EDN: TWJBEK DOI: http://doi.org/10.65912/2782-5507.2026.23.4.001
УДК 621.372.8 *2.2.6*

ФОТОННЫЕ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

М.Ю. Федотов[1,2], М.Ф. Галиханов[3], А.Ж. Сахабутдинов[1]

[1] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10

[2] Российская инженерная академия
Российская Федерация, 125009, г. Москва, Газетный пер., 9, стр. 4

[3]Академия наук Республики Татарстан,
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Баумана, д. 20

Аннотация. Рассмотрены современные фотонные и волоконно-оптические технологии мониторинга состояния фильтрующих материалов и фильтрационных систем. Проанализированы методы оптического пропускания и фотометрии, непосредственной визуализации, оптической когерентной томографии, флуоресцентной и рамановской спектроскопии, гиперспектральной визуализации, а также волоконно-оптические датчики на основе полимерных оптических волокон, волоконных брэгговских решеток и интерферометров Фабри–Перо. Особое внимание уделено связи между физическими и химическими изменениями фильтрующего материала, формируемыми ими оптическими диагностическими признаками и инженерно-значимыми параметрами состояния фильтра, включая проницаемость, перепад давления, степень загрязнения, деформацию и остаточный ресурс. Показано, что наиболее развитая экспериментальная база сформирована для мембранных процессов, тогда как встроенный мониторинг традиционных волокнистых и нетканых фильтрующих материалов остается существенно менее разработанным. Рассмотрены возможности количественной обработки фотонных данных с использованием многомерного анализа и методов машинного обучения. Выделены основные ограничения современных подходов: недостаточная связь оптических признаков с эксплуатационными характеристиками, слабое развитие многоточечного контроля, проблемы калибровки и перекрестной чувствительности, а также ограниченная длительная валидация. Перспективным направлением определен переход к интеллектуальным фильтрующим материалам со встроенными многопараметрическими фотонными средствами мониторинга и прогнозирования технического состояния.

Ключевые слова: фильтрующие материалы, фотонный мониторинг, волоконно-оптические датчики, оптическая когерентная томография, волоконные брэгговские решетки, интерферометр Фабри–Перо, рамановская спектроскопия, флуоресцентная спектроскопия, загрязнение мембран, машинное обучение.

1. Введение и постановка задачи

Фильтрующие материалы широко применяются в системах очистки жидкостей и газов, водоподготовке, химической и нефтехимической промышленности, энергетике, транспортных системах, микроэлектронике, медицине и других областях. В процессе эксплуатации их структура и функциональные характеристики непрерывно изменяются вследствие накопления задерживаемых частиц, адсорбции органических соединений, образования поверхностного слоя осадка, биологического обрастания, кристаллизации неорганических соединений, изменения смачиваемости, а также механической и термической деформации. Совокупность этих процессов приводит к изменению пористости и проницаемости фильтрующего материала, росту его гидравлического или аэродинамического сопротивления, снижению производительности и, в предельном случае, к нарушению структурной целостности фильтрующего элемента.

В мембранных технологиях для обозначения процессов накопления на поверхности и внутри мембраны нежелательных веществ широко используется понятие «загрязнение мембраны» (*membrane fouling*). В зависимости от природы задерживаемых компонентов различают органическое, неорганическое, коллоидное и биологическое загрязнение, а также образование минеральных отложений. Для волокнистых и пористых фильтрующих материалов близкими по физическому смыслу процессами являются засорение пор, накопление загрязняющих частиц в объеме материала и формирование поверхностного слоя осадка (*cake layer*). Несмотря на различия в структуре и принципах функционирования мембранных и глубинных фильтров, общей для них является постепенная трансформация фильтрующего материала в процессе эксплуатации, поэтому оценка его текущего состояния представляет самостоятельную диагностическую задачу.

В большинстве промышленных систем состояние фильтрующего элемента оценивается косвенно — по изменению перепада давления, расхода, производительности, коэффициента задержания или других интегральных технологических параметров. Подобный подход обладает очевидными преимуществами с точки зрения простоты реализации, однако дает информацию преимущественно о последствиях изменения фильтрующего материала. Локальное образование отложений, начальные стадии биологического обрастания, изменение структуры порового пространства или неравномерная загрузка материала могут длительное время не приводить к существенному изменению интегральных параметров процесса. В результате диагностический признак формируется уже после того, как деградация фильтрующего элемента достигла заметной стадии. Эта проблема особенно подробно исследована применительно к мембранным процессам, для которых необходимость перехода от косвенного технологического контроля к непосредственному наблюдению за формированием загрязняющего слоя отмечается в ряде обзорных работ [1–3].

Одним из перспективных направлений решения данной задачи является применение фотонных методов, позволяющих получать информацию непосредственно о состоянии поверхности и внутренней структуры фильтрующего материала либо о связанных с ним физических и химических параметрах. Наиболее развитым методом такого типа в мембранных технологиях является оптическая когерентная томография (*optical coherence tomography*, OCT), обеспечивающая неразрушающую послойную визуализацию и количественную оценку структуры загрязняющего слоя в реальном времени. С ее использованием исследованы формирование биопленок, органических и неорганических отложений, рост слоя осадка, пространственная неоднородность загрязнения, процессы очистки и регенерации мембран [2]. Существенным преимуществом метода является возможность получения пространственно-разрешенной информации без отбора образца и нарушения протекания фильтрационного процесса.

Дополнительную информацию о природе накапливающихся загрязнений позволяют получать спектроскопические методы. В частности, рамановская спектроскопия (*Raman spectroscopy*) используется для регистрации и идентификации химических компонентов загрязняющего слоя непосредственно в процессе фильтрации [4]. Флуоресцентная спектроскопия с регистрацией матриц возбуждения–эмиссии (*excitation–emission matrix fluorescence spectroscopy*, EEM) позволяет выявлять накопление органических веществ на поверхности мембран и исследовать вклад различных компонентов в обратимое и необратимое загрязнение [5]. Таким образом, если методы оптической визуализации преимущественно характеризуют пространственную структуру и морфологию загрязнения, спектроскопические методы позволяют получать информацию о его химическом составе. Их совместное рассмотрение создает предпосылки для формирования многопараметрического описания состояния фильтрующего материала.

Особый интерес представляет переход от внешних фотонных диагностических систем к волоконно-оптическим средствам контроля, которые могут непосредственно инте-

грироваться в фильтрующий элемент или размещаться в непосредственной близости от контролируемого материала. Волоконно-оптические датчики характеризуются малыми поперечными размерами, возможностью дистанционного опроса, устойчивостью к электромагнитным воздействиям и возможностью мультиплексирования нескольких чувствительных элементов в одной измерительной линии. Показана, в частности, возможность использования полимерных оптических волокон (*polymer optical fibers*, POF) для непосредственного обнаружения начальной стадии биологического загрязнения в системах обратного осмоса. При этом изменение оптического сигнала регистрировалось раньше, чем формирование выраженных изменений традиционно контролируемых технологических параметров [6]. Данный результат принципиально важен, поскольку демонстрирует возможность использования самого оптического волокна как чувствительного элемента для раннего обнаружения процессов, изменяющих состояние фильтрующей системы.

Другим перспективным подходом является контроль параметров, непосредственно связанных с функциональным состоянием фильтрующего материала, с помощью волоконных брэгговских решеток (*fiber Bragg gratings*, FBG), волоконных интерферометров Фабри–Перо (*fiber Fabry–Perot interferometers*, FFPI) и других интерферометрических и спектральных волоконно-оптических преобразователей. Такие структуры позволяют измерять давление, деформацию, температуру, показатель преломления и другие физические величины, изменение которых может сопровождать накопление загрязнений, рост сопротивления фильтра, изменение его смачиваемости или нарушение механической целостности. В отличие от оптической когерентной томографии и лабораторных спектроскопических систем волоконно-оптические датчики потенциально допускают непосредственную интеграцию в конструкцию фильтрующего элемента и создание многоточечных или квазираспределенных систем мониторинга.

Вместе с тем проведенный анализ публикаций показывает, что исследования в данной области развиваются преимущественно как несколько относительно самостоятельных направлений. Наиболее значительный объем работ посвящен оптическому мониторингу загрязнения мембран, прежде всего методами оптической когерентной томографии, рамановской и флуоресцентной спектроскопии. Существенно меньше работ непосредственно связано с применением интегрированных волоконно-оптических датчиков для контроля фильтрационных процессов, а исследования, направленные на встроенный мониторинг состояния традиционных волокнистых и нетканых фильтрующих материалов, пока имеют единичный характер. При этом практически отсутствует единая методология, связывающая измеряемые фотонными средствами параметры с такими инженерно-значимыми характеристиками фильтрующего элемента, как перепад давления, проницаемость, степень загрязнения, грязеёмкость, остаточный ресурс и структурная целостность.

Целью настоящего обзора является систематизация и сравнительный анализ современных фотонных и волоконно-оптических технологий, потенциально применимых для мониторинга состояния фильтрующих материалов. Рассматриваются методы оптической визуализации и томографии, флуоресцентной и рамановской спектроскопии, а также волоконно-оптические датчики давления, деформации, температуры и показателя преломления. Основное внимание уделяется взаимосвязи между физическими и химическими изменениями фильтрующего материала, формируемыми ими оптическими диагностическими признаками и возможностью восстановления на их основе инженерно-значимых параметров состояния фильтрующего элемента. Отдельно рассматриваются возможности интеграции чувствительных оптических волокон, волоконных брэгговских решеток и интерферометрических структур непосредственно в фильтрующие материалы, а также перспективы многопараметрического анализа и интеллектуальной обработки измерительной информации. Такой подход позволяет рассматривать развитие данного направления как переход от внешней фотонной диагностики процессов фильтрации к созданию интеллектуальных фильтрующих материалов со встроенными средствами контроля состояния.

2. Методика формирования библиографической выборки

Для проведения обзора была сформирована целевая библиографическая выборка публикаций, охватывающая основные направления применения фотонных и волоконно-оптических методов для контроля состояния фильтрующих материалов и фильтрационных систем. При формировании выборки ставилась задача не только выявить работы, непосредственно посвященные оптическому мониторингу процессов загрязнения и деградации фильтрующих материалов, но и включить исследования, описывающие волоконно-оптические измерительные технологии, потенциально применимые для контроля инженерно-значимых параметров фильтрующих элементов.

Итоговая выборка включает 60 публикаций за 2011–2026 гг. Она была сформирована из двух библиографических сегментов. Первый сегмент составили 36 международных публикаций, что соответствует 60 % общего объема выборки. При первичном отборе предпочтение отдавалось работам, опубликованным в журналах, индексируемых в Scopus и относимых к первому или второму квартилям (Q1–Q2), при обязательном наличии доступного полного текста. Доступность публикации обеспечивалась либо открытой публикацией издателя — открытым доступом (Open Access, OA), либо наличием авторской или репозиторной версии полного текста. Второй сегмент включал 24 русскоязычные публикации, составляющие 40 % выборки. Для этого сегмента использовались публикации, представленные преимущественно в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) и eLIBRARY.RU, при условии доступности полного текста на сайте издателя, в открытом научном репозитории или иной легальной открытой электронной версии.

Формирование корпуса выполнялось итерационно по нескольким взаимосвязанным тематическим направлениям. Первая группа поисковых запросов была ориентирована непосредственно на оптический контроль фильтрующих материалов и процессов их загрязнения и включала сочетания понятий «фильтрующий материал», «фильтрующий элемент», «мембрана», «загрязнение», «засорение», «биологическое обрастание», «осадок» с терминами, относящимися к оптическому и фотонному мониторингу. Для англоязычных публикаций использовались соответствующие сочетания понятий *filter material*, *filter media*, *membrane*, *fouling*, *clogging*, *biofouling*, *cake layer* с терминами *optical monitoring*, *photonic monitoring*, *optical sensing* и *fiber-optic sensing*.

Вторая группа поиска была ориентирована на конкретные фотонные методы, применение которых для исследования фильтрационных процессов уже представлено в научной литературе. В нее входили оптическая когерентная томография (*optical coherence tomography*, OCT), рамановская спектроскопия (*Raman spectroscopy*), спектроскопия и визуализация флуоресценции, оптическая микроскопия, гиперспектральная визуализация, а также методы измерения оптического пропускания, отражения и поглощения. Для этих методов рассматривались прежде всего работы, в которых оптический сигнал регистрировался непосредственно в процессе фильтрации либо использовался для количественной оценки состояния фильтрующего материала, накопившегося загрязняющего слоя или эффективности очистки.

Третья группа публикаций формировалась по волоконно-оптическим измерительным технологиям. Рассматривались чувствительные элементы на основе волоконных брэгговских решеток (*fiber Bragg gratings*, FBG), волоконных интерферометров Фабри – Перо (*fiber Fabry–Perot* interferometers), полимерных оптических волокон (*polymer optical fibers*, POF), а также волоконно-оптические датчики давления, деформации, температуры и показателя преломления. В эту группу включались не только публикации, непосредственно связанные с фильтрационными процессами, но и работы, в которых измерялись физические величины, непосредственно характеризующие или потенциально характеризующие состояние фильтрующего элемента: давление и перепад давления, механическая деформация, температура, изменение оптических свойств окружающей среды и другие параметры.

