочных пород и гидродинамических процессов постепенно погружается в грунт. Это позволяет существенно повысить надёжность и устойчивость линии, а также минимизировать эксплуатационные затраты.

Важно отметить не только технологическую новизну применения самозаглубляющегося кабеля ТсПС2, но и доказать, что параметры окружающей среды — такие как температура воды и гидростатическое давление — не оказывают существенного влияния на уровень затухания сигнала в рассматриваемых условиях. Это особенно важно, поскольку в ряде других моделей оптоволоконных кабелей, используемых на больших глубинах и в зонах с нестабильной температурной средой, данные факторы могут приводить к значительным потерям. Например, известно, что в некоторых типах кабелей с облегчённой защитой температурный коэффициент затухания может достигать 0.005 дБ/км/°С [3], что критично при температурных скачках. Поэтому актуальна задача точного расчёта и оценки, насколько влияние окружающей среды значимо для конкретного кабеля ТсПС2.

Основными параметрами, определяющими качество сигнала в подводных кабельных магистралях, являются глубина укладки, температурные градиенты и давление воды. Их влияние на характеристики оптоволокна требует детального анализа и количественной оценки.

Целью данного исследования является расчет параметров затухания сигнала в подводном оптоволоконном кабеле типа ТсПС2, укладываемом на глубинах 10–20 метров в Каспийском море, с учетом влияния температуры и давления. В рамках исследования будет проведена оценка изменений

оптических характеристик в зависимости от условий эксплуатации.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения цели необходимо решить следующие строго определённые задачи:

1. Проанализировать физическую природу основных видов оптических потерь в кабеле ТсПС-2 — поглощения, рассеяния Рэлея и нелинейных эффектов — с учётом его многослойной конструкции и условий подводной эксплуатации.
2. Рассчитать гидростатическое давление P на глубинах 10–20 м по формуле (1), и определить приращение затухания $\Delta\alpha_P$.
3. Определить температурное приращение затухания $\Delta\alpha_T$ при изменении температуры воды от 0 °С до 25 °С.
4. Суммировать базовое затухание волокна $\alpha_{\text{base}} = 0,22$ дБ/км с расчётными величинами $\Delta\alpha_P$ и $\Delta\alpha_T$, чтобы получить полное затухание на единицу длины, а затем вычислить суммарные потери на магистрали длиной 170 км.
5. Визуализировать полученные результаты:
 - построить график зависимости дополнительного затухания от глубины (10–20 м);
 - построить график зависимости дополнительного затухания от температуры (0–25 °С);
 - создать сравнительные диаграммы, показывающие вклад базовых, температурных и барических потерь.
6. Сопоставить полученные значения диапазона 41,68–41,72 дБ с требованиями к качеству передачи данных и сделать вывод о влиянии внешних факторов на эксплуатационную надёжность кабеля.

III. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОДВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Оптические волокна передают сигнал за счет полного внутреннего отражения, однако в процессе передачи происходят потери, вызванные различными физическими явлениями. Основные виды потерь включают [5]:

- Поглощение, вызванное примесями в материале стекловолокна, что приводит к преобразованию световой энергии в тепло.
- Рассеяние Рэлея, связанное с микроскопическими флуктуациями плотности оптического волокна, которое особенно выражено при коротких длинах волн.
- Нелинейные эффекты, проявляющиеся при высоких мощностях сигнала и влияющие на его качество.

Подводные кабели отличаются от наземного наличием дополнительных защитных слоев, которые должны учитывать воздействие воды, гидростатического давления и возможных механических нагрузок [4]. Эти особенности

необходимо учитывать при проектировании линий связи.

Важнейшим элементом анализа является конструкция подводного кабеля ТсПС2, так как именно его многослойная структура обеспечивает устойчивость к внешним воздействиям, минимизируя потери сигнала. Ниже представлена типовая последовательность элементов конструкции данного кабеля, начиная от центрального оптического волокна (Рис. 1):

- 1 - оптическое волокно;
- 2 - гидрофобный гель;
- 3 - стальной оптический модуль, заполненный гидрофобным гелем;
- 4 - гидрофобный гель (вокруг модуля);
- 5 - броня из стальной проволоки;
- 6 - водоблокирующая лента;
- 7 - алюмополимерная лента;
- 8 - полиэтиленовая промежуточная оболочка;
- 9 - гидрофобный гель (вторичный слой);
- 10 - броня из стальной проволоки (второй слой);
- 11 - наружная полиэтиленовая оболочка.

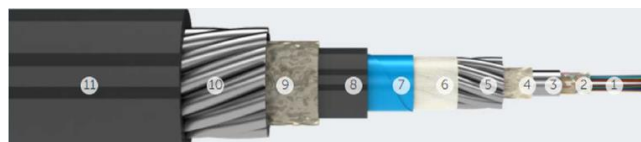


Рис. 1. Структура волоконно-оптического кабеля ТсПС2

Глубина укладки кабеля напрямую определяет уровень гидростатического давления, оказываемого на оптоволокно. Давление воды на глубине рассчитывается по формуле:

$$P = \rho gh, \quad (1)$$

где P – давление (Па); $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3$ – плотность морской воды; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; h – глубина (м).

