

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 681.7.068:620.179.17

**ПОИСК И АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ УТЕЧКАХ В ТРУБОПРОВОДАХ,
ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ С ПОМОЩЬЮ РЕФЛЕКТОМЕТРА ф-OTDR¹**

©2026 г. А. Б. Пнев*, И. А. Баранцов, К. И. Кошелев

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, корп. 1

**E-mail: pniov@bmstu.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 22.05.2026

Принята к публикации 23.07.2026

Предлагается решение проблемы обнаружения и локализации утечек в наземных трубопроводах. Утечки сопровождаются акустической эмиссией, которая может быть зарегистрирована с помощью рефлектометра ф-OTDR с распределенным акустическим датчиком. Физические характеристики генерируемых акустических волн утечки обладают рядом специфических особенностей, которые позволяют отличать их от других воздействий. Анализ и использование этих особенностей позволяют выявить признаки, необходимые для распознавания утечек. Поскольку фоновые воздействия существенно влияют на точность обнаружения, основное внимание было уделено разработке алгоритма обработки сигналов, обеспечивающего минимальную вероятность ложных срабатываний.

Ключевые слова: DAS, акустическая эмиссия, акустические волны, утечки, алгоритм обработки сигналов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Утечки в трубопроводах сопровождаются рядом физических процессов, на основе анализа которых может быть сформирован их описательный образ. Среди таких процессов наиболее значимыми являются акустическая эмиссия (АЭ) и температурные перепады, которые могут быть зарегистрированы с использованием оптоволоконных приборов с распределенным датчиком акустических (DAS) [1] и температурных (DTS) [2] воздействий.

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

На основе данных технологий было разработано множество решений, предоставляющих возможность с высокой точностью локализовать источник воздействий.

Зарегистрированные акустические воздействия с использованием DAS содержат в себе смешанную информацию, которая определяется фоновыми воздействиями и искажениями/шумами, вносимыми функциональными узлами. Для повышения отношения сигнал/шум (SNR) в работе [3] используется нормализованный дифференциальный метод. В отличие от традиционного дифференциального метода, в котором вычисляется разность между последовательными рефлектограммами, в данном методе эта разность нормируется относительно исходной рефлектограммы. В работе [4] предложены и экспериментально подтверждены концепции линеаризации и использования кодово-импульсной последовательности Голя для рефлектометра ϕ -OTDR с радиочастотным гетеродинированием. По мере увеличения пройденного расстояния происходит затухание лазерного излучения, вследствие чего формируются области с недостаточной чувствительностью системы, где регистрация акустических воздействий оказывается невозможной. Для решения данной проблемы был предложен метод [5] частотного мультиплексирования (FDM), который повышает производительность системы при меньших изменениях ее структуры. В работе [6] предложен метод коррекции искажений, возникающих вследствие ошибок развертывания фазы вблизи точек замирания, основанный на прогнозировании тренда фазового сигнала, предложена конструктивная модификация системы, предусматривающая спиральную укладку волокна на трубопроводе, позволяющая добиться большей чувствительности системы [7]. В работе [8] была разработана комплексная экспериментальная установка для измерения интенсивности акустических воздействий, генерируемых при утечках в подземных газовых трубопроводах. Похожие работы проводились также для газовых подземных труб [9] и для водоканала в городских условиях [10].

Принцип работы DTS для обнаружения утечек основан на регистрации и нахождении температурных отклонений, вызываемых охлаждением/нагревом потоком транспортируемого сырья внешней среды, включая волокно. На рефлектограмме температурный след утечки выглядит как резкий локальный всплеск. Основные разработки и исследования направлены на минимизацию влияния аппаратных составляющих на результаты измерений. Так, в работе [11] авторы регистрируют температурные изменения с использованием технологии рефлектометрии в частотной области. Методы машинного обучения также позволяют достичь прироста точности нахождения утечек [12, 13]. Также существуют решения, в которых DAS и DTS объединены в одну систему, что позволяет достигнуть высокой вероятности обнаружения [14].