Наконец, отдельную группу составили публикации, характеризующие собственно фильтрующие материалы и определяющие инженерные параметры, которые должны рассматриваться как потенциальные выходные величины фотонной диагностической системы. К таким параметрам отнесены гидравлическое и аэродинамическое сопротивление, перепад давления, проницаемость, тонкость фильтрации, грязеемкость, степень загрузки материала загрязнителем, деформация и нарушение структурной целостности фильтрующего элемента. Включение этой группы публикаций позволило связать измеряемые оптические параметры с физически и технологически значимыми характеристиками фильтра.

По степени непосредственной связи с предметом обзора публикации были разделены на три категории. К первой категории отнесены 37 работ, непосредственно посвященных оптическому или фотонному контролю фильтрующих материалов, мембран, загрязняющих слоев и связанных с ними процессов. В эту категорию включены также обзорные публикации, обобщающие результаты исследований по соответствующим фотонным методам. Вторую категорию составили 14 методически обеспечивающих работ по волоконно-оптическим чувствительным элементам и измерительным системам. Их включение обусловлено возможностью непосредственного использования рассматриваемых принципов измерения для мониторинга состояния фильтрующих материалов. Третья категория включает 9 работ, посвященных структуре, свойствам и эксплуатационным параметрам фильтрующих материалов и формирующих физико-техническую основу для определения контролируемых параметров.

При отборе публикаций исключались работы, посвященные исключительно синтезу и модификации фильтрующих материалов без исследования возможностей контроля их состояния; общие работы по волоконно-оптическим датчикам, не имеющие очевидной связи с физическими параметрами фильтрационных процессов; а также исследования, основанные только на послепроцессном анализе образцов, если соответствующий метод не использовался для проверки или калибровки средств оперативного мониторинга. Приоритет отдавался исследованиям, содержащим экспериментальные результаты, количественные зависимости и описание возможностей работы метода непосредственно в процессе фильтрации или в условиях, допускающих его последующую интеграцию в фильтрующую систему.

Тематический анализ сформированной выборки позволил выделить несколько основных технологических направлений: методы оптического пропускания, отражения и фотометрии; непосредственную оптическую визуализацию; оптическую когерентную томографию; флуоресцентные методы; рамановскую спектроскопию и поверхностно-усиленную рамановскую спектроскопию; интегрированные волоконно-оптические чувствительные элементы; а также методы обработки фотонных измерительных данных с использованием многомерного анализа и машинного обучения. Отдельно рассматривались исследования фильтрующих материалов, определяющие инженерные параметры, подлежащие восстановлению по результатам оптических измерений.

Следует отметить, что сформированная выборка представляет собой критически отобранный тематический корпус публикаций, а не результат формализованного систематического обзора с исчерпывающим учетом всех найденных библиографических записей. Такой подход обусловлен междисциплинарным характером рассматриваемой тематики: исследования, представляющие интерес для мониторинга фильтрующих материалов, распределены между областями мембранных технологий, фотоники, волоконно-оптической сенсорики, спектроскопии, материаловедения и обработки измерительных данных и используют существенно различающуюся терминологию. Поэтому основным критерием включения являлась содержательная связь публикации с задачей определения текущего состояния фильтрующего материала фотонными или волоконно-оптическими методами.

Анализ структуры полученной выборки показывает также существенную неоднородность современного состояния исследований. Наиболее представительный массив непосредственных экспериментальных работ связан с оптическим мониторингом загрязнения

мембран, прежде всего методами оптической когерентной томографии, рамановской и флуоресцентной спектроскопии. Напротив, публикации, посвященные непосредственной интеграции волоконно-оптических чувствительных элементов в традиционные волокнистые и нетканые фильтрующие материалы, представлены значительно слабее. Поэтому в настоящем обзоре наряду с непосредственно относящимися к фильтрации исследованиями рассматриваются методически обеспечивающие работы по волоконно-оптическим датчикам, позволяющие оценить перспективы перехода от внешней фотонной диагностики к встроенному мониторингу состояния фильтрующих материалов.

3. Контролируемые параметры и механизмы изменения состояния фильтрующих материалов

Состояние фильтрующего материала в процессе эксплуатации определяется совокупностью структурных, механических и физико-химических изменений, возникающих при накоплении задерживаемых компонентов и воздействии рабочей среды. Независимо от конкретного типа фильтра эти изменения в конечном итоге проявляются в изменении поровой структуры, проницаемости, гидравлического или аэродинамического сопротивления и механического состояния материала [7,8].

Одним из основных механизмов деградации является засорение пор (*pore blocking*), при котором частицы задерживаются на входе в поры либо проникают во внутреннюю структуру материала. Связанное с этим внутреннее загрязнение (*internal fouling*) особенно существенно для волокнистых и пористых фильтров, поскольку накопление загрязнителя может происходить в объеме материала без выраженных изменений его внешней поверхности. По мере развития процесса возрастает сопротивление потоку и уменьшается проницаемость (*permeability*) фильтрующего слоя.

При преимущественном накоплении загрязнений на поверхности формируется слой осадка (*cake layer*), толщина, плотность, пористость и пространственная неоднородность которого оказывают непосредственное влияние на параметры фильтрации. Для мембранных систем формирование такого слоя является одним из наиболее подробно исследованных объектов оптического мониторинга. Его геометрические характеристики могут рассматриваться как самостоятельные диагностические параметры, позволяющие оценивать динамику загрязнения до появления существенных изменений интегральных эксплуатационных характеристик.

Отдельными механизмами являются биологическое обрастание (*biofouling*) и образование минеральных отложений (*scaling*). В первом случае на поверхности фильтрующего материала формируется биопленка, структура и свойства которой изменяются во времени вследствие роста микроорганизмов и образования внеклеточного матрикса. Во втором случае происходит кристаллизация неорганических соединений. Для контроля таких процессов недостаточно только геометрической информации: существенное значение приобретает определение химического состава и природы образующихся отложений.

Дополнительным диагностическим признаком может служить изменение смачиваемости (*wetting*) и оптических свойств среды в непосредственной близости от фильтрующего материала. Эти процессы способны сопровождаться изменением эффективного показателя преломления, интенсивности прошедшего или отраженного оптического излучения и спектральных характеристик чувствительного элемента.

С инженерной точки зрения перечисленные процессы целесообразно связывать с несколькими интегральными параметрами состояния фильтра: загрязняющей нагрузкой (*contaminant loading*), перепадом давления, проницаемостью, грязеемкостью, степенью деформации и структурной целостностью. Перепад давления является одним из наиболее распространенных эксплуатационных показателей, однако характеризует преимущественно

суммарное изменение сопротивления фильтра и не позволяет однозначно определить механизм его возникновения или локализацию загрязнения. Аналогично изменение производительности или расхода является следствием уже произошедших структурных изменений.

Таким образом, задача фотонного мониторинга состоит не только в регистрации изменения оптического сигнала, но и в установлении однозначной связи между этим изменением и физическим состоянием фильтрующего материала. В общем виде диагностическую цепочку можно представить как последовательность: *механизм изменения состояния — физический или химический параметр материала — оптический диагностический признак — восстановленный параметр состояния фильтра*. Именно эта взаимосвязь определяет выбор конкретного фотонного или волоконно-оптического метода, рассматриваемого в последующих разделах.

4. Фотонные методы контроля состояния фильтрующих материалов

Фотонные методы позволяют получать информацию о состоянии фильтрующего материала без его извлечения из технологической системы и, в ряде случаев, непосредственно в процессе фильтрации. В зависимости от используемого физического принципа регистрируемый оптический сигнал может характеризовать интегральное накопление загрязнений, пространственную структуру поверхностного или внутреннего загрязняющего слоя либо его химический состав. С этой точки зрения рассматриваемые методы целесообразно разделить на методы фотометрического контроля, непосредственной оптической визуализации, оптической когерентной томографии, флуоресцентные и рамановские спектроскопические методы, а также методы пространственно-спектральной визуализации. Такое разделение отражает не столько конструкцию измерительной системы, сколько характер информации, получаемой о фильтрующем материале.

4.1. Контроль оптического пропускания, отражения и поглощения

Наиболее простой подход к оптическому контролю основан на регистрации изменения интенсивности излучения, прошедшего через фильтрующий материал или отраженного от него. Накопление частиц, изменение заполнения порового пространства и формирование поверхностных отложений изменяют эффективные коэффициенты рассеяния и поглощения, вследствие чего оптическое пропускание может использоваться как интегральный диагностический признак состояния фильтра.

Особенно подробно влияние материала фильтрующей основы исследовано применительно к аэрозольным фильтрам. В работе Presser и соавт. показано, что оптические свойства фильтрующего материала оказывают существенное влияние на результат фотометрического определения поглощения частиц [9]. Это означает, что регистрируемое оптическое ослабление определяется одновременно свойствами накопленного загрязнителя и самой фильтрующей основы. В критическом обзоре White и соавт. рассмотрены особенности измерения оптического пропускания фильтров из политетрафторэтилена и показана необходимость корректной калибровки с учетом свойств материала и степени его загрузки [10].

Возможность использования подобного принципа непосредственно для контроля волокнистых фильтрующих элементов показана и в русскоязычной литературе. В работе Кузнецовой и соавт. оптический метод использован для оценки параметров элементов из нетканых полимерных волокнистых материалов, причем регистрируемая интенсивность оптического излучения рассматривалась как источник информации о структурных и фильтрационных характеристиках материала [11]. Оптические измерения также могут использоваться косвенно, например посредством фотометрической оценки мутности среды до и после фильтрации, что позволяет характеризовать эффективность задержания частиц и изменение режима работы фильтрующего материала [12].

Преимуществами фотометрических методов являются простота оптической схемы, возможность непрерывного контроля и сравнительно низкая стоимость аппаратуры. Их основное ограничение состоит в интегральном характере измерения: одинаковое изменение пропускания может быть обусловлено различными механизмами — накоплением частиц, изменением их состава, увлажнением материала или перестройкой его структуры. Поэтому такие методы требуют индивидуальной калибровки для конкретного типа фильтрующего материала и состава загрязнений.

4.2. Непосредственная оптическая визуализация

Использование цифровых изображений поверхности или прозрачного диагностического участка фильтрационной системы представляет собой следующий уровень информативности. В отличие от фотометрического измерения, визуализация позволяет определять не только интегральное изменение оптических свойств, но и пространственное распределение загрязнений, выявлять области их преимущественного накопления и отслеживать динамику развития процесса.

Показательным примером является применение недорогой системы оптической визуализации для мониторинга биологического загрязнения в высоконапорных мембранных каналах [13]. Анализ последовательности изображений позволял характеризовать пространственную и временную динамику формирования биологического загрязнения. Существенно, что визуально регистрируемые изменения могли проявляться до формирования выраженного изменения перепада давления, то есть непосредственное наблюдение за фильтрующей системой обеспечивало более ранний диагностический признак по сравнению с традиционным интегральным технологическим параметром.

Основными преимуществами непосредственной визуализации являются наглядность результатов, относительно простая аппаратная реализация и возможность использования развитых методов цифровой обработки изображений. Вместе с тем метод применим главным образом при наличии оптического доступа и преимущественно характеризует состояние наблюдаемой поверхности. Возможности определения внутреннего загрязнения и количественной оценки структуры непрозрачного слоя при этом существенно ограничены. Эти ограничения в значительной степени преодолеваются при использовании методов оптической томографии.

4.3. Оптическая когерентная томография

Оптическая когерентная томография (ОКТ) является наиболее широко исследованным фотонным методом пространственно-разрешенного неразрушающего мониторинга загрязнения мембранных систем [2]. Метод позволяет получать двумерные и трехмерные изображения внутренней структуры исследуемого объекта на основе регистрации обратно рассеянного оптического излучения и тем самым наблюдать границу мембраны и формирующегося на ней слоя загрязнений без извлечения образца из рабочей системы.

Одной из ранних работ, продемонстрировавших возможности количественного применения ОКТ в мембранной фильтрации, является исследование Gao и соавт., в котором была показана возможность наблюдения за ростом загрязняющего слоя непосредственно во время процесса фильтрации [14]. Последующие исследования существенно расширили область применения метода. В частности, Dreszer и соавт. использовали ОКТ для исследования формирования, структуры и отделения биопленки, а также изменения ее состояния при варьировании потока через мембрану [15]. Тем самым была продемонстрирована возможность сопоставления пространственной структуры загрязняющего слоя с гидродинамическими параметрами процесса.

Переход от плоских модельных систем к более сложной геометрии показан West и соавт. при трехмерной визуализации загрязнения каналов с дистанционирующими

сетками в модулях обратного осмоса [16]. Пространственная неоднородность подобных систем принципиально затрудняет интерпретацию одного лишь интегрального перепада давления, тогда как томографические данные позволяют локализовать области преимущественного накопления загрязнения. Fortunato и соавт. развили данный подход, совместив ОКТ с трехмерной обработкой изображений для количественной оценки пространственно распределенного биологического загрязнения в канале с дистанционирующим элементом [17]. Возможность непрерывного отслеживания динамики формирования биопленки была также показана для плоской мембраны [18].

Важным преимуществом ОКТ является возможность различения поверхностного и внутреннего загрязнения [19]. В работе Trinh и соавт. трехмерная ОКТ использовалась при исследовании загрязнения мембраны масляными эмульсиями, что позволило анализировать как формирование внешнего слоя, так и изменения, связанные с проникновением загрязнителя внутрь мембранной структуры [20]. Аналогичные возможности имеют принципиальное значение для диагностики пористых и волокнистых материалов, поскольку изменение их гидравлического сопротивления может быть связано как с образованием поверхностного слоя, так и с заполнением внутреннего порового пространства.

