

РАЗРАБОТКА БУМАЖНОГО КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО СЕНСОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМАЛЬДЕГИДА В ВОЗДУХЕ ПОМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕАКЦИИ С ФУКСИНОМ В КИСЛОЙ СРЕДЕ

Г.В. Лычкин[✉], И.Т. Шарапова, И.М. Турышев, О.В. Ракова, Т.Г. Крупнова
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия
[✉] lychkingleb@mail.ru

Аннотация. Представлена разработка и исследование недорогого бумажного колориметрического сенсора для определения формальдегида (НСНО) в воздухе помещений. Сенсорный элемент изготовлен на основе хлопковой бумаги, пропитанной смесью фуксинсернистой кислоты (реактив Шиффа) и фосфорной кислоты. Механизм детектирования основан на селективной реакции окрашенного реагента Шиффа с формальдегидом в сильнокислой среде, что обеспечивает высокую специфичность сенсора к целевому аналиту. При воздействии паров формальдегида происходит последовательное изменение окраски сенсора: от исходного ярко-желтого цвета через промежуточное обесцвечивание до интенсивного фиолетового. Кинетика и интенсивность окрашивания зависят как от концентрации формальдегида в воздухе, так и от времени экспозиции. Показана возможность применения сенсора в двух режимах: для оперативного визуального контроля в течение 1 часа и для количественного накопительного измерения при экспозиции 24 часа. Количественная оценка проведена как визуально по цветовой шкале, так и с помощью цифровой обработки изображений с использованием смартфона и специализированного приложения PhotoMetrix PRO®, что позволило построить калибровочные зависимости с высокими коэффициентами детерминации ($R^2 > 0,98$). Сенсор позволяет детектировать формальдегид в диапазоне концентраций от 0,02 до 0,5 мг/м³, охватывающем как среднесуточные (0,01 мг/м³), так и максимально разовые (0,05 мг/м³) предельно допустимые концентрации. Простота изготовления, низкая стоимость и возможность интеграции с мобильными технологиями делают разработанный сенсор перспективным инструментом для мониторинга качества воздуха в жилых, офисных и производственных помещениях.

Ключевые слова: формальдегид, колориметрический сенсор, реакция Шиффа, мониторинг воздуха

Для цитирования: Разработка бумажного колориметрического сенсора для определения формальдегида в воздухе помещений на основе реакции с фуксином в кислой среде / Г.В. Лычкин, И.Т. Шарапова, И.М. Турышев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2026. Т. 18, № 2. С. 161–169. DOI: 10.14529/chem260214

DEVELOPMENT OF A PAPER-BASED COLORIMETRIC SENSOR FOR DETERMINATION OF FORMALDEHYDE IN INDOOR AIR BASED ON THE REACTION WITH FUCHSIN IN AN ACIDIC MEDIUM

G.V. Lychkin✉, I.T. Sharapova, I.M. Turyshev, O.V. Rakova, T.G. Krupnova
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
✉ lychkingleb@mail.ru

Abstract. This paper presents the development and study of a low-cost paper-based colorimetric sensor for the determination of formaldehyde (HCHO) in indoor air. The sensing element is fabricated from cotton paper impregnated with a mixture of fuchsin-sulfurous acid (Schiff's reagent) and phosphoric acid. The detection mechanism is based on the selective reaction of the colored Schiff's reagent with formaldehyde in a strongly acidic medium, ensuring high specificity of the sensor towards the target analyte. Upon exposure to formaldehyde vapors, the sensor undergoes a sequential color change: from the initial bright yellow color, through intermediate decoloration, to an intense violet hue. The kinetics and intensity of the coloration depend both on the formaldehyde concentration in the air and the exposure time. The possibility of using the sensor in two modes is demonstrated: for rapid (screening) visual control within 1 hour and for quantitative cumulative measurement during a 24-hour exposure. Quantitative assessment was performed both visually using a color scale and through digital image processing using a smartphone and the specialized application PhotoMetrix PRO®, which enabled the construction of calibration curves with high coefficients of determination ($R^2 > 0.98$). The sensor allows for the detection of formaldehyde in the concentration range from 0.02 to 0.5 mg/m³, covering both the average daily (0.01 mg/m³) and maximum single (0.05 mg/m³) permissible concentration limits. The simplicity of manufacturing, low cost, and potential for integration with mobile technologies make the developed sensor a promising tool for monitoring air quality in residential, office, and industrial premises.