Текущая работа посвящена совершенствованию системы обнаружения утечек на базе DAS для наземных трубопроводов. Утечка сопровождается акустической эмиссией с определенными характеристиками [15]. Сторонние воздействия создают помехи и искажают целевой сигнал. Поэтому обработка с выделением характерных признаков [16] является актуальной задачей. Эффективность системы обнаружения определяется уже на этапе размещения волоконного датчика. В настоящей работе кабель был закреплен снизу трубопровода, поскольку при утечке в любом месте диаметра часть сырья будет стекать вниз, задевая его. Из получаемых рефлектограмм в качестве признакового пространства используется временная спектральная плотность мощности (СПМ) с дальнейшей обработкой для выделения и отбора признаков. В ходе обработки на каждом этапе выделяется список пространственных координат-кандидатов, которые последовательно проверяются на соответствие характерным для утечки акустическим признакам.

2. МЕТОД

Для возможности выделения и отбора признаков утечек используется физическая модель процесса генерации акустических волн, которые условно можно разбить на 3 типа: колебания трения потоков (рис. 1а); колебания, возникающие при фонтанировании (рис. 1б); ударные колебания высвобождаемого сырья (рис. 1в).

Рис. 1. Типы утечек, генерирующие различные частоты колебания

Первый тип представляет собой высокочастотные колебания, обусловленные трением потока воды при ее прохождении через дефект трубы и сопровождающиеся вибрацией ее стенок (рис. 1а). Их частота обычно находится в диапазоне 300–3000 Гц. Такой сигнал сравнительно легко распознается, однако он быстро затухает, распространяется на небольшие расстояния и может маскироваться посторонними шумами. Второй тип – колебания, возникающие при фонтанировании (рис. 1б). Они формируются в результате взаимодействия вытекающих потоков утечки с внешней средой (воздухом) и характеризуются более низкими частотами, как правило, в диапазоне 10–1500 Гц. Третий тип – колебания, возникающие при ударах (рис. 1в) вследствие соударения струи или частиц среды с внешними стенками трубы либо с поверхностями вблизи места утечки. Их частотный диапазон также обычно составляет 10–1500 Гц.

Полученные данные представлены в виде пространственно-временной матрицы (ПВМ), сформированной на основе объединенных рефлектограмм в кадре 10 с. Для каждого пространственного отсчета проводится независимый временной анализ, позволяющий работать с частотно-временными характеристиками. Мощность АЭ при утечке зависит от объема выбрасываемого сырья, который может быть мал. Следовательно, алгоритм (рис. 2) должен обеспечивать высокую чувствительность обнаружения.

Рис. 2. Блок-схема разработанного алгоритма

Конструктивной особенностью измерительного узла является накладной датчик с шарнирным усилительным элементом. Такая схема крепления позволяет не врезаться в трубопровод и одновременно повысить чувствительность к малым изменениям окружающей деформации: шарнир перераспределяет перемещение стенки так, что на чувствительном участке формируется более заметное растяжение, чем при прямом приклеивании решетки к металлу. За счет этого возрастает амплитуда полезного спектрального отклика, что особенно важно при регистрации волн от малых утечек на значительном удалении от места разгерметизации [4].

В методическом отношении обработка включает четыре последовательных этапа. Сначала на двух узлах контроля регистрируются временные ряды длины волны. Затем по калиброванной зависимости спектрального сдвига от давления восстанавливаются эквивалентные динамические изменения давления. После этого в каждом канале определяется момент прихода фронта отрицательной волны, а событие принимается только при двухточечном подтверждении в допустимом временном окне. На заключительном этапе координата утечки вычисляется по разности времен прихода, а амплитуды сигналов дополнительно сопоставляются с законом затухания волны вдоль трубопровода