Область применения ОКТ не ограничивается органическими загрязнениями и биопленками. Метод использован для исследования формирования загрязняющего слоя при мембранной дистилляции [21; 22], а также для непосредственного наблюдения за образованием минеральных отложений [23] и анализа влияния эксплуатационных условий на их рост [24]. Следовательно, ОКТ позволяет регистрировать морфологические изменения, обусловленные различными физико-химическими механизмами деградации фильтрующей поверхности.

Существенным направлением развития метода является переход от качественной визуализации к количественному определению параметров загрязняющего слоя. По данным ОКТ могут определяться его толщина, пространственная неоднородность, шероховатость и другие морфометрические характеристики. Результаты томографического мониторинга сопоставлялись с данными последующего анализа мембран после завершения процесса фильтрации, что позволяло проверять интерпретацию наблюдаемых оптических структур [25]. В работе Lee и соавт. особое внимание уделено влиянию алгоритма обработки изображения на определение толщины слоя загрязнения; показано, что корректный выбор процедуры сегментации является необходимым условием получения воспроизводимых количественных результатов [26].

Таким образом, ОКТ в настоящее время представляет наиболее развитый метод непосредственного пространственно-разрешенного оптического контроля морфологии загрязняющего слоя. К его преимуществам относятся неразрушающий характер измерения, возможность работы в реальном времени и построения трехмерного изображения. Ограничениями являются необходимость оптического доступа к контролируемой области, зависимость результата от оптических свойств исследуемой среды и алгоритмов обработки изображения, а также отсутствие собственной химической специфичности. Последнее обстоятельство определяет необходимость совместного рассмотрения ОКТ со спектроскопическими методами.

4.4. Флуоресцентные методы контроля

Флуоресцентная спектроскопия позволяет перейти от анализа геометрии загрязняющего слоя к определению его химического состава. Для органических загрязнений информативной является регистрация матриц возбуждения–эмиссии, в которых интенсивность флуоресценции определяется одновременно длиной волны возбуждения и длиной волны регистрируемого излучения. Такая двумерная спектральная характеристика позволяет разделять вклады различных групп флуоресцирующих органических компонентов.

Yamamura и соавт. предложили метод регистрации флуоресценции непосредственно от загрязняющих веществ, накопленных на поверхности поливинилиденфторидной полой мембраны [5]. Использование оптоволоконного подвода и сбора излучения позволило проводить измерения *in situ* в процессе микрофильтрации. В отличие от анализа проб исходной или отфильтрованной жидкости такой подход дает информацию именно о веществах, накапливающихся непосредственно на поверхности мембраны.

В дальнейшем метод был применен для контроля эффективности химической очистки мембран. Ding и соавт. показали возможность наблюдения за удалением и сохранением отдельных флуоресцирующих компонентов непосредственно в процессе очистки [27]. Тем самым спектроскопическая система может использоваться не только для регистрации роста загрязнения, но и для оценки эффективности регенерации фильтрующего элемента.

Развитие данного направления связано с использованием твердотельной флуоресцентной оптоволоконной регистрации непосредственно в зоне формирования загрязняющего слоя. В работе 2026 г. такой подход применен для динамического анализа ультрафильтрационного загрязнения и сопоставления флуоресцентного сигнала с механизмом формирования и структурой слоя осадка [28]. Данная работа представляет особый интерес в контексте настоящего обзора, поскольку демонстрирует переход от внешней спектроскопической диагностики к оптоволоконному чувствительному элементу, непосредственно взаимодействующему с контролируемой областью.

Флуоресцентные методы обладают высокой чувствительностью к органическим компонентам и потенциально хорошо совместимы с волоконно-оптическими измерительными схемами. Вместе с тем их применимость зависит от наличия у контролируемых веществ собственной флуоресценции либо от возможности использования соответствующих спектральных признаков. На результат также могут влиять фоновые сигналы, фотохимические изменения и взаимное перекрытие спектральных полос. Поэтому при анализе многокомпонентных загрязнений возрастает значение методов многомерной обработки спектральных данных.

4.5. Рамановская спектроскопия и поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия

Рамановская спектроскопия обеспечивает молекулярно-специфическую информацию, основанную на регистрации неупругого рассеяния оптического излучения. В отличие от ОКТ, характеризующей преимущественно геометрию и внутреннюю структуру загрязняющего слоя, рамановский спектр содержит информацию о его химическом составе. Именно поэтому сочетание морфологических и спектроскопических методов представляет особый интерес для многопараметрического контроля состояния фильтрующих материалов.

Возможность использования рамановской спектроскопии для мониторинга загрязнения мембран в реальном времени показана Virtanen и соавт. [4]. Получаемые спектры изменялись по мере развития загрязнения и могли использоваться для определения состояния мембранной системы. В дальнейшем эти авторы применили метод главных компонент (*principal component analysis*, PCA) для преобразования многомерных спектральных данных в компактное представление, пригодное для оперативной визуализации состояния процесса [29]. Этот подход является важным примером перехода от непосредственной регистрации спектра к формированию диагностического признака, характеризующего текущее состояние фильтрационной системы.

Ограничением классической рамановской спектроскопии является сравнительно малая интенсивность неупруго рассеянного излучения. Одним из способов повышения чувствительности является поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия (*surface-enhanced Raman spectroscopy*, SERS), основанная на усилении рамановского сигнала вблизи специальных наноструктурированных металлических поверхностей. Kögler и соавт. проде-

монстрировали возможность использования такого подхода в сочетании с компактной рамановской системой для идентификации биологического загрязнения в реальном времени [30]. Применение усиления сигнала представляет интерес для ранней диагностики, когда количество накопившегося вещества еще недостаточно для уверенной регистрации стандартными спектроскопическими средствами.

Высокая химическая специфичность рамановской спектроскопии особенно важна при мониторинге образования минеральных отложений. Supekar и соавт. показали возможность регистрации образования минерального осадка непосредственно на мембране обратного осмоса [31]. В последующей работе была продемонстрирована возможность раннего обнаружения и различения отложений сульфата и карбоната кальция [32]. В данном случае спектроскопия не только регистрирует факт изменения состояния поверхности, но и позволяет определить природу формирующейся фазы, что невозможно сделать однозначно на основании одного лишь изображения или изменения перепада давления.

Обобщение возможностей рамановской, инфракрасной и флуоресцентной спектроскопии для исследования загрязнения мембран представлено в критическом обзоре Chen и соавт. [33]. Спектроскопические методы позволяют исследовать состав загрязнителей и характер их взаимодействия с мембранной поверхностью, однако при реализации оперативного контроля необходимо учитывать влияние оптического доступа, фоновой флуоресценции, интенсивности сигнала и сложности интерпретации спектров. Поэтому перспективным направлением является сочетание рамановской спектроскопии с методами хемометрического анализа и машинного обучения.

4.6. Светолистовая и гиперспектральная флуоресцентная визуализация

Объединение пространственно разрешенной визуализации и спектральной селективности реализуется в методах флуоресцентной микроскопии. Одним из перспективных подходов является светолистовая флуоресцентная микроскопия (*light-sheet fluorescence microscopy*, LSFM), при которой исследуемая область освещается тонким световым слоем, а флуоресцентное изображение регистрируется в направлении, близком к перпендикулярному направлению возбуждения. Такая геометрия позволяет получать пространственно разрешенные изображения при сравнительно малой фотонагрузке на объект.

Chen и соавт. применили светолистовую флуоресцентную микроскопию для наблюдения процессов загрязнения мембраны непосредственно в ходе ультрафильтрации [34]. Метод позволил визуализировать быстрые микроскопические процессы взаимодействия загрязняющего вещества с мембранной поверхностью и исследовать пространственную динамику формирования загрязнения. По сравнению с ОКТ светолистовая микроскопия обеспечивает иной тип контраста и высокую пространственную детализацию, однако предъявляет более жесткие требования к оптической доступности исследуемой области и, в классической реализации, зависит от флуоресцентных свойств объекта.

Дальнейшее развитие этого подхода связано с гиперспектральной флуоресцентной визуализацией (*hyperspectral fluorescence imaging*), при которой для каждого пространственного элемента изображения регистрируется спектральная информация. В работе Chen и соавт. такой метод использован для безметочного наблюдения за эволюцией загрязнения мембраны в процессе ультрафильтрации [35]. Совмещение светолистовой геометрии и гиперспектральной регистрации позволило одновременно характеризовать пространственное распределение загрязняющего вещества и различать его компоненты по спектральным признакам.

С точки зрения развития систем мониторинга фильтрующих материалов данный подход представляет концептуальный интерес как пример многомерной фотонной диагностики, в которой одному состоянию объекта соответствует не единичная измеряемая вели-

чина, а совокупность пространственных и спектральных признаков. Подобный принцип может быть перенесен и на более компактные волоконно-оптические системы, в которых несколько независимых чувствительных параметров используются для восстановления текущего состояния фильтра.

В целом рассмотренные фотонные методы существенно различаются по характеру получаемой информации. Фотометрические методы преимущественно формируют интегральный показатель оптического состояния фильтрующего материала; непосредственная визуализация дает информацию о пространственном распределении видимых загрязнений; оптическая когерентная томография обеспечивает количественное описание морфологии и внутренней структуры загрязняющего слоя; флуоресцентная и рамановская спектроскопия позволяют анализировать его химический состав; гиперспектральные методы объединяют пространственную и спектральную информацию. Вместе с тем большинство рассмотренных технологий требуют внешнего оптического доступа и специализированной измерительной аппаратуры. Поэтому следующим этапом развития систем мониторинга является переход к компактным волоконно-оптическим чувствительным элементам, допускающим непосредственную интеграцию в конструкцию фильтрующего элемента.

5. От фотонных сигналов к показателям состояния фильтрующего материала

Непосредственная регистрация оптического изображения, спектра или интенсивности излучения сама по себе не обеспечивает количественной оценки технического состояния фильтрующего материала. Для решения диагностической задачи необходимо выделить из исходных фотонных данных информативные признаки и установить их связь с физическими, химическими или эксплуатационными параметрами фильтра. В общем случае обработка измерительной информации включает последовательность: *фотонный сигнал — количественный диагностический признак — параметр состояния фильтрующего материала — решение о режиме дальнейшей эксплуатации*. Современные исследования демонстрируют возможность реализации первых трех этапов такой последовательности, тогда как переход к прогнозированию остаточного ресурса фильтрующего элемента пока остается значительно менее разработанным.

5.1. Количественные морфологические признаки

Для методов оптической визуализации и оптической когерентной томографии исходными данными являются двумерные или трехмерные изображения контролируемой области. Их количественная интерпретация требует выделения границ фильтрующего материала и загрязняющего слоя, после чего могут быть рассчитаны его толщина, площадь или объем, шероховатость поверхности, пространственная неоднородность и другие морфологические характеристики. Так, трехмерная обработка данных ОКТ использовалась для определения пространственного распределения биологического загрязнения в мембранных каналах [17], а количественная оценка толщины слоя загрязнения рассматривалась как один из основных параметров развития процесса [26].

Существенной проблемой такого подхода является зависимость результата от алгоритма обработки изображения. При недостаточно корректной сегментации изменения интенсивности обратно рассеянного излучения могут интерпретироваться как изменение положения границы загрязняющего слоя. Поэтому воспроизводимость морфологических параметров должна рассматриваться как самостоятельная метрологическая характеристика фотонной системы мониторинга. В работе [26], например, специально исследовано влияние процедуры пороговой обработки изображения на результаты определения толщины слоя загрязнения.

Более информативный подход состоит в восстановлении сразу нескольких взаимосвязанных характеристик загрязняющего слоя. В работе Im и соавт. изображения ОКТ использовались для определения его толщины, пористости, шероховатости и плотности с применением методов глубокого обучения [36]. Такое представление состояния существенно информативнее единственного параметра толщины, поскольку слои одинаковой толщины могут различаться по внутренней структуре и, следовательно, по создаваемому сопротивлению потоку.

5.2. Выделение информативных признаков из спектральных данных

Спектроскопические методы формируют многомерные массивы данных, отдельные спектральные компоненты которых могут одновременно зависеть от концентрации различных загрязняющих веществ, свойств фильтрующей поверхности и условий измерения. В таких случаях непосредственная интерпретация отдельных максимумов спектра не всегда позволяет получить устойчивый диагностический параметр, поэтому используются методы многомерного статистического анализа.

Для обработки рамановских спектров Virtanen и соавт. применили метод главных компонент, позволивший представить последовательность спектральных измерений в пространстве существенно меньшей размерности и связать положение экспериментальной точки в этом пространстве со степенью накопления модельного загрязнителя на поверхности мембраны [29]. Построенная модель позволяла отслеживать как процесс адсорбции, так и последующее удаление загрязнения. Существенно, что при таком подходе диагностическим параметром становится не интенсивность отдельной спектральной линии, а совокупный спектральный образ состояния поверхности.