Для глубин 10–20 м давление составляет от 0,1005 до 0,2011 МПа. Дополнительное затухание от давления определяется по формуле:

$$\Delta\alpha_P = \beta_P P, \quad (2)$$

где $\beta_P = 0,002 \text{ дБ/км/МПа}$ – коэффициент влияния давления.

Полученные значения изменения затухания составляют 0,0002–0,0004 дБ/км, что свидетельствует о его минимальном влиянии.

Температура воды оказывает влияние на коэффициент преломления оптического волокна, что сказывается на характеристиках передачи сигнала. Температурное изменение затухания рассчитывается по формуле:

$$\Delta\alpha_T = \beta_T \Delta T, \quad (3)$$

где $\beta_T = 0,001 \text{ дБ/км/}^\circ\text{С}$ – температурный коэффициент затухания, ΔT – температурное изменение среды.

При изменении температуры воды от 0 °С до 25 °С дополнительное затухание составляет 0,025 дБ/км, что значительно превышает влияние давления.

Для количественной оценки влияния внешних факторов — глубины и температуры — на затухание сигнала были рассчитаны соответствующие приращения затухания на основе приведённых выше формул (1)–(3). Чтобы визуально представить характер зависимости затухания от глубины (Рис. 2) и от температуры (Рис. 3), построены соответствующие графики. Они позволяют наглядно продемонстрировать степень влияния каждого параметра при эксплуатации кабеля ТсПС2 в прибрежной зоне Каспийского моря.

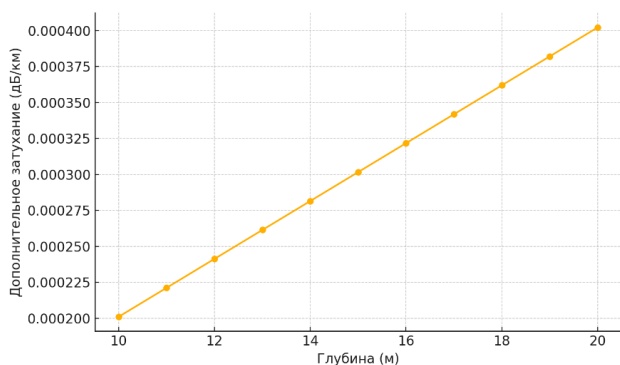


Рис. 2. График зависимости дополнительного затухания от глубины (10–20 м)

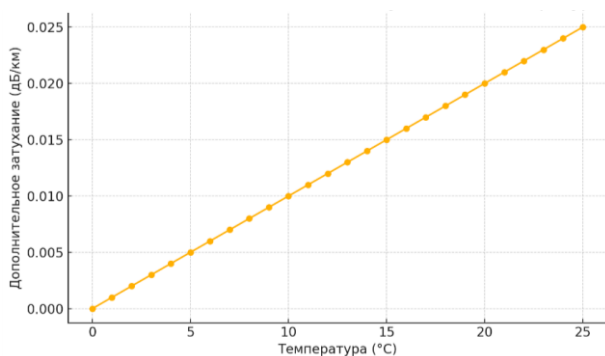


Рис. 3. График зависимости дополнительного затухания от температуры (0–25 °С)

Оптическое волокно в кабеле подвержено влиянию давления, которое может изменять его механические свойства. Под воздействием высокого давления возможны незначительные изменения плотности материала, что влияет на коэффициент преломления и характеристики передачи сигнала. Однако на малых глубинах (до 20 м) это влияние несущественно и не приводит к значимым потерям.

Общее затухание сигнала с учетом всех факторов вычисляется по формуле:

$$\alpha_{total} = \alpha_{base} + \Delta\alpha_T + \Delta\alpha_P, \quad (4)$$

Подставляя рассчитанные значения:
 $\alpha_{base} = 0,22$ дБ/км, $\Delta\alpha_T = 0,025$ дБ/км,

$$\Delta\alpha_P = 0,0002 - 0,0004 \text{ дБ/км},$$

получаем минимальное затухание (10 м глубины): 0,2452 дБ/км,

Максимальное затухание (20 м глубины): 0,2454 дБ/км.

Для 170 км линии полное затухание составит:

1) при глубине: 41,68 дБ;

2) при максимальной глубине: 41,72 дБ.

Для наглядного представления вклада различных факторов в общее затухание сигнала целесообразно использовать сводную диаграмму (Рис. 4), отражающую относительную долю каждого компонента потерь на участке длиной 170 км. Такая визуализация позволяет ясно продемонстрировать доминирующее влияние базовых оптических потерь, а также количественно оценить вклад температурных и барических изменений.