В кадре утечка является квазистационарным процессом, где СПМ сигнала не меняется и используется в качестве признакового пространства. Для подавления резких акустических воздействий СПМ сигнала рассчитывается по методу Уэлча, в результате мы получаем пространственно-частотное представление данных (ПЧПД) (рис. 3а):

$$S_x^{W(\omega_k)} = \frac{1}{K} \sum_{m=0}^{K-1} P_{(xm,M)(\omega_k)}, \quad (1)$$

где $S_x^{W(\omega_k)}$ — оценка спектральной плотности мощности на частоте ω_k , K — количество сегментов, $P_{(xm,M)(\omega_k)}$ — СПМ m -го сегмента.

Согласно теоретической части и проведенным на полигоне экспериментам, частотная область до 10 Гц не является информативной и далее отсекается.

В данных присутствует медленноменяющийся фон, который можно вычислить с помощью экспоненциального фильтра, применяя его вдоль кадровой оси (рис. 3б):

$$\text{fone}[i, n, m] = \alpha x[i, n, m] + (1 - \alpha) \text{fone}[i - 1, n, m], \quad (2)$$

где $x[i, n, m]$ — i -й входной кадр ПЧПД, $\text{fone}[i, n, m]$ — значение фона к i -му кадру, $\text{fone}[i - 1, n, m]$ — значение фона до i -го кадра, α — коэффициент сглаживания, $0 < \alpha < 1$, i, n, m — индексы кадровой, частотной и пространственной осей соответственно.

Значение коэффициента сглаживания выбирается достаточно малым, чтобы устранить постоянные и медленноменяющиеся фоновые воздействия, такие как погодные условия,

наличие неоднородностей в волокне, особенности локальных шумов, перемещение жидкости в трубопроводе и т. д. Вычислив фон к текущему кадру, мы выполняем поэлементное вычитание (рис. 3 в):

$$y[i, n, m] = x[i, n, m] - \text{fone}[i - 1, n, m]. \quad (3)$$

Спектр утечки, особенно для утечек с высокой интенсивностью, похож на спектр белого шума, что позволяет выделить и сократить признаковое пространство (рис. 4г), вычислив среднее вдоль частотной оси:

$$\bar{y}_n[m] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N y[m, n], \quad (4)$$

где $\bar{y}_n[m]$ – вектор средних значений, вычисленных вдоль частотной оси для каждой m -й координаты.

После выполнения основных операций выделения признаков осуществляется поэтапный отбор событий в соответствии со статистическими критериями. Среди таких критериев используется поиск пиковых значений с дальнейшим вычислением ширины и заметности (рис. 3д). Найденные пики отбираются по критериям ширины и заметности, заданным нижними и верхними пороговыми пределами, из которых формируется список массивов окрестностей по ширине. При анализе линейной системы утечка интерпретируется как кратковременное локальное возмущение; в предельном случае такое воздействие моделируется дельта-функцией, а ее образ на рефлектограмме будет повторять форму импульса. Окрестность пика хорошо описывается функцией Гаусса (рис. 3е), так как мощность акустического воздействия затухает экспоненциально по мере удаления от центра. Перед аппроксимацией функцией Гаусса над каждым массивом участка выполняется z -масштабирование:

$$y_{\text{scaled}}[m] = \frac{y_{\text{seg}}[m] - \mu}{\sigma}, \quad (5)$$

где μ – мат. ожидание $y_{\text{seg}}[m]$, σ – стандартное отклонение $y_{\text{seg}}[m]$.

Целью использования аппроксимации является расчет параметров C, M, σ с помощью метода наименьших квадратов. Из значений функции (6) вычисляется ошибка (7), являющаяся мерой расхождения результатов относительно $y_{\text{scaled}}[m]$:

$$f(C, M, \sigma) = C + e^{\frac{-(x-M)^2}{2\sigma^2}}, \quad (6)$$

$$\text{err} = \sum (y_{\text{scaled}} - f(C, M, \sigma))^2. \quad (7)$$

После выполнения аппроксимации осуществляется отбор по верхней и нижней границам параметра, соответствующего стандартному отклонению, поскольку данный параметр характеризует степень пространственной протяженности зарегистрированного воздействия.