Сходная задача возникает при обработке матриц возбуждения–эмиссии флуоресценции. В работе [28] для количественного разделения вкладов различных органических компонентов применялся параллельный факторный анализ (*parallel factor analysis*, PARAFAC). Совмещение этого метода с твердотельной флуоресцентной оптоволоконной системой позволило количественно анализировать накопление смешанных загрязняющих компонентов непосредственно на поверхности мембраны и одновременно исследовать изменение структуры формирующегося слоя осадка. При этом характер зависимости между интенсивностью флуоресценции и количеством вещества может различаться для разных компонентов, включая эффекты тушения флуоресценции, что дополнительно подтверждает необходимость многопараметрической обработки измерительных данных.

Таким образом, использование методов снижения размерности и хемометрического анализа позволяет перейти от отдельных спектральных характеристик к компактному набору признаков, непосредственно связанному с составом и количеством загрязнений. Для задач мониторинга это особенно важно, поскольку изменение состояния фильтрующего материала, как правило, имеет многопараметрический характер.

5.3. Применение нейросетевых моделей

Следующим уровнем обработки является непосредственное восстановление параметров загрязнения или эксплуатационных характеристик фильтра по многомерным оптическим данным. Для этой задачи все более широко используются методы машинного обучения и, в частности, искусственные нейронные сети.

В работе Park и соавт. глубокая нейронная сеть (*deep neural network*, DNN) использовалась для моделирования роста органического загрязняющего слоя и снижения потока при нано- и обратноосмотической фильтрации на основании данных ОКТ [37]. Принципиально важным является то, что фотонные данные в данном случае использовались не только для визуального наблюдения процесса, но и как входная информация модели, восстанавливающей динамику загрязнения и соответствующее изменение эксплуатационного параметра мембранной системы.

Другой вариант реализации представлен в работе Im и соавт. [36], где для анализа изображений ОКТ применена сверточная нейронная сеть (*convolutional neural network*, CNN). Модель одновременно оценивала толщину, пористость, шероховатость и плотность загрязняющего слоя. Таким образом, одно оптическое изображение преобразовывалось в многокомпонентный вектор параметров состояния. Такой подход представляет особый интерес для фотонного мониторинга, поскольку позволяет отказаться от последовательного определения каждого параметра отдельным алгоритмом и сформировать единый вычислительный преобразователь «*измерительные данные — состояние объекта*».

Вместе с тем применение нейросетевых моделей предъявляет дополнительные требования к формированию обучающих выборок. Диапазон загрязнений, свойства фильтрующего материала, состав рабочей среды и режим фильтрации, представленные при обучении модели, определяют область ее последующей применимости. Поэтому высокая точность восстановления параметров на экспериментальной выборке не гарантирует переносимости модели на другой тип фильтра или условия эксплуатации. Для практического применения необходимы проверка обобщающей способности модели и формирование репрезентативных наборов данных, содержащих одновременно фотонные измерения и независимые значения контролируемых физических параметров.

5.4. Связь фотонных признаков с эксплуатационными характеристиками фильтра

Наиболее важной с прикладной точки зрения является задача перехода от характеристик изображения или спектра к параметрам, непосредственно определяющим работоспособность фильтрующего элемента. К ним относятся перепад давления, проницаемость, производительность, степень загрузки загрязнителем, эффективность очистки и, в перспективе, остаточный ресурс.

В работе Park и соавт. [38] данные непосредственного наблюдения за толщиной загрязняющего слоя методом ОКТ использовались совместно с математическими моделями загрязнения для описания снижения потока через мембрану. Такой подход представляет собой принципиально важный переход от регистрации морфологии загрязнения к восстановлению эксплуатационного поведения фильтрационной системы. Влияние биодоступности органического вещества на развитие загрязнения при мониторинге в реальном времени исследовано в [39]. В последующей работе [37] эта связь была реализована уже средствами глубокого обучения, когда модель одновременно описывала рост загрязнения и снижение потока.

Спектроскопические признаки также могут быть связаны с функциональными характеристиками фильтрационной системы. При контроле химической очистки методом твердотельной флуоресцентной спектроскопии результаты оценки удаления необратимых загрязнений соответствовали восстановлению проницаемости мембраны по чистой воде [27]. В данном случае изменение оптического сигнала выступает не только показателем наличия загрязнения, но и критерием эффективности восстановления функциональных свойств фильтра.

Вместе с тем анализ рассмотренных публикаций показывает, что непосредственная количественная связь между фотонными параметрами и инженерными характеристиками фильтрующего материала исследована существенно слабее, чем сами методы получения изображений и спектров. Особенно ограничено число работ, в которых по оптическим данным непосредственно определяются перепад давления, проницаемость, грязеемкость или степень выработки ресурса. Показательно, что оптическая визуализация может выявлять развитие биологического загрязнения раньше, чем появляется выраженное изменение перепада давления [13]. Это подтверждает преимущество фотонного контроля как метода ранней диагностики, но одновременно показывает, что оптический признак и традиционный эксплуатационный параметр характеризуют различные стадии и аспекты процесса загрязнения.

Перспективной представляется совместная обработка морфологических, спектральных и волоконно-оптических измерительных данных. ОКТ может характеризовать геометрию и пространственное распределение загрязнения, спектроскопические методы — его химический состав, а интегрированные волоконно-оптические датчики — давление, деформацию, температуру и другие физические параметры. Объединение этих данных в рамках единой модели потенциально позволяет сформировать многопараметрический показатель состояния фильтрующего материала. Однако в рассмотренной выборке работ подобное объединение различных фотонных модальностей практически не реализовано и должно рассматриваться как одно из перспективных направлений дальнейших исследований.

Таким образом, развитие фотонного мониторинга постепенно смещается от непосредственной регистрации изображений и спектров к количественному восстановлению физически содержательных параметров состояния фильтра. В настоящее время наиболее разработаны методы определения морфологических характеристик загрязняющего слоя и количественной обработки спектральных данных. Следующим этапом должно стать формирование устойчивых зависимостей между фотонными признаками и эксплуатационными характеристиками фильтрующих материалов, а также создание моделей, способных не только оценивать их текущее состояние, но и прогнозировать дальнейшую деградацию и момент необходимости очистки или замены фильтрующего элемента.

6. Области применения фотонных технологий мониторинга фильтрующих материалов

Рассмотренные исследования показывают существенную неоднородность степени практической освоенности фотонных методов в различных областях фильтрации. Наиболее развитым направлением является мониторинг мембранных процессов водоочистки, тогда как для волокнистых фильтрующих материалов, систем очистки воздуха, масел и других технологических сред число работ, непосредственно посвященных фотонному мониторингу состояния фильтрующего элемента, существенно меньше. При этом физические параметры, определяющие работоспособность фильтра, во многих случаях являются общими: накопление загрязнений, изменение проницаемости и перепада давления, локальная деформация и нарушение структурной целостности. Это создает предпосылки для переноса разработанных фотонных и волоконно-оптических подходов между различными классами фильтрационных систем.

6.1. Мембранные процессы водоочистки

Именно мембранные технологии в настоящее время представляют наиболее развитую область применения фотонных методов мониторинга. В рассматриваемой выборке представлены исследования микрофильтрации, ультрафильтрации, нанофильтрации, обратного и прямого осмоса, а также мембранной дистилляции. С использованием оптической когерентной томографии исследовались образование поверхностного слоя загрязнений, внутреннее загрязнение пор, развитие биопленок, формирование минеральных отложений и эффективность регенерации мембран [14–18; 20; 21; 24–26; 40]. Спектроскопические методы применялись для определения химического состава загрязнений и раннего выявления минеральных отложений [27–35].

Особенно важным для развития интегрированных систем мониторинга является переход от внешней оптической диагностики к волоконно-оптическим чувствительным элементам. Возможность раннего обнаружения биологического загрязнения с помощью полимерного оптического волокна была продемонстрирована в системе обратного осмоса [6], а оптоволоконная регистрация флуоресценции использовалась для непосредственного контроля накопления органических загрязнений на поверхности мембраны [5, 28]. В совокуп-

ности эти результаты показывают, что для мембранной водоочистки уже сформирована экспериментальная база, позволяющая рассматривать фотонный мониторинг не только как исследовательский инструмент, но и как потенциальный компонент систем оперативной диагностики и управления процессом фильтрации.

6.2. Воздушная и аэрозольная фильтрация

Для воздушных и аэрозольных фильтров в рассматриваемом корпусе наиболее разработан фотометрический подход, основанный на изменении пропускания и поглощения оптического излучения фильтрующим материалом. Показано, что оптические свойства фильтрующей основы существенно влияют на результаты измерения поглощения аэрозольных частиц [9], а для мембран из политетрафторэтилена необходима специальная калибровка измерения оптического пропускания с учетом свойств материала и степени его загрузки [10].

Данные результаты имеют более общее значение для разработки фотонных методов диагностики воздушных фильтров. По мере накопления аэрозольных частиц изменяются оптическое пропускание, рассеяние и поглощение фильтрующего слоя, поэтому соответствующие величины потенциально могут использоваться в качестве диагностических признаков степени его загрузки. Однако оптический сигнал в данном случае определяется одновременно свойствами задержанных частиц и самой волокнистой основы, что затрудняет построение универсальной зависимости между оптическим ослаблением и остаточным ресурсом фильтра. Таким образом, для аэрозольной фильтрации одной из ключевых задач остается переход от измерения оптических характеристик нагруженного фильтра к количественной оценке его эксплуатационного состояния.

6.3. Нетканые и волокнистые фильтрующие материалы для жидких сред

Отдельную область составляют глубинные фильтры из тканых и нетканых волокнистых материалов. В отличие от многих мембранных систем, задержание загрязняющих частиц здесь может происходить не только на поверхности, но и во всем объеме фильтрующего слоя. Это обстоятельство усложняет непосредственную оптическую диагностику, однако одновременно делает особенно актуальными методы, чувствительные к изменению структуры и интегральных свойств материала.

В работе [11] показана возможность применения оптического контроля для оценки параметров фильтрующих элементов из нетканых полимерных волокнистых материалов. Изменение интенсивности проходящего излучения использовалось как информативный признак, связанный со структурными и фильтрационными характеристиками материала. Для тканых фильтрующих материалов оптическое определение мутности фильтруемой среды применялось при исследовании эффективности очистки, процессов засорения и эксплуатационной долговечности [12].

Функциональные характеристики таких фильтров существенно зависят от структуры волокнистого слоя. В исследованиях нетканых полимерных материалов рассматриваются взаимосвязи между структурными параметрами, тонкостью фильтрации [41], гидравлическим сопротивлением и грязеемкостью [42]. Для многослойных нетканых материалов дополнительное значение имеют распределение характеристик по толщине и взаимодействие отдельных функциональных слоев [43]. С точки зрения фотонного мониторинга это означает необходимость определения не только поверхностного загрязнения, но и перераспределения загрязняющих частиц по глубине материала.

Перспективным направлением для подобных систем является интеграция чувствительных оптических волокон непосредственно в структуру нетканого материала. В этом случае волоконный элемент может использоваться не только для регистрации локального загрязнения, но и для измерения деформации, температуры или параметров, связанных с

изменением гидравлического сопротивления. В рассматриваемой литературе подобные решения применительно непосредственно к нетканым фильтрам представлены пока ограниченно, что позволяет считать данное направление одним из наиболее значимых резервов развития фотонных технологий мониторинга.

6.4. Фильтрация масел и нефтесодержащих сред

Системы очистки масел и нефтесодержащих жидкостей представляют отдельную группу задач, для которой характерны высокая вязкость рабочей среды, значительная вариабельность состава загрязнений и возможность одновременного присутствия твердых частиц и органических компонентов. Для фильтров тонкой очистки моторных масел показано существенное влияние структуры нетканого фильтрующего материала на эффективность очистки и его способность накапливать загрязнения [44]. Для очистки нефтезагрязненных сточных вод также исследуются различные типы фильтрующих и сорбционных материалов, свойства которых определяют эффективность удаления нефтепродуктов [45].

С точки зрения фотонной диагностики такие системы представляют интерес по двум причинам. Во-первых, накопление загрязнений приводит к изменению оптических и механических характеристик самого фильтрующего материала. Во-вторых, органическая природа значительной части загрязнений делает потенциально применимыми спектрально-селективные методы, способные различать компоненты не только по величине оптического ослабления, но и по их спектральным признакам. Возможность использования ОКТ для различения внешнего и внутреннего загрязнения при фильтрации масляных эмульсий уже продемонстрирована для мембранных систем [20], что указывает на принципиальную применимость пространственно разрешенного оптического контроля и к задачам фильтрации нефтесодержащих сред.

Для промышленных систем данного класса особенно перспективным представляется сочетание оптических методов определения состава загрязнений с волоконно-оптическим контролем перепада давления и деформации фильтрующего элемента. Однако в сформированной выборке непосредственные экспериментальные реализации таких комбинированных систем отсутствуют.

6.5. Фильтрационные системы для химически и термически сложных условий

Отдельные требования к средствам мониторинга возникают в фильтрационных системах, эксплуатируемых при воздействии агрессивных химических сред, повышенной температуры или в условиях высоких требований к чистоте технологического процесса. В микроэлектронной промышленности, например, применяются фильтрующие материалы, для которых критическое значение имеют термохимическая стойкость и отсутствие загрязнения фильтруемой среды компонентами самого материала [46]. В подобных условиях возможность электрически пассивного дистанционного измерения является одним из существенных преимуществ волоконно-оптических технологий [47].