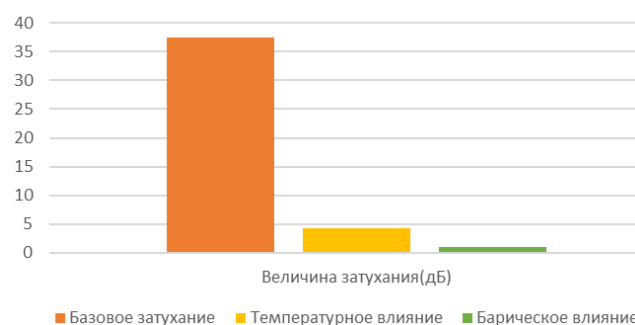


Рис. 4. Сводная диаграмма итогового затухания

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало, что основными факторами, влияющими на затухание сигнала, являются температура и глубина прокладки. Давление оказывает незначительное влияние на затухание сигнала, тогда как температурные колебания вносят больший вклад, достигая 0,025 дБ/км при изменении на 25 °С.

Общий уровень затухания на 170 км кабеля составляет от 41,68 до 41,72 дБ, что подтверждает стабильность передачи данных. Температурный фактор требует учета при проектировании линий связи, особенно в условиях сезонных колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Микилев, А., Павлычев, М. Оптические волокна класса ULL: характеристики и вопросы применения // Первая миля. — 2021. — № 8. — С. 18–25. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.lastmile.ru> (дата обращения: 10.03.2025).
- [2] Современные тенденции развития кабельного производства // КиберЛенинка. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.cyberleninka.ru> (дата обращения: 10.03.2025).
- [3] Исследование влияния конструкций и технологии изготовления на стойкость оптических кабелей к воздействию механических нагрузок : дис. ... канд. техн. наук. — 2020. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.dissercat.com> (дата обращения: 10.03.2025).

- [4] Повышение качества диагностики соединений подводных оптоволоконных кабелей // Naked Science. — 2022. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.naked-science.ru> (дата обращения: 10.03.2025).
- [5] Исхаков, Д. Р. Исследование влияния предельных характеристик современных типов оптических волокон на эксплуатационный ресурс оптических кабелей : дис. ... канд. техн. наук. — 2020. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.dissercat.com> (дата обращения: 10.03.2025).
- [3] Investigation of the influence of design and manufacturing technology on the resistance of optical cables to mechanical loads: Cand. Tech. Sci. dissertation. — 2020. — [Electronic resource]. — URL: <https://www.dissercat.com> (accessed 10.03.2025).
- [4] “Improved diagnostics of submarine optical-fiber cable joints.” Naked Science, 2022. — [Electronic resource]. — URL: <https://www.naked-science.ru> (accessed 10.03.2025).
- [5] Iskhakov D. R. Investigation of the influence of the ultimate characteristics of modern optical-fiber types on the service life of optical cables: Cand. Tech. Sci. dissertation. — 2020. — [Electronic resource]. — URL: <https://www.dissercat.com> (accessed 10.03.2025).

Информация об авторах

Лаврентьев Максим Александрович - магистрант по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Астраханского государственного технического университета, Астрахань, Россия, e-mail: lavrentev.ma@yandex.ru

Мальцева Наталия Сергеевна – к.т.н., доц., доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, Астрахань, Россия, e-mail: maltseva@mail.ru

Influence of Depth, Temperature and Pressure on Signal-Attenuation Parameters in a Submarine Optical-Fiber Cable

M.A. Lavrentev, N.S. Maltseva

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract – This article examines the influence of depth, temperature, and pressure on signal attenuation in TsPS2-type submarine optical-fiber cables laid at relatively shallow depths (10–20 m) in the Caspian Sea. The physical nature of the main loss mechanisms—absorption, Rayleigh scattering, and nonlinear effects—is analyzed, and formulae are provided for estimating the contributions of hydrostatic pressure and temperature changes to the overall attenuation. The results show that pressure at these depths is negligible, about 0,0002–0,0004 dB/km, whereas temperature fluctuations can cause additional attenuation of up to 0,025 dB/km. The total losses over a 170 km link range from 41,68 to 41,72 dB. These findings can be used in the design and operation of submarine communication lines, enabling more accurate prediction of operational characteristics and reliable data transmission.

Keywords – signal attenuation, submarine optical-fiber cable, hydrostatic pressure, temperature fluctuations, refractive index, fiber absorption, Rayleigh scattering, nonlinear effects, laying depth, temperature attenuation coefficient.

References

- [1] Mikilev A., Pavlychev M. “ULL-class optical fibers: characteristics and application issues.” Last Mile, 2021, no. 8, pp. 18–25. — [Electronic resource]. — URL: <https://www.lastmile.ru> (accessed 10.03.2025).
- [2] Current trends in cable manufacturing. — CyberLeninka. — [Electronic resource]. — URL: <https://www.cyberleninka.ru> (accessed 10.03.2025).