Рис. 3. Результаты поэтапной обработки сигналов алгоритмом ...

Необходимым условием для выдачи сигнала является прохождение отбора на протяжении трех последовательных кадров в одной и той же локации с разбросом координат не более ± 1 м, где фазовый шум, создаваемый лазером, вписывается в данный интервал.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализируемые данные регистрировались с помощью рефлектометра ф-OTDR со следующими параметрами: пространственное разрешение – 10 м, частота опроса сенсора – 1000 Гц, длительность кадра – 10 с, длина датчика – 10 км. Используемый рефлектометр имеет стандартную блок-схему (рис. 4).

Рис. 4. Блок-схема используемого рефлектометра ф-OTDR

Система была развернута на полигоне, где проводились испытания для получения и анализа данных. Экспериментальная установка была выполнена в двух вариантах: для регистрации акустических сигналов утечки при небольшой длине оптической трассы (1 км) (рис. 6а), а также на протяженной трассе (11 км) (рис. 6б), имитация которой выполнялась с использованием компенсационной катушки с волокном.

Рис. 6. Схема экспериментальной установки для регистрации при ...

Пороги заметности и ширины пиков подбирались статистически на основе анализа собранных образцов. Критерием выбора пороговых значений служила вероятность прохождения сигналов не ниже 99.73%. Пороговые значения определялись в единицах стандартного отклонения аппроксимированной функции Гаусса на основе критерия идеального наблюдателя.

В результате точность обнаружения утечки составила 94.6%, вероятность ложной тревоги – 3.2%.

В работе [17] на участке газопровода протяженностью 50 км размещена система из 25 акустических датчиков, установленных с шагом около 2 км. Каждый датчик оснащен модулем частотного анализа, работающим в диапазоне 25–100 кГц, с точностью до ± 50 м. Применение алгоритмов машинного обучения, в частности CNN, позволяет достигать точности классификации до 95% при различении сигналов утечки, фоновых шума и иных акустических источников.

В работе [18] исследуется задача обнаружения утечек природного газа в подводных трубопроводах на основе распределенного волоконно-оптического акустического мониторинга в условиях сложной морской среды. Классификация состояний трубопровода выполнена с использованием нейронной сети RBF, продемонстрировавшей точность распознавания 88.15% и превосходство над моделями CNN, BP и Random Forest по устойчивости и обобщающей способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. He Z., Liu Q. J. Lightwave Technol. 2021. T. 39. № 12. C. 3671.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3059771>
2. Ukil A., Braendle H., Krippner P. IEEE Sens. J. 2011. V. 12. № 5. P. 885.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2162060>
3. Ashry I., Yuan Mao Y., Alias M.S. et al. Appl. optics. 2019. V. 58. № 18. P. 4933.
<https://doi.org/10.1364/AO.58.004933>
4. Wang Z., Zhang B., Xiong J. et al. IEEE Internet of Things J. 2018. V. 6. № 4. P. 6117.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2869474>
5. Hu Y., Meng Z., Zabihi M. et al. Electronics. 2019. V. 8. № 6. P. 617.
<https://doi.org/10.3390/electronics8060617>
6. Li C., Liu Z., Zhuang Y. et al. Opt. Lasers Eng. 2023. V. 168. P. 107678.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107678>
7. Stajanca P., Chruscicki S., Homann T. et al. Sensors. 2018. V. 18. № 9. P. 2841.
<https://doi.org/10.3390/s18092841>
8. Muggleton J.M., Hunt R., Rustighi E., Lees G., Pearce A. J. Nat. Gas Sci. Eng. 2020. V. 78. P. 103293. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103293>
9. Chen Z., Zhang C.-C., Shi B. et al. Tunn. Undergr. Space Technol. 2023. V. 141. P. 105367.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105367>
10. Gong X., Wu J., Zheng N. et al. Opt. Fiber Technol. 2025. V. 93. P. 104230.
<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2025.104230>
11. Li H.J., Zhu H.-H., Tan D., Shi B., Yin J. Tunn. Undergr. Space Technol. 2023. V. 135. P. 105065.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105065>
12. Sfar Zaoui W., Lauber T., Pohl C., et al. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. SPE, 2020. P. D031S074R004. <https://doi.org/10.2118/202905-MS>
13. Lalam N., Bhatta H.D., Bukka S. et al. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2025. V. 74. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3547114>
14. Wang F., Liu Z., Zhou X. et al. Res. Opt. 2021. V. 5. P. 100131.
<https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100131>
15. Shrivastava R. Analysis of acoustic signals for leak detection in water distribution networks: Dissertation. The University of Texas at Austin. 2023. <http://doi.org/10.26153/tsw/47554>
16. Barantsov I., Pnev A., Koshelev K. et al. Sensors. 2023. V. 23. № 14. P. 6402.
<https://doi.org/10.3390/s23146402>