Для контроля фильтров, работающих при повышенных температурах, потенциальный интерес представляют чувствительные элементы на основе термостойких и регенерированных волоконных брэгговских решеток [48], тогда как интерферометрические волоконные датчики могут использоваться для измерения давления и связанных с ним изменений состояния фильтрующего элемента. Однако работы данной группы в рассматриваемой выборке в основном демонстрируют возможности соответствующих волоконно-оптических преобразователей вне собственно фильтрационной системы. Поэтому их применение для мониторинга фильтрующих материалов следует рассматривать прежде всего, как перспективное направление, требующее отдельной экспериментальной верификации.

Таким образом, степень зрелости фотонного мониторинга существенно зависит от области применения. Наиболее убедительная экспериментальная база сформирована для

мембранной водоочистки, где уже реализованы методы пространственной визуализации, спектроскопического анализа и непосредственного волоконно-оптического контроля загрязнения. Для аэрозольных и волокнистых фильтров подтверждена информативность оптического пропускания и других интегральных характеристик, однако их связь с эксплуатационным ресурсом требует дальнейшей количественной разработки. В системах фильтрации масел и агрессивных технологических сред потенциал фотонных и волоконно-оптических методов определяется прежде всего возможностью совмещения химической селективности, дистанционного измерения и устойчивости чувствительных элементов к внешним воздействиям. Общим направлением развития для всех рассмотренных приложений является переход от внешнего наблюдения за фильтрационным процессом к интегрированному контролю непосредственно состояния фильтрующего материала.

7. Сравнительная метрологическая оценка и технологическая готовность

Рассмотренные фотонные методы существенно различаются не только по физическому принципу измерения, но и по характеру получаемой диагностической информации, пространственному и временному разрешению, возможности интеграции в фильтрующую систему и степени технологической зрелости. Поэтому сопоставление отдельных подходов исключительно по чувствительности не является корректным: оптическая когерентная томография, рамановская спектроскопия и волоконно-оптический датчик давления регистрируют различные проявления изменения состояния фильтрующего материала. Для сравнительной оценки целесообразно учитывать пространственное и временное разрешение, глубину зондирования, химическую селективность, чувствительность, степень вмешательства в контролируемый процесс, возможность интеграции и мультиплексирования, сложность аппаратуры, устойчивость к эксплуатационным воздействиям и уровень технологической готовности (*technology readiness level*, TRL).

7.1. Пространственная и временная информативность

Наиболее высокую пространственную информативность среди рассмотренных методов обеспечивает оптическая когерентная томография. Возможность получения двумерных и трехмерных изображений позволяет определять толщину и пространственную неоднородность загрязняющего слоя, исследовать структуру биопленок и различать поверхностное и внутреннее загрязнение [14–18, 20, 21, 24–26]. Существенным преимуществом является возможность многократного измерения одного и того же участка непосредственно в процессе фильтрации, благодаря чему ОКТ пригодна для исследования динамики загрязнения практически в реальном времени [15, 18].

Однако глубина получения достоверной информации определяется оптическими свойствами исследуемого материала и загрязняющего слоя. По мере увеличения рассеяния и поглощения эффективность исследования внутренних областей снижается. Кроме того, ОКТ требует оптического доступа к контролируемому участку, что существенно ограничивает возможность непосредственного переноса лабораторных конфигураций на закрытые промышленные фильтрующие аппараты.

Непосредственная оптическая визуализация характеризуется меньшей глубиной зондирования и преимущественно регистрирует состояние поверхности, однако обладает преимуществами простоты и высокой частоты получения данных. Ее возможностей может быть достаточно для раннего выявления пространственно неоднородного биологического загрязнения [13]. Фотометрические методы имеют минимальную пространственную селективность и формируют преимущественно интегральный сигнал, однако могут обеспечивать практически непрерывное наблюдение при значительно меньшей аппаратной сложности [9–12].

Флуоресцентные и рамановские методы занимают промежуточное положение. Пространственное разрешение определяется геометрией оптической системы и размером области возбуждения и регистрации, тогда как основное преимущество этих методов связано не с построением геометрического изображения, а с получением спектральной информации о составе загрязнения [4, 5, 27–35].

7.2. Химическая селективность и чувствительность

Наиболее существенным ограничением ОКТ и обычной оптической визуализации является отсутствие непосредственной химической селективности. Два загрязняющих слоя, близких по морфологии и оптическому рассеянию, могут иметь принципиально различный химический или биологический состав. Поэтому томографическое изображение позволяет с высокой достоверностью установить факт формирования и пространственную структуру загрязнения, но не всегда дает возможность определить природу его компонентов.

Рамановская спектроскопия, напротив, характеризуется высокой молекулярной селективностью. В частности, показана возможность не только обнаружения минерального осадка, но и различения сульфата и карбоната кальция на ранних стадиях образования отложений [31, 32]. Для повышения чувствительности может применяться поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия, позволяющая регистрировать малые количества биологических загрязнений [30]. Основными ограничениями остаются сравнительно малая интенсивность обычного рамановского рассеяния, возможный флуоресцентный фон и более высокая сложность спектральной аппаратуры.

Флуоресцентные методы обладают высокой чувствительностью к органическим компонентам и позволяют осуществлять непрерывный контроль их накопления непосредственно на поверхности мембраны [5, 28]. Дополнительным преимуществом является возможность передачи возбуждающего и регистрируемого излучения по оптическому волокну, что существенно упрощает интеграцию чувствительной области в фильтрационную установку. Вместе с тем информативность метода определяется спектральными свойствами контролируемых соединений, а количественная интерпретация может осложняться перекрытием спектральных компонентов и эффектами тушения флуоресценции [28].

Таким образом, морфологические и спектроскопические методы следует рассматривать как взаимодополняющие. ОКТ дает преимущественно пространственную информацию о структуре загрязнения, тогда как рамановская и флуоресцентная спектроскопия позволяют характеризовать его состав. Ни один из этих подходов по отдельности не обеспечивает полного описания состояния фильтрующего материала.

7.3. Инвазивность и интеграция в фильтрующую систему

Большинство методов внешней фотонной диагностики являются неразрушающими, однако требуют организации оптического доступа к исследуемой области. Для лабораторных мембранных ячеек это требование сравнительно легко реализуется с использованием прозрачных окон или специально разработанных каналов. В промышленных фильтрующих аппаратах наличие таких элементов может существенно усложнять конструкцию и влиять на гидродинамику процесса.

В этом отношении принципиальное преимущество имеют волоконно-оптические чувствительные элементы [49]. Полимерное оптическое волокно уже использовалось непосредственно в мембранной системе для регистрации начального биологического загрязнения [6]. Оптоволоконный подвод и сбор флуоресцентного излучения также позволяют локализовать измерительную область непосредственно у поверхности фильтрующего материала [5, 28].

Еще более широкие возможности интеграции потенциально обеспечивают волоконные брэгговские решетки и волоконные интерферометры Фабри–Перо. Их малые размеры

позволяют размещать чувствительный элемент внутри конструкции или непосредственно в потоке [48]. Продемонстрированы волоконные системы для совместного измерения давления и температуры на основе интерферометра Фабри–Перо и ВБР [50], а также высокочувствительные интерферометрические датчики давления с использованием эффекта Вернье [51]. Для ВБР исследованы долговременная стабильность показаний при изменении внешних условий [52], влияние конструктивного оформления на передачу деформации к чувствительному элементу [53] и способы температурной компенсации [54].

Однако именно здесь проявляется важное различие между зрелостью сенсорной технологии и зрелостью ее применения для мониторинга фильтров. Волоконные датчики давления [55], температуры и деформации являются хорошо разработанным классом измерительных преобразователей, однако их непосредственная интеграция в фильтрующие материалы и количественная калибровка относительно загрязнения, проницаемости или остаточного ресурса в анализируемой литературе представлены существенно слабее.

7.4. Мультиплексирование и масштабирование измерительной системы

Для мониторинга крупноразмерных или пространственно неоднородно загрязняющихся фильтрующих элементов одного измерительного участка может быть недостаточно. В таких системах принципиальное значение приобретает возможность мультиплексирования — одновременного или последовательного опроса нескольких пространственно разнесенных чувствительных элементов по общей измерительной линии.

Внешние методы визуализации обладают высокой информативностью в пределах поля зрения, однако увеличение контролируемой площади требует сканирования или использования нескольких оптических каналов. Для рамановских и флуоресцентных систем масштабирование также связано с увеличением числа точек возбуждения и регистрации.

Волоконно-оптические технологии изначально имеют преимущества для построения многоточечных и квазираспределенных измерительных систем. Возможность сетевой организации волоконно-оптических датчиков показана для многоточечного контроля механических параметров [56], а спектрально селективные структуры на основе ВБР потенциально позволяют размещать несколько чувствительных элементов в одном оптическом волокне. Именно возможность мультиплексирования является одним из наиболее существенных аргументов в пользу использования волоконно-оптических методов для будущих систем мониторинга крупноразмерных или многослойных фильтрующих материалов.

7.5. Аппаратная сложность, стоимость и эксплуатационная устойчивость

По аппаратной сложности рассмотренные методы образуют достаточно широкий диапазон. Наиболее простыми являются фотометрические системы на основе источника излучения и одного или нескольких фотоприемников. Их преимуществами являются низкая стоимость и возможность создания компактной измерительной схемы, однако эти преимущества достигаются за счет меньшей селективности и необходимости индивидуальной калибровки [9–12]

ОКТ обеспечивает значительно больший объем диагностической информации, но требует источника с соответствующими когерентными характеристиками, интерферометрической части, сканирующей или спектральной системы регистрации и вычислительной обработки данных. Рамановские системы дополнительно требуют спектрально-селективной регистрации слабого рассеянного излучения. Вследствие этого высокая информативность данных методов сопровождается большей стоимостью и сложностью технической реализации.

Волоконно-оптические системы занимают промежуточное положение. Сам чувствительный элемент может иметь простую и компактную конструкцию, но используемый метод опроса ВБР [57] или интерферометра способен существенно влиять на стоимость всей

системы. При этом оптическое волокно обеспечивает дистанционное расположение оптоэлектронного блока относительно контролируемой зоны и устойчивость измерительного канала к электромагнитным воздействиям. Для фильтрационных систем, работающих при повышенной температуре или в сложных внешних условиях, дополнительный интерес представляют специально разработанные термостойкие волоконные чувствительные элементы.

7.6. Технологическая готовность

Сопоставление технологической готовности требует осторожности, поскольку рассмотренные публикации преимущественно не содержат формального определения уровня TRL. Поэтому в настоящем обзоре степень зрелости оценивается качественно по совокупности признаков: наличие экспериментальной реализации, возможность измерений *in situ*, работа в реальном времени, повторяемость результатов, испытания в условиях, близких к рабочей фильтрационной системе, и возможность конструктивной интеграции.

По этим критериям наиболее зрелым фотонным направлением применительно непосредственно к процессам фильтрации является ОКТ. Метод многократно апробирован для различных мембранных процессов, типов загрязнения и конструкций каналов [14–18, 20, 21, 24–26]. Его применение вышло за рамки доказательства принципа и включает количественную обработку изображений, трехмерное картирование и сопоставление результатов с эксплуатационными параметрами. Основным препятствием для более широкого промышленного применения остается необходимость оптического доступа и сравнительно сложная измерительная аппаратура.

Рамановская и флуоресцентная спектроскопия также продемонстрированы в режимах *in situ* и реального времени [4, 5, 27–33], однако число экспериментальных исследований меньше, а перенос на промышленный масштаб дополнительно ограничивается требованиями к оптической геометрии, свойствами загрязняющих компонентов и сложностью спектральной обработки.

Фотометрические методы характеризуются наиболее простой аппаратной реализацией и потенциально высокой готовностью к практическому использованию, но их диагностические возможности ограничены интегральным характером сигнала и зависимостью от свойств конкретного фильтрующего материала [9–12].

Особое положение занимают волоконно-оптические технологии. Как класс измерительных средств ВБР, интерферометры Фабри–Перо и другие волоконные преобразователи являются технологически зрелыми. Вместе с тем применительно именно к мониторингу состояния фильтрующих материалов данное направление находится на более ранней стадии. В рассматриваемой выборке имеется экспериментальное подтверждение непосредственного волоконно-оптического обнаружения биологического загрязнения [6] и оптоволоконного флуоресцентного мониторинга [5, 28], однако систематические исследования встроенных ВБР- и интерферометрических систем для определения загрязнения, проницаемости, перепада давления и остаточного ресурса фильтра пока практически отсутствуют.