Keywords: formaldehyde, colorimetric sensor, Schiff reaction, air monitoring

For citation: Lychkin G.V., Sharapova I.T., Turyshev I.M., Rakova O.V., Krupnova T.G. Development of a paper-based colorimetric sensor for determination of formaldehyde in indoor air based on the reaction with fuchsin in an acidic medium. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2026;18(2):161–169. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem260214

Введение

Формальдегид (HCHO) представляет собой один из наиболее распространённых и опасных загрязнителей воздуха в помещениях различного назначения – от жилых и офисных до производственных. Высокая летучесть, химическая активность и повсеместность источников выделения, к которым относятся строительные материалы на основе карбамидо- и фенолформальдегидных смол, древесные плиты (ДСП, ДВП), клеи, лаки, текстиль и бытовая химия, превращают его в постоянный компонент воздушной среды [1–3]. Токсикологическая опасность формальдегида носит комплексный характер: он обладает выраженным раздражающим действием на слизистые оболочки глаз, верхних дыхательных путей, может провоцировать аллергические реакции, головные боли, астматические приступы [4]. Наиболее серьёзную угрозу представляет его доказанная канцерогенность для человека (группа 1 по классификации Международного агентства по изучению рака, IARC), в частности, связь с повышенным риском развития опухолей носоглотки и лейкозов [4, 5].

Нормативное регулирование содержания формальдегида в атмосферном воздухе и воздухе рабочей зоны отражает высокую степень его опасности. Согласно [5] формальдегид относится к веществам 2 класса опасности. Для атмосферного воздуха его максимально разовая предельно допустимая концентрация (ПДК_{м.р.}) составляет 0,05 мг/м³, а среднесуточная (ПДК_{с.с.}) – 0,01 мг/м³. Для воздуха рабочей зоны установлена ПДК_{р.з.} на уровне 0,5 мг/м³, также для одного из наиболее частных источников формальдегида – фенолформальдегидных смол – при контроле их содержания по формальдегиду концентрация не должны превышать ПДК_{р.з.} 0,05 мг/м³, [6].

Во многих российских городах существует проблема загрязнения атмосферного воздуха формальдегидом, так как он является вторичным загрязнителем, и идентификация источников загрязнения является сложной научной задачей, в том числе это было показано в наших предыдущих работах по городу Челябинску [6]. Учитывая, что установленные нормативы ниже порога обнаружения формальдегида по запаху ($0,07 \text{ мг/м}^3$ [5]), и длительный латентный период многих заболеваний, вызываемых загрязнением воздуха формальдегидом, постоянный мониторинг и поддержание его концентраций на безопасном уровне приобретает критическое значение для охраны здоровья населения и обеспечения безопасных условий труда.

Существует большое количество методов определения содержания формальдегида в газовой фазе. Традиционные инструментальные методы анализа формальдегида, такие как газовая хроматография-масс-спектрометрия (ГХ-МС) и высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ), остаются «золотым стандартом» для получения точных и юридически значимых результатов [7, 8]. Однако эти методы обладают рядом фундаментальных ограничений, препятствующих их широкому использованию для задач оперативного, скринингового и, тем более, персонального мониторинга. К ним относятся громоздкость и высокая стоимость оборудования, необходимость в квалифицированном лабораторном персонале, сложная и длительная пробоподготовка, а также стационарность установок, не позволяющая проводить измерения непосредственно на месте. Для оперативного контроля обычно используются более простые фотометрические методы анализа [9], а автоматический мониторинг формальдегида в воздухе затруднен, в том числе, как было показано в нашей предыдущей работе [6] в связи с ограничениями, связанными с отсутствием необходимой приборной базы.

В настоящее время наблюдается устойчивый глобальный тренд на разработку альтернативных аналитических решений, ориентированных на принципы простоты, портативности, низкой стоимости и возможности использования в «полевых» условиях [10, 11]. Проведенный нами ранее патентный анализ [12] показал, что колориметрические методы при разработке сенсоров для контроля содержания формальдегида в воздухе занимают одну из лидирующих позиций, располагаясь на втором месте после электрохимических методов.