17. Акустические датчики утечек: частотный анализ и современные технологии Компания Иннер Инжиниринг. <https://inner.su/articles/akusticheskie-datchiki-utechek-chastotnyy-analiz-i-sovremennye-tekhnologii-2025/> (дата обращения: 30.07.2026).
18. *Duan Y., Liang L., Tonget X. et al.* J. Phys. D Appl. Phys. 2024. V. 57. №10. P. 105102. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad1144>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Типы утечек, генерирующие различные частоты колебания трения потоков (а), колебания, возникающие при фонтанировании (б), ударные колебания высвобождаемого сырья (в)
- Рис. 2.** Блок-схема разработанного алгоритма обработки данных, зарегистрированных с помощью ф-OTDR
- Рис. 3.** Результаты поэтапной обработки ПЧПД алгоритмом (а), ПЧПД входных данных фона (б), ПЧПД спектрального вычитания между кадрами (в), вектор средних значений, вычисленных вдоль частотной оси для каждого пространственного отсчета (г), пояснение параметров пиков (д), масштабированный сегмент окрестности пика и результат аппроксимации (е)
- Рис. 4.** Блок-схема используемого рефлектометра ф-OTDR
- Рис. 5.** Схема экспериментальной установки для регистрации оптического сигнала при небольшой длине оптической трассы (а) и с использованием компенсационной катушки (б)

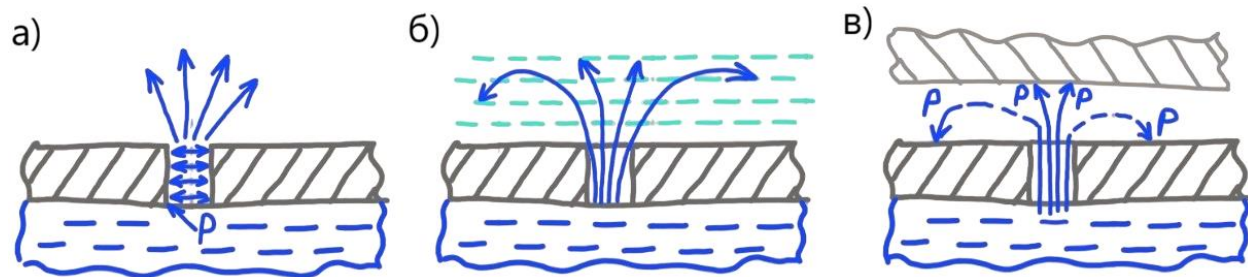


Рис. 1.