В обобщенном виде сравнительные характеристики рассмотренных технологий представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики технологий

Метод	**Пространственная информативность**	**Химическая селективность**	**Работа *in situ***	**Возможность интеграции**	**Мультиплексирование**	**Аппаратная сложность**	**Зрелость для мониторинга фильтров**
Фотометрия	низкая	низкая	высокая	высокая	средняя	низкая	средняя–высокая
Непосредственная визуализация	средняя	низкая	высокая при наличии оптического доступа	низкая	низкая	низкая–средняя	средняя
ОКТ	высокая, включая информацию по глубине	низкая	высокая	низкая–средняя	низкая	высокая	высокая для мембранных систем
Флуоресцентная спектроскопия	локальная	высокая для флуоресцирующих компонентов	высокая	средняя–высокая	средняя	средняя	средняя
Рамановская спектроскопия	локальная	высокая	подтверждена	средняя	низкая–средняя	высокая	средняя
Волоконно-оптические датчики	локальная или многоточечная	определяется типом чувствительного элемента	высокая	высокая	высокая	средняя	высокая как сенсорная технология, но пока ограниченная непосредственно для фильтров

Таким образом, не существует единственного фотонного метода, оптимального по всей совокупности метрологических и эксплуатационных характеристик. Наиболее зрелая технология непосредственного наблюдения морфологии загрязнения — оптическая когерентная томография; наиболее информативными в отношении химического состава являются рамановские и флуоресцентные методы; наибольшими возможностями конструктивной интеграции и масштабирования обладают волоконно-оптические чувствительные элементы. Это различие определяет перспективность не столько дальнейшего совершенствования отдельных методов изолированно, сколько создания многопараметрических систем, объединяющих взаимодополняющие диагностические признаки.

8. Нерешенные задачи и ограничения современных подходов

Проведенный анализ показывает, что фотонные методы уже обеспечивают получение разнообразной информации о состоянии фильтрующих систем — от пространственной структуры загрязняющего слоя до его химического состава и динамики формирования. Вместе с тем степень развития отдельных направлений существенно различается. Наиболее зрелые решения относятся к оптическому мониторингу мембранных процессов, тогда как

непосредственный контроль состояния традиционных волокнистых и нетканых фильтрующих материалов развит значительно слабее. Кроме того, большинство существующих подходов решает отдельные диагностические задачи и пока не образует единой системы, связывающей регистрируемый оптический сигнал с количественной оценкой текущего состояния и остаточного ресурса фильтрующего элемента.

8.1. Ограниченное развитие встроенного контроля волокнистых фильтрующих материалов

Основная часть экспериментальных исследований в анализируемой выборке посвящена мембранным системам. Для них продемонстрированы оптическая когерентная томография, рамановская и флуоресцентная спектроскопия, непосредственная визуализация и отдельные варианты волоконно-оптического контроля [2, 4–6, 14–18, 20, 21, 24–35]. В то же время для тканых и нетканых глубинных фильтров основное внимание в литературе уделяется структуре материала, эффективности фильтрации, гидравлическому сопротивлению и грязеемкости [11, 12, 42–46].

Работы, в которых чувствительное оптическое волокно непосредственно взаимодействует с загрязняющейся областью, пока немногочисленны. К таким исследованиям относятся обнаружение начального биологического загрязнения с помощью полимерного оптического волокна [6] и волоконно-оптическая регистрация флуоресценции непосредственно у поверхности мембраны [5, 28]. Эти результаты подтверждают принципиальную возможность перехода от внешней оптической диагностики к интегрированному чувствительному элементу, однако систематические исследования встроенных волоконных датчиков применительно к волокнистым фильтрующим материалам в рассматриваемой выборке практически отсутствуют.

Таким образом, одним из основных пробелов остается создание фильтрующего материала, в котором оптический чувствительный элемент является функциональной частью конструкции и позволяет контролировать изменение ее состояния непосредственно в процессе эксплуатации.

8.2. Недостаточная связь оптических признаков с инженерными параметрами состояния

Большинство фотонных методов формирует параметры, непосредственно характеризующие оптическое или морфологическое состояние объекта: интенсивность прошедшего излучения, толщину и шероховатость загрязняющего слоя, пространственное распределение отложений, интенсивность флуоресценции или спектральный состав рамановского рассеяния [14–18, 20, 21, 24–35]. Эти величины обладают диагностической информативностью, однако не всегда непосредственно соответствуют параметрам, используемым для принятия решения об эксплуатации фильтра.

Для практической системы мониторинга конечными выходными параметрами должны быть прежде всего перепад давления, изменение проницаемости, степень загрузки загрязнителем, грязеемкость, эффективность регенерации и, в перспективе, остаточный ресурс фильтрующего элемента. Исследования [37, 38] показывают возможность установления связи между данными непосредственного оптического наблюдения, ростом загрязняющего слоя и снижением потока через мембрану. Однако подобные результаты пока относятся преимущественно к отдельным мембранным системам и не образуют универсальной методологии.

Показательно также, что оптические признаки развития загрязнения могут формироваться раньше, чем возникает выраженное изменение традиционно контролируемого перепада давления [6, 13]. С одной стороны, это является существенным преимуществом фотонного мониторинга как метода ранней диагностики. С другой стороны, возникает задача

установления количественной зависимости между ранними оптическими изменениями и последующей деградацией эксплуатационных характеристик.

Таким образом, ключевой нерешенной задачей остается построение достоверного преобразования *оптический диагностический признак — физическое состояние материала→ эксплуатационный параметр фильтра*.

Без решения этой задачи высокая чувствительность фотонного метода сама по себе не обеспечивает его практической диагностической ценности.

8.3. Разобщенность морфологических и спектроскопических методов

Другим существенным ограничением является преимущественно раздельное использование различных фотонных технологий. Оптическая когерентная томография обеспечивает высокоинформативное описание геометрии, толщины и пространственного распределения загрязнений [14–18, 20, 21, 24–26], но практически не позволяет определить их химическую природу. Рамановская и флуоресцентная спектроскопия, напротив, обладают химической селективностью [4, 5, 27–33], однако обычно дают значительно меньший объем информации о трехмерной структуре загрязняющего слоя.

Гиперспектральная флуоресцентная визуализация демонстрирует возможность совмещения пространственной и спектральной информации в рамках одного измерительного подхода [34, 35]. Тем не менее подобные методы требуют достаточно сложной оптической системы и пока преимущественно используются как исследовательский инструмент.

Перспективным представляется объединение нескольких взаимодополняющих измерительных каналов: например, морфологического и спектроскопического либо спектроскопического и волоконно-оптического механического. При этом регистрируемое состояние фильтрующего материала будет представляться не одной измеряемой величиной, а многокомпонентным вектором признаков, содержащим информацию о геометрии загрязнения, его составе и сопровождающем изменении физических характеристик фильтра. В анализируемой выборке систематическая реализация подобных многомодальных систем практически отсутствует.

8.4. Метрологические проблемы встроенных волоконно-оптических датчиков

Интеграция оптического волокна в фильтрующий материал создает новые метрологические проблемы. Спектральный отклик волоконной брэгговской решетки или интерферометрического датчика может одновременно зависеть от давления, температуры, деформации, показателя преломления окружающей среды и способа механического закрепления чувствительного элемента [58]. Поэтому регистрируемое изменение оптического параметра не всегда может быть однозначно связано с изменением контролируемой величины.

В работах по волоконно-оптической сенсорике показаны способы одновременного измерения давления и температуры [50], повышения чувствительности интерферометрических датчиков давления [51], а также исследованы вопросы стабильности ВБР при изменении условий окружающей среды [52]. Особое значение для встроенных датчиков имеет передача механической деформации от контролируемой конструкции к оптическому волокну. Как показано в [53], конструктивное оформление чувствительного элемента способно существенно изменять его передаточную характеристику. Аналогично температурная чувствительность требует компенсации или разделения вкладов различных физических воздействий [50, 54].

Для мягких, пористых и многослойных фильтрующих материалов эта проблема может быть еще более существенной, поскольку механическая связь между волокном и окружающим материалом изменяется при смачивании, загрязнении, уплотнении и деформации фильтрующего слоя. Следовательно, калибровка встроенного датчика должна выполняться

не только как калибровка самостоятельного оптического преобразователя, но и как калибровка всей системы «*чувствительный элемент — фильтрующий материал — рабочая среда*».

8.5. Недостаточное развитие многоточечного и пространственно распределенного контроля

Загрязнение реального фильтрующего элемента обычно имеет пространственно неоднородный характер. На скорость накопления загрязнений влияют распределение потока, локальная структура материала, геометрия каналов и особенности подвода рабочей среды. Пространственная неоднородность биологического загрязнения непосредственно наблюдалась как при использовании ОКТ [16, 17], так и средствами обычной оптической визуализации [13].

Внешние методы визуализации позволяют получать пространственное распределение загрязнения в пределах доступной области, однако масштабирование таких систем на крупноразмерные закрытые фильтрующие элементы затруднено. Волоконно-оптические технологии, напротив, принципиально допускают размещение нескольких чувствительных элементов вдоль общей оптической линии. Возможность сетевой организации волоконных датчиков показана для контроля механических параметров [56], однако применительно непосредственно к фильтрующим материалам многоточечные и квазираспределенные измерительные архитектуры в рассматриваемой выборке практически не представлены.

Это ограничение представляется принципиальным, поскольку единственный локальный датчик не позволяет определить положение области преимущественного засорения. Поэтому дальнейшее развитие встроенного мониторинга должно быть связано не только с повышением чувствительности отдельного преобразователя, но и с созданием пространственно распределенной системы определения состояния фильтрующего элемента.

8.6. Недостаток стандартизованных процедур обработки и сопоставимых экспериментальных данных

Получаемый результат зависит не только от физического принципа измерения, но и от используемого алгоритма обработки. Особенно явно это проявляется при анализе изображений ОКТ. В работе [26] показано, что выбор процедуры сегментации непосредственно влияет на определяемую толщину загрязняющего слоя. Следовательно, сравнение результатов, полученных различными исследовательскими группами, затрудняется при отсутствии единых процедур выделения границ, расчета морфологических параметров и оценки погрешности.

Аналогичная проблема характерна для спектроскопических данных и методов машинного обучения. Метод главных компонент использовался для обработки рамановских спектров [29], параллельный факторный анализ — для разделения флуоресцентных компонентов [28], а глубокие нейронные сети — для восстановления параметров загрязнения по данным ОКТ [36, 37]. При этом модели создавались для конкретных экспериментальных систем, составов загрязняющих веществ и режимов фильтрации.

Отсутствие унифицированных наборов экспериментальных данных затрудняет объективное сравнение различных алгоритмов и оценку их способности работать за пределами условий, представленных при обучении. Для дальнейшего развития интеллектуального фотонного мониторинга необходимы экспериментальные выборки, в которых синхронно регистрируются исходные оптические данные и независимо измеряемые параметры состояния фильтра — перепад давления, поток, проницаемость, масса накопленного загрязнителя и характеристики его структуры.

8.7. Ограниченная длительная и промышленная валидация

Значительная часть рассмотренных фотонных методов исследована в лабораторных установках или специально разработанных измерительных ячейках с обеспеченным оптическим доступом [1, 2]. Такие исследования необходимы для установления физических закономерностей и проверки работоспособности методов, однако условия их проведения не полностью воспроизводят продолжительную эксплуатацию промышленного фильтра.

Для практического применения необходимо оценивать долговременный дрейф измерительной системы, загрязнение самого чувствительного элемента, устойчивость к многократным циклам загрязнения и очистки, воздействию промывочных и химически активных сред, а также повторяемость характеристик после регенерации. Отдельные работы уже демонстрируют использование фотонных методов для наблюдения процессов очистки и восстановления мембран [25, 27], однако данных, позволяющих оценить многократную долговременную эксплуатацию встроенных фотонных датчиков, в рассматриваемой выборке недостаточно.

Поэтому зрелость базовой фотонной технологии и зрелость законченной системы мониторинга фильтра необходимо различать. Например, ВБР и волоконные интерферометры представляют собой хорошо разработанные измерительные преобразователи [50–54, 56], однако это не означает, что их интегрированное применение для контроля загрязнения и ресурса фильтрующих материалов находится на той же стадии технологической готовности.

8.8. Переход от диагностики текущего состояния к прогнозированию ресурса

Методы многомерного анализа, математического моделирования и машинного обучения уже используются для обработки фотонных данных и восстановления количественных характеристик загрязнения [2, 36–38]. Однако в большинстве случаев решается задача определения текущего состояния системы либо описания уже наблюдаемой динамики процесса. Для технического обслуживания значительно более важной является прогностическая задача: определение момента, когда фильтрующий элемент достигнет предельно допустимого состояния и потребуется его очистка, регенерация или замена.

Для ее решения необходим анализ временной последовательности измерений и построение модели, связывающей скорость изменения фотонных признаков с дальнейшим ростом гидравлического сопротивления или снижением проницаемости. Такая модель должна учитывать не только текущее загрязнение, но и тип материала, режим фильтрации, состав загрязняющей среды и историю эксплуатации.

Таким образом, перспективным направлением является переход от определения текущего состояния к прогнозированию дальнейшей деградации фильтрующего материала. В этом случае фотонная система становится не только средством наблюдения, но и источником данных для технического обслуживания по фактическому состоянию.

Проведенный анализ показывает, что основным ограничением современного этапа развития является не недостаток отдельных фотонных методов измерения. Уже существуют технологии, позволяющие получать морфологическую, химическую и механическую информацию о фильтрующей системе. Основной нерешенной задачей является их объединение в метрологически обоснованную систему, обеспечивающую переход от регистрируемых оптических сигналов к пространственно разрешенным инженерным параметрам состояния фильтрующего материала и прогнозу его дальнейшей работоспособности. Именно решение этой задачи определяет переход от внешней фотонной диагностики к интеллектуальным фильтрующим материалам со встроенными средствами мониторинга.