Базовый принцип колориметрии заключается в регистрации изменения окраски сенсорного элемента, происходящего в результате специфической химической реакции между иммобилизованным реагентом и целевым аналитом. Современное развитие этого направления, часто называют «цифровой колориметрией», поскольку кроме возможности визуальной регистрации изменения окраски и использования в виде пассивных бейдж-сенсоров, существует простая возможность обработки цифровых изображений, когда смартфон, оснащённый качественной камерой и процессором, превращается в универсальный детектор, способный не только фиксировать цветное изменение, но и проводить сложную математическую обработку данных в различных цветовых пространствах (RGB, HSV, CIELAB), строить калибровочные зависимости [12].

В настоящее время разработаны высокоселективные гидрогелевые колориметрические сенсоры на основе реакции Манниха формальдегида с природным полимером альгината натрия с синтетическим полимером полиэтиленимином [13]. Благодаря пористой поверхности сенсора, создаваемой за счет контролируемых условий сушки и замораживания, молекулы формальдегида быстро проникают вглубь материала, обеспечивая быстрый отклик (несколько минут) и низкий порог обнаружения ($0,02 \text{ мг/м}^3$). Однако, сложные условия синтеза, являются сдерживающим фактором для производства таких устройств. Разработанные микрожидкостные аналитические устройства на бумаге (μ PADs, microfluidic Paper-Based Analytical Devices) легко используются для визуального качественного и полуколичественного анализа. Система использует два независимых рН-индикатора (тимоловый синий и бромфеноловый синий) для создания надежного цветового отклика [14]. Принцип работы основан на непрямой детекции высвобождаемой кислоты, например, при реакции формальдегида с сульфатом гидроксиламина ($(\text{NH}_2\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$). В ходе этой реакции альдегидная группа окисляется, а в среду высвобождается серная кислота. Однако, другие альдегиды, могут мешающее влияние. Основой еще одного сенсора [15] служит микрожидкостный чип, изготовленный из полидиметилсилоксана методом мягкой литографии. В основе методологии лежит классическая реакция Нэша, когда в качестве реагента используется смесь на основе ацетилацетона, ацетата аммония и уксусной кислоты, приводящая в присутствии формальдегида к образованию желтого флуоресцентного соединения 3,5-диацетил-1,4-

дигидролутидина. Однако, метод обладает очевидными недостатками: реакция Нэша обычно используется не в колориметрическом, во флуоресцентном исполнении, кроме того, она характеризуется низкой скоростью и для полного протекания требуется нагрев до 50-60 °С.

Был разработан чувствительный элемент для определения формальдегида, на основе реактива Шиффа, помещенного на пористый мембранный стеклянный материал [16]. Реактив Шиффа является недорогим и доступным реагентом, однако мембранное стекло, используемое авторами, является дорогим и сводит на нет основное достоинство колориметрии – простоту и доступность. Целью данной работы было разработать недорогой бумажный колориметрический сенсор для оперативного контроля содержания формальдегида в воздухе помещений на основе реакции Шиффа с использованием визуального наблюдения и цифровой обработки на смартфоне.

Экспериментальная часть

Приготовление и стандартизация раствора фуксинсернистой кислоты

Основой для создания колориметрического сенсора послужил классический реагент Шиффа – фуксинсернистая кислота. Для приготовления реагента Шиффа использовали стандартные химические реагенты квалификации х.ч. Навеску основного фуксина массой 1 г растворяли в 200 мл дистиллированной воды на кипящей водяной бане. После полного растворения красителя и охлаждения полученный раствор фильтровали через беззольный фильтр в мерную колбу на 1 л. К охлажденной и профильтрованной основе добавляли 30 мл 20 % водного раствора калия метабисульфита. Смесь тщательно перемешивали и выдерживали в течение 20 минут для завершения реакции. Затем для стабилизации образующегося соединения и создания оптимальной кислой среды добавляли 10 миллилитров концентрированной соляной кислоты. Объем раствора доводили до метки дистиллированной водой, перемешивали и оставляли не менее чем на 24 часа в темноте. Перед каждой серией экспериментов проводили стандартизацию методом йодометрического титрования. В коническую колбу отбирали 3 мл приготовленного реактива, добавляли крахмальный индикатор и титровали 0,05 М раствором йода до появления устойчивого синего окрашивания. Нормальным считался расход титранта в интервале от 3 до 4 мл. Отклонение от этого диапазона указывало на нарушение баланса компонентов. Если расход йода был меньше 3 мл, к реактиву добавляли расчётное количество метабисульфита калия для восполнения дефицита сульфит-ионов. Если же расход превышал 4 мл, что свидетельствовало об избытке сульфитирующего агента, способного замедлять реакцию с формальдегидом, проводили корректировку добавлением дополнительного количества раствора основного фуксина. После корректировки реактив снова выдерживали сутки и повторяли титрование для подтверждения его готовности. Стандартизированный раствор хранили в склянке из тёмного стекла с притёртой пробкой, что обеспечивало его стабильность в течение нескольких недель.