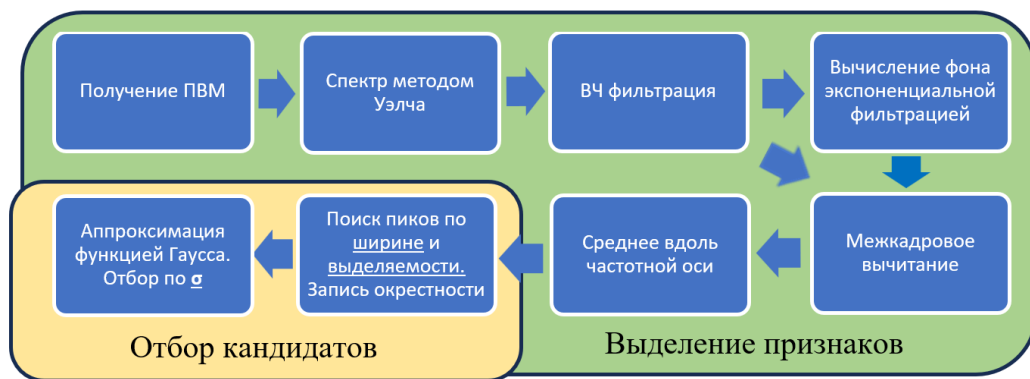


Рис. 2.

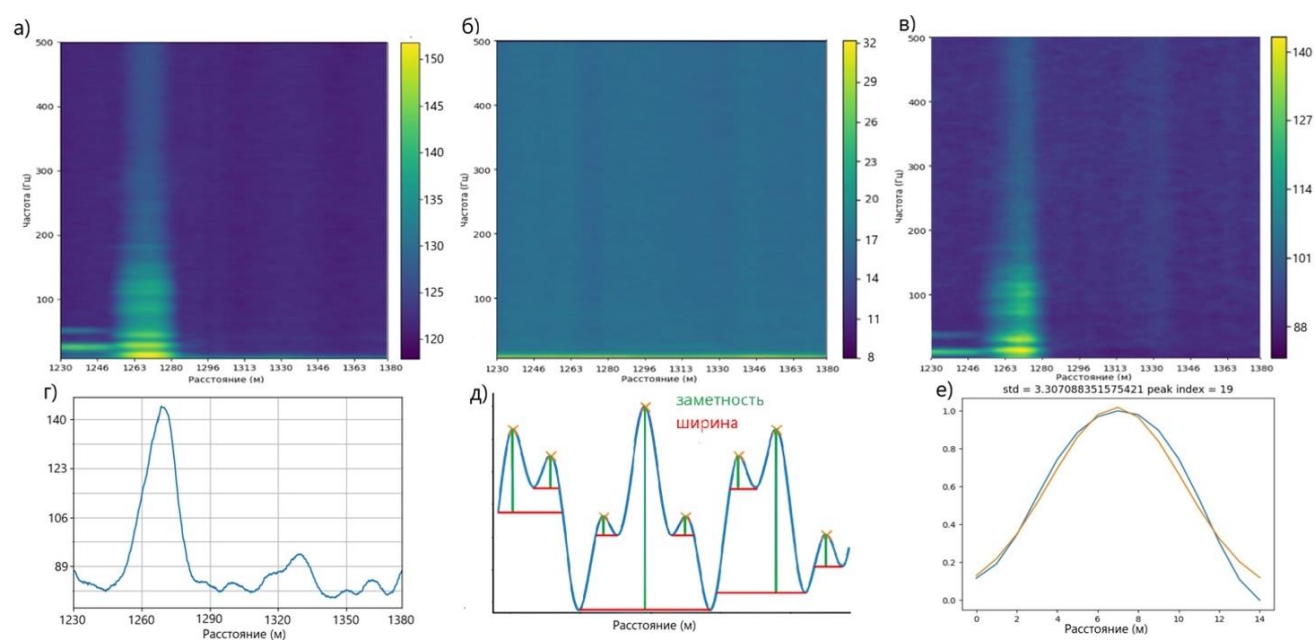


Рис. 3.