9. Перспективные направления развития фотонного мониторинга фильтрующих материалов

Дальнейшее развитие фотонного мониторинга фильтрующих материалов связано прежде всего с переходом от внешнего наблюдения за процессом фильтрации к интегрированным измерительным системам, в которых чувствительные элементы являются частью конструкции фильтра. Наиболее перспективными в этом отношении представляются волоконно-оптические датчики, сочетающие малые размеры, возможность дистанционного опроса, устойчивость к электромагнитным воздействиям и возможность объединения нескольких чувствительных элементов в одной измерительной линии.

Одним из направлений является интеграция волоконных брэгговских решеток и волоконных интерферометров Фабри–Перо непосредственно в фильтрующий материал или его несущую конструкцию. Такие элементы потенциально позволяют регистрировать локальные изменения давления, деформации и температуры, сопровождающие накопление загрязнений и рост сопротивления фильтра. Существующие волоконно-оптические преобразователи уже обеспечивают измерение давления и температуры [50], повышение чувствительности за счет интерферометрических схем [51], температурную компенсацию [54] и учет особенностей передачи деформации к чувствительному элементу [52, 53]. Основной задачей является адаптация этих решений к пористым и волокнистым материалам и установление количественной связи между оптическим откликом и эксплуатационными характеристиками фильтра.

Другим перспективным направлением являются волоконные спектроскопические зонды. Работы по оптоволоконной регистрации флуоресценции непосредственно в зоне формирования загрязняющего слоя [5, 28] показывают возможность создания чувствительных элементов, реагирующих на накопление органических компонентов загрязнения. Совмещение такого спектрально-селективного канала с ВБР- или интерферометрическим датчиком позволило бы одновременно получать информацию о химическом составе загрязнений и об изменении механического или гидравлического состояния фильтра.

Дополнительные возможности связаны с функционализацией волоконно-оптических чувствительных элементов специальными индикаторными покрытиями. В качестве методически обеспечивающего примера такого подхода можно отметить волоконно-оптический механолюминесцентный датчик с индикаторным полимерным покрытием [59]. Хотя данная работа непосредственно не относится к фильтрационным системам, она демонстрирует возможность формирования дополнительного чувствительного механизма за счет функционального покрытия оптического элемента.

Особый интерес представляет многоточечный и квазираспределенный контроль. Пространственная неоднородность загрязнения делает недостаточным использование единственного чувствительного элемента, особенно для крупноразмерных и многослойных фильтров. Возможность сетевой организации волоконно-оптических датчиков уже продемонстрирована для измерения механических параметров [56]. Дополнительные возможности могут быть связаны с использованием протяженных спектрально-селективных волоконных структур, в том числе чирпированных волоконных брэгговских решеток, спектральные характеристики которых позволяют формировать распределенный по длине чувствительный участок [60]. Перенос подобных архитектур на фильтрующие материалы потенциально позволит формировать пространственную карту изменения их состояния и выявлять локальные области преимущественного засорения до появления выраженного изменения интегрального перепада давления.

Следующим этапом является создание многомодальных систем, объединяющих несколько независимых диагностических признаков. В такой системе морфологическая информация может дополняться спектроскопическими данными и показаниями встроенных волоконных датчиков. Это позволит представить состояние фильтрующего материала

в виде многокомпонентного вектора, включающего характеристики загрязняющего слоя, его химический состав, локальное давление, деформацию и температуру. Подобный подход потенциально позволяет повысить однозначность диагностики по сравнению с использованием одного измерительного параметра.

Обработка многомерных данных делает актуальным применение методов машинного обучения. Уже показана возможность использования метода главных компонент для анализа рамановских спектров [29] и глубоких нейронных сетей для восстановления характеристик загрязняющего слоя и прогнозирования снижения потока по данным оптической когерентной томографии [37, 38]. Для встроенных систем перспективным является переход к моделям, объединяющим данные различных фотонных каналов и восстанавливающим непосредственно инженерные параметры состояния фильтра.

В более долгосрочной перспективе такие системы могут стать основой цифрового двойника (*digital twin*) фильтрующего элемента, в котором текущие измерительные данные непрерывно сопоставляются с моделью его деградации. В этом случае задача мониторинга будет заключаться не только в обнаружении загрязнения, но и в прогнозировании изменения перепада давления, проницаемости и момента необходимости очистки или замены фильтра.

Таким образом, наиболее вероятное направление развития связано с формированием интеллектуальных фильтрующих материалов, сочетающих собственно фильтрационную функцию, встроенные фотонные чувствительные элементы и алгоритмы обработки данных. Переход от отдельного оптического датчика к распределенной многопараметрической системе позволит рассматривать фильтрующий элемент как объект непрерывного контроля технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса.

10. Заключение

Проведенный анализ показывает, что фотонные методы формируют самостоятельное и быстро развивающееся направление мониторинга состояния фильтрующих материалов и фильтрационных систем. Наиболее развитая экспериментальная база сформирована применительно к мембранным процессам, где оптическая когерентная томография, рамановская и флуоресцентная спектроскопия, а также методы непосредственной оптической визуализации уже позволяют исследовать формирование загрязняющего слоя, его пространственную структуру, химический состав и динамику изменения непосредственно в процессе фильтрации.

Различные фотонные технологии характеризуют разные стороны состояния фильтрующего материала. Оптическая когерентная томография обеспечивает количественную информацию о морфологии и пространственном распределении загрязнений, спектроскопические методы — об их химической природе, а фотометрические методы позволяют формировать относительно простые интегральные признаки изменения состояния фильтра. При этом ни один из рассмотренных подходов не обеспечивает полного описания фильтрующего элемента, что определяет перспективность совместного использования взаимодополняющих измерительных принципов.

Особое значение для дальнейшего развития данного направления имеют волоконно-оптические технологии. Возможность интеграции чувствительных элементов непосредственно в конструкцию фильтра, дистанционного опроса и мультиплексирования создает предпосылки для перехода от внешней оптической диагностики к встроенному многоточечному мониторингу. Волоконные брэгговские решетки, интерферометрические датчики и волоконные спектроскопические зонды потенциально позволяют контролировать давление, деформацию, температуру, показатель преломления и химические изменения среды в непосредственной близости от фильтрующего материала.

Вместе с тем анализ литературы выявляет существенный разрыв между уровнем развития отдельных фотонных и волоконно-оптических преобразователей и степенью их интеграции в реальные фильтрующие материалы. Особенно ограничено число исследований, посвященных встроенному мониторингу тканых, нетканых и глубинных волокнистых фильтров. Недостаточно разработана также количественная связь между оптическими диагностическими признаками и инженерно значимыми характеристиками фильтрующего элемента — перепадом давления, проницаемостью, степенью загрязнения, грязеемкостью и остаточным ресурсом.

Следующим этапом развития представляется создание многопараметрических систем, объединяющих морфологические, спектроскопические и волоконно-оптические измерения с алгоритмами многомерной обработки данных и машинного обучения. В таких системах регистрируемый набор фотонных сигналов должен преобразовываться непосредственно в количественные показатели текущего технического состояния и прогноз дальнейшей деградации фильтра.

Таким образом, основная тенденция развития рассматриваемой области может быть охарактеризована как переход от внешнего наблюдения процессов загрязнения к интеллектуальным фильтрующим материалам со встроенными средствами мониторинга состояния. Реализация такого подхода позволит перейти от регламентного обслуживания фильтрующих элементов к обслуживанию по фактическому состоянию и прогнозируемому остаточному ресурсу.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания FZSU-2026-0009, рег. номер НИОКТР 126020516512-7.

Список использованных источников

1. A review of in situ real-time monitoring techniques for membrane fouling in the biotechnology, biorefinery and food sectors / G. Rudolph, T. Virtanen, M. Ferrando, C. Güell, F. Lipnizki, M. Kallioinen // Journal of Membrane Science. – 2019. – Vol. 588. – P. 117221.
2. Noninvasive monitoring of fouling in membrane processes by optical coherence tomography: A review / K.T. Huisman, B. Blankert, H. Horn, M. Wagner, J.S. Vrouwenvelder, S. Bucs, L. Fortunato // Journal of Membrane Science. – 2024. – Vol. 692. – Noninvasive monitoring of fouling in membrane processes by optical coherence tomography. – P. 122291.
3. Optical coherence tomography (OCT) as a robust technique for the non-invasive imaging in membrane-based water treatment / H. Wan, D. Shi, C. Zhou, B. Ma, W. Li, S. Shao, C. Tang // Separation and Purification Technology. – 2025. – Vol. 376. – P. 133986.
4. Real-time fouling monitoring with Raman spectroscopy / T. Virtanen, S.P. Reinikainen, M. Kögler, M. Mänttäri, T. Viitala, M. Kallioinen // Journal of Membrane Science. – 2017. – Vol. 525. – P. 312-319.
5. Yamamura H. Solid-phase fluorescence excitation emission matrix for *in-situ* monitoring of membrane fouling during microfiltration using a polyvinylidene fluoride hollow fiber membrane / H. Yamamura, Q. Ding, Y. Watanabe // Water Research. – 2019. – Vol. 164. – P. 114928.
6. Incipient Biofouling Detection via Fiber Optical Sensing and Image Analysis in Reverse Osmosis Processes / H. Oesinghaus, D. Wanken, K. Lupp, M. Gastl, M. Elsner, K. Glas // Membranes. – 2023. – Vol. 13. – № 6. – P. 553.
7. Dzyubo V.V. Filtering Materials and Operating Parameters of Water Purifiers / V.V. Dzyubo // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture. – 2019. – № 1. – P. 177-187.

8. Герасимов В.М. Исследование деформирования фильтровальных мембран из волокнистых полимерных материалов в устройствах осветления оборотной воды горных предприятий / В.М. Герасимов, Е.И. Нижегородцев // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2023. – Vol. 29. – № 3. – P. 8-15.
9. Presser C. Filter Material Effects on Particle Absorption Optical Properties / C. Presser, J.M. Conny, A. Nazarian // Aerosol Science and Technology. – 2014. – Vol. 48. – № 5. – P. 515-529.
10. A critical review of filter transmittance measurements for aerosol light absorption, and *de novo* calibration for a decade of monitoring on PTFE membranes / W.H. White, K. Trzepla, N.P. Hyslop, B.A. Schichtel // Aerosol Science and Technology. – 2016. – Vol. 50. – № 9. – P. 984-1002.
11. Применение оптического метода контроля для оценки параметров фильтрующих элементов из нетканых волокнистых полимерных материалов / О.В. Кузнецова, С.Ю. Стрельникова (Краснощекова), А.А. Хролынцев, О.В. Яковлева // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 2. – P. 142-146.
12. Salamatov V.I. Study of the filtering properties of fabrics derived from cotton and synthetic fibres / V.I. Salamatov // Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. – 2020. – Vol. 10. – № 2. – P. 325-331.
13. Low-cost image-based monitoring to assess spatial and temporal biofouling dynamics in high-pressure membranes / A. Mitranescu, A. Steger, A. Sudjito, J.E. Drewes // Journal of Membrane Science. – 2026. – Vol. 741. – P. 125114.
14. Novel ApproachTo Characterizing the Growth of a FoulingLayer during Membrane Filtration via Optical Coherence Tomography / Y. Gao, S. Haavisto, W. Li, C.Y. Tang, J. Salmela, A.G. Fane // Environmental Science & Technology. – 2014. – Vol. 48. – № 24. – P. 14273-14281.
15. In-situ biofilm characterization in membrane systems using Optical Coherence Tomography: Formation, structure, detachment and impact of flux change / C. Dreszer, A.D. Wexler, S. Drusová, T. Overdijk, A. Zwijnenburg, H.-C. Flemming, J.C. Kruithof, J.S. Vrouwenvelder // Water Research. – 2014. – Vol. 67. – In-situ biofilm characterization in membrane systems using Optical Coherence Tomography. – P. 243-254.
16. Optical coherence tomography for the in situ three-dimensional visualization and quantification of feed spacer channel fouling in reverse osmosis membrane modules / S. West, M. Wagner, C. Engelke, H. Horn // Journal of Membrane Science. – 2016. – Vol. 498. – P. 345-352.
17. Spatially-resolved in-situ quantification of biofouling using optical coherence tomography (OCT) and 3D image analysis in a spacer filled channel / L. Fortunato, S. Bucs, R.V. Linares, C. Cali, J.S. Vrouwenvelder, T. Leiknes // Journal of Membrane Science. – 2017. – Vol. 524. – P. 673-681.
18. Fortunato L. Time-resolved monitoring of biofouling development on a flat sheet membrane using optical coherence tomography / L. Fortunato, S. Jeong, T. Leiknes // Scientific Reports.– 2017. – Vol. 7. – № 1. – P. 15.
19. Assessing internal fouling during microfiltration using optical coherence tomography and evapoporometry / Q. Han, T.A. Trinh, M.B. Tanis-Kanbur, W. Li, J.W. Chew // Journal of Membrane Science. – 2020. – Vol. 595. – P. 117588.
20. Analyzing external and internal membrane fouling by oil emulsions via 3D optical coherence tomography / T.A. Trinh, W. Li, Q. Han, X. Liu, A.G. Fane, J.W. Chew // Journal of Membrane Science. – 2018. – Vol. 548. – P. 632-640.
21. In-situ monitoring and quantification of fouling development in membrane distillation by means of optical coherence tomography / A. Bauer, M. Wagner, F. Saravia, S. Bartl, V. Hilgenfeldt, H. Horn // Journal of Membrane Science. – 2019. – Vol. 577. – P. 145-152.
22. Fouling development in direct contact membrane distillation: Non-invasive monitoring and destructive analysis / L. Fortunato, Y. Jang, J.-G. Lee, S. Jeong, S. Lee, T. Leiknes, N. Ghaffour