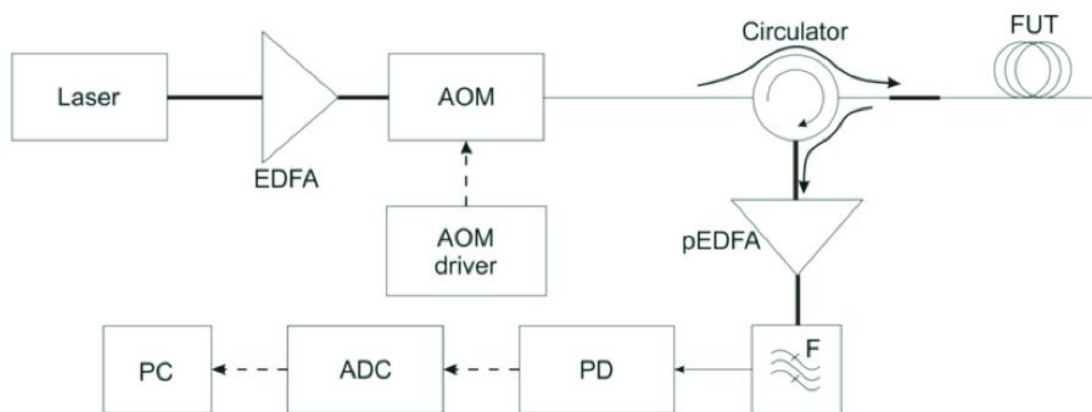


Рис. 4.

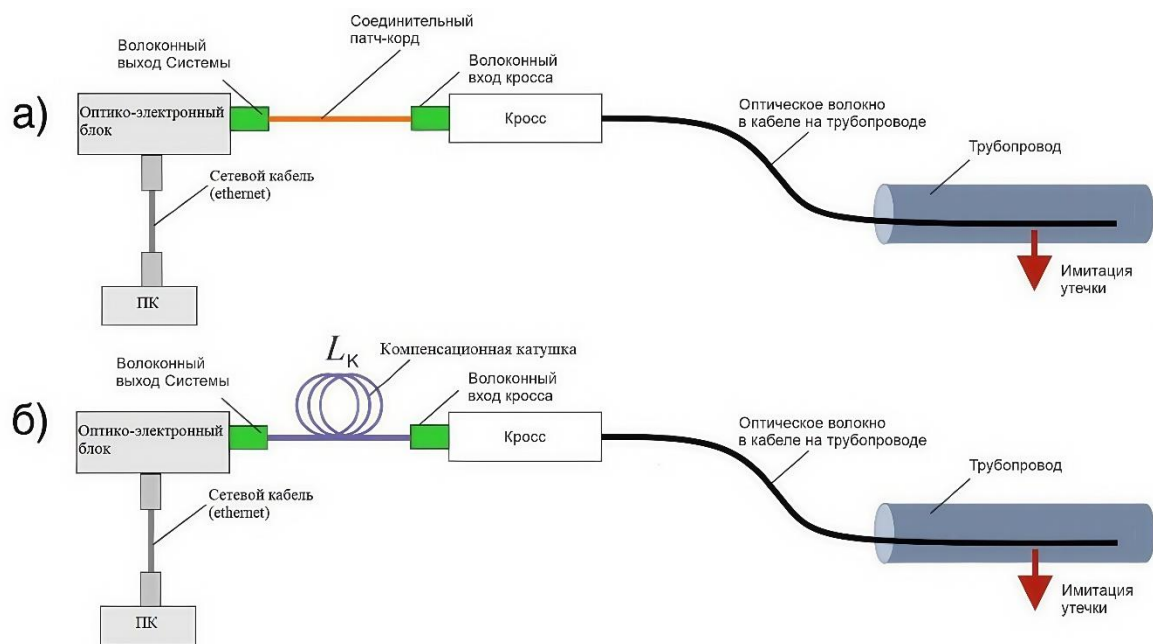


Рис. 5.