// Water Research. – 2018. – Vol. 132. – Fouling development in direct contact membrane distillation. – P. 34-41.
23. Membrane fouling by clay suspensions during NF-like forward osmosis: Characterization via optical coherence tomography / X. Liu, G. Chen, G. Tu, Z. Li, B. Deng, W. Li // Journal of Membrane Science. – 2020. – Vol. 602. – Membrane fouling by clay suspensions during NF-like forward osmosis. – P. 117965.
24. Operation conditions affecting scale formation in membrane distillation - An in situ scale study based on optical coherence tomography / A. Bauer, M. Wagner, H. Horn, F. Saravia // Journal of Membrane Science. – 2021. – Vol. 623. – P. 118989.
25. Im S.J. Real-time fouling monitoring and membrane autopsy analysis in forward osmosis for wastewater reuse / S.J. Im, L. Fortunato, A. Jang // Water Research. – 2021. – Vol. 197. – P. 117098.
26. Quantitative Characterization of Microfiltration Membrane Fouling Using Optical Coherence Tomography with Optimized Image Analysis / S. Lee, H. Cho, Y. Choi, J.A. Lee, S. Lee // Membranes. – 2026. – Vol. 16. – № 2. – P. 50.
27. Ding Q. In situ and online monitoring of the chemical cleaning efficiency by solid-phase fluorescence excitation–emission matrix spectroscopy (SPF-EEM) / Q. Ding, K. Ochiai, H. Yamamura // Journal of Membrane Science. – 2020. – Vol. 611. – P. 118296.
28. Dynamic analysis of ultrafiltration membrane fouling based on in-situ solid-phase fluorescence optic fiber (SPFOF): Fouling mechanism and cake layer structure / S. Mu, R. Zheng, J. Ma, C. Liu, J. Zhang, J. Wang // Journal of Membrane Science. – 2026. – Vol. 738. – Dynamic analysis of ultrafiltration membrane fouling based on in-situ solid-phase fluorescence optic fiber (SPFOF). – P. 124739.
29. Visual tool for real-time monitoring of membrane fouling via Raman spectroscopy and process model based on principal component analysis / T. Virtanen, S.-P. Reinikainen, J. Lahti, M. Mänttäri, M. Kallioinen // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – № 1. – P. 11057.
30. Real-time Raman based approach for identification of biofouling / M. Kögler, B. Zhang, L. Cui, Y. Shi, M. Yliperttula, T. Laaksonen, T. Viitala, K. Zhang // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2016. – Vol. 230. – P. 411-421.
31. Real-Time Detection of Reverse-Osmosis Membrane Scaling via Raman Spectroscopy / O.D. Supekar, J.J. Brown, A.R. Greenberg, J.T. Gopinath, V.M. Bright // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2018. – Vol. 57. – № 47. – P. 16021-16026.
32. Real-time detection of early-stage calcium sulfate and calcium carbonate scaling using Raman spectroscopy / O.D. Supekar, D.J. Park, A.R. Greenberg, J.T. Gopinath, V.M. Bright // Journal of Membrane Science. – 2020. – Vol. 596. – P. 117603.
33. Molecular Spectroscopic Characterization of Membrane Fouling: A Critical Review / W. Chen, C. Qian, K.-G. Zhou, H.-Q. Yu // Chem. – 2018. – Vol. 4. – Molecular Spectroscopic Characterization of Membrane Fouling. – № 7. – P. 1492-1509.
34. Light sheet fluorescence microscopy applied for in situ membrane fouling characterization: The microscopic events of hydrophilic membrane in resisting DEX fouling / L. Chen, Y. Zhang, R. Li, H. Zhang, M. Zhang, H. Zhang // Water Research. – 2020. – Vol. 185. – Light sheet fluorescence microscopy applied for in situ membrane fouling characterization. – P. 116240.
35. *In Situ* Visualization of Membrane Fouling Evolution during Ultrafiltration Using Label-Free Hyperspectral Light Sheet Fluorescence Imaging / L. Chen, R. Li, Y. Zhang, Y. Xu, J. Chen, L. Wang, H. Zhu, M. Zhang, H. Zhang // Environmental Science & Technology. – 2023. – Vol. 57. – № 11. – P. 4533-4542.
36. Im S.J. Real-time monitoring of forward osmosis membrane fouling in wastewater reuse process performed with a deep learning model / S.J. Im, N.D. Viet, A. Jang // Chemosphere. – 2021. – Vol. 275. – P. 130047.

37. Deep neural networks for modeling fouling growth and flux decline during NF/RO membrane filtration / S. Park, S.-S. Baek, J. Pyo, Y. Pachepsky, J. Park, K.H. Cho // Journal of Membrane Science. – 2019. – Vol. 587. – P. 117164.
38. Modeling of NF/RO membrane fouling and flux decline using real-time observations / J. Park, K. Jeong, S. Baek, S. Park, M. Ligaray, T.H. Chong, K.H. Cho // Journal of Membrane Science. – 2019. – Vol. 576. – P. 66-77.
39. Evaluating the effects of organic matter bioavailability on nanofiltration membrane using real-time monitoring / S. Park, J. You, Y. Ahn, W. Jung, J. Kim, S. Lee, J. Park, K.H. Cho // Journal of Membrane Science. – 2018. – Vol. 548. – P. 519-525.
40. Investigation of fouling mechanism in membrane distillation using in-situ optical coherence tomography with green regeneration of fouled membrane / J. Guo, P.W. Wong, B.J. Deka, B. Zhang, S. Jeong, A.K. An // Journal of Membrane Science. – 2022. – Vol. 641. – P. 119894.
41. Христофорова М.И. Методика расчета оптимальной структуры фильтрующего элемента из нетканого полимерного материала / М.И. Христофорова, А.А. Хролынцев, О.В. Яковлева // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 11-2. – P. 331-337.
42. Христофорова М.И. Поиск оптимальных параметров фильтрующего слоя для элементов из нетканого полимерного волокнистого материала / М.И. Христофорова, А.А. Хролынцев, О.В. Яковлева // Наукоемкие технологии. – 2016. – Vol. 17. – № 5. – P. 69-73.
43. Аниськова (Баталенкова) В.А. Нетканые многослойные фильтровальные материалы / В.А. Аниськова (Баталенкова) // Евразийский союз ученых. – 2018. – № 8-1 (53). – P. 4-6.
44. Nadezkin A.V. Methods of Increasing Effetiency of thin Clearing Engine Oil by Improving Filtering Nonwovers in Oil Puridiers of Marine Diesel Engins / A.V. Nadezkin, G.P. Kicha, L.A. Semeniuk // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies. – 2018. – P. 31-41.
45. Filter materials for the oil-contaminated wastewater treatment / D. Tarabukin, T. Schemelinina, E. Anchugova, M. Markarova // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences. – 2025. – Vol. 0. – № 7. – P. 148-152.
46. Применение термохимически стойких фильтрующих материалов в микроэлектронной промышленности / Е. Астахов, А. Астахова, П. Царин, И. Колганов, С. Горобец // Electronics: science, technology, business. – 2019. – Vol. 188. – № 7. – P. 128-132.
47. Волоконно-оптический датчик давления для системы управления двигателем била / Л.Г. Иванович, М.С. Александрович, К.Е. Юрьевич, Л.Н. Александровна, С.В. Иванович // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2011. – № 3-3. – P. 397-402.
48. Разработка и исследование волоконно-оптического датчика температуры на основе регенерированной волоконной брэгговской решетки / Д.А. Коннов, Казачкова И.Д., Коннов К.А., Куликова В.А., Варжель С.В. // Оптический журнал. – 2024. – Vol. 91. – № 5.
49. Разработка и исследование волоконно-оптического датчика температуры на основе интерферометра Фабри–Перо, полученного методом сварки оптических волокон / Коннов Д.А., Казачкова И.Д., Савин В.В., Волошина А.Л., Коннов К.А., Плотников М.Ю., Варжель С.В. // Оптический журнал. – 2023. – Vol. 90. – № 9.
50. Волоконно-оптический датчик одновременного измерения температуры и давления с использованием интерферометра Фабри–Перо и волоконной брэгговской решетки / К.М. Фадеев, Д.Д. Ларионов, Л.А. Жикина, А.М. Минкин, Д.И. Шевцов // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – № 4. – P. 115-119.
51. Guo X., Jiang C., Ye W., Sun S., Liu C., Huang H. Ultra-high sensitivity gas pressure sensor based on a cascaded Fabry–Perot interferometers and Vernier effect (Высокочувствительный

датчик давления газа на основе каскадных интерферометров Фабри–Перо и эффекта Вернье) [in English] // Opticheskii Zhurnal. – 2023. – V. 90. – № 1. – P. 84–95. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-01-84-95

52. Serovaev G.S. Investication of the Stability of FBG Sensor Measurements under Vvarious Climatic Conditions / G.S. Serovaev, N.A. Kosheleva // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2023. – № 4.
53. Созонов С.Н. Экспериментально-теоретическое исследование влияния конструктивных элементов волоконно-оптического датчика деформации на его показания и методика корректировки передаточной функции / Н.С. Созонов, И.Н. Шардаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – P. 173-188.
54. Методика корпусирования волоконной брэгговской решетки для ее пассивной температурной компенсации // Оптический журнал. – 2023.
55. Babaev O.G. Fiber-Optic Sensor for Pressure Measurement in Pneumatic-Hydraulic systems / O.G. Babaev // Journal of Dynamics and Vibroacoustics. – 2021. – Vol. 7. – № 2. – P. 17-25.
56. Сетевые цифровые волоконно-оптические датчики перемещения с закрытым оптическим каналом / Л.Г. Иванович, М.С. Александрович, А.Р. Рустамович, И.С. Валерьевич, Л.Н. Александровна, Г.А. Иванович // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 7 (38). – P. 9-15.
57. Разработка волоконно-оптического датчика температуры на базе чирпированных решёток Брэгга, основанного на модуляции интенсивности оптического излучения / А. Л. Волошина, У. Р. Коробкова, Д. А. Коннов, С. В. Варжель, Е. Е. Карпов // Оптический журнал. – 2024. – Т. 91, № 12. – С. 84–90.
58. All-fiber temperature and refractive index sensor based on cascaded tilted Bragg grating and Bragg grating (Полностью волоконный датчик изменений температуры и показателя преломления на основе последовательных наклонной и прямой брэгговских решёток) [на англ. яз.] / Yitao Fang, Wei He, Wen Zhang, Fanyong Meng, Lianqing Zhu, Kun Zhang, Hong Zhao // Оптический журнал. – 2021. – Т. 88. № 2. – С. 58–65. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-02-58-65
59. Pan′kov A.A. Statistical model of mechano-luminescence fiber optic sensor of indicator polymer coating [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. – 2025. – V. 92. – № 2. – P. 67–75. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-02-67-75
60. Запись и исследование спектральных характеристик чирпированных волоконных решеток Брэгга / А.А. Михнева, А.И. Грибаев, С.В. Варжель, Е.А. Фролов, В.А. Новикова, К.А. Коннов, Ю.К. Залесская // Оптический журнал. – 2018. – Vol. 85. – № 9. – P. 12-16.

PHOTON AND FIBER OPTIC TECHNOLOGIES MONITORING THE CONDITION OF FILTER MATERIALS

M.Yu. Fedotov [1,2], M.F. Galikhanov[3], A.Zh. Sakhabutdinov[1]

[1] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
10, st. K. Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

[2] Russian Engineering Academy
building 4, 9, Gazetny lane, Moscow, 125009, Russian Federation

[3]Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan,
20, st. Bauman, Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. Modern photonic and fiber-optic technologies for monitoring the condition of filtering materials and filtration systems are reviewed. Methods such as optical transmission and photometry, direct imaging, optical coherence tomography, fluorescence and Raman spectroscopy, and hyperspectral imaging are analyzed, as well as fiber-optic sensors based on polymer optical fibers, fiber Bragg gratings, and Fabry–Pérot interferometers. Particular attention is paid to the relationship between the physical and chemical changes in the filter material, the optical diagnostic indicators resulting from these changes, and engineering-relevant parameters of the filter's condition—including permeability, pressure drop, contamination level, deformation, and remaining service life. It is shown that the most extensive experimental foundation has been established for membrane processes, whereas integrated monitoring systems for conventional fibrous and non-woven filter materials remain significantly less developed. The possibilities for the quantitative processing of photonic data using multivariate analysis and machine learning methods are examined. Key limitations of current approaches are identified: an insufficient link between optical features and operational characteristics, the limited development of multi-point monitoring, issues regarding calibration and cross-sensitivity, and a lack of long-term validation. A promising direction is identified as the transition to smart filtering materials incorporating integrated multi-parameter photonic systems for monitoring and predicting technical condition.

Keywords: filtration materials, photonic monitoring, fiber-optic sensors, optical coherence tomography, fiber Bragg gratings, Fabry–Pérot interferometer, Raman spectroscopy, fluorescence spectroscopy, membrane fouling, machine learning.

Статья представлена в редакцию 25 августа 2026 г.