Изготовление бумажных колориметрических сенсоров

Хлопковую бумагу нарезали на полоски размером 40 мм на 20 мм. Для пропитки бумаги был приготовлен раствор, содержащий 50 мл реактива Шиффа, 50 мл воды и 10 мл фосфорной кислоты. Реакция самой фуксинсернистой кислоты с формальдегидом не специфична, в нее вступают и другие альдегиды, однако в сильноокислой среде в реакцию вступает только формальдегид. Предыдущие исследования [18, 19] и наши предварительные опыты показали, что наиболее яркое окрашивание образуется при использовании для подкисления среды фосфорной кислоты. Бумагу погружали в приготовленный раствор на 1 минуту, а затем быстро высушивали горячим воздухом в течение 2–3 минут.

Проведение эксперимента по калибровке сенсоров

Эксперименты проводили с использованием эксикаторов диаметром 240 мм. На рис. 1 продемонстрирована схема эксперимента.

На дно эксикатора помещали растворы формалина с рассчитанной концентрацией, обеспечивающей заданную концентрацию формалина в газовой среде. В табл. 1 приведены концентрации водных растворов и концентрации газообразного формальдегида.

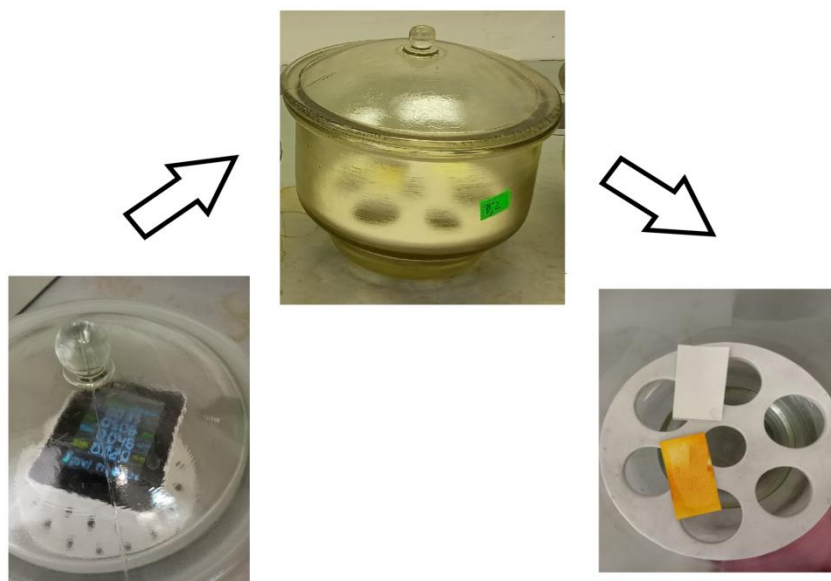


Рис. 1. Схема эксперимента

Расчёт концентраций растворов для перехода формальдегида из жидкости в газ

Таблица 1

Объём раствора формальдегида 1,5 мг/л, мл	Концентрация НСНО в водном растворе, моль/л	Концентрация газообразного НСНО, мг/м ³
0,20	$8,22 \times 10^{-5}$	0,02
0,53	$2,69 \times 10^{-4}$	0,06
2,00	$9,86 \times 10^{-4}$	0,20
5,20	$2,60 \times 10^{-3}$	0,50

Контроль концентрации формальдегида производили с помощью портативного анализатора воздуха (Air Quality Detector, Китай). Исходный раствор формальдегида с концентрацией 1,5 мг/л получали разбавлением формалина, для этого 3,8 мл концентрированного раствора (37%-ного) разбавляли в колбе на 1 л. Путем последовательных разбавлений готовили рабочие растворы, обеспечивающие в замкнутом объёме (эксикаторе) равновесную концентрацию паров формальдегида в диапазоне от 0,025 до 0,5 мг/м³. Подготовленные бумажные колориметрические сенсоры размещали на решётке в верхней части эксикатора. После размещения образцов эксикатор немедленно закрывали герметичной крышкой. Все опыты проводились при постоянной комнатной температуре (20 ± 2 °C) и естественном освещении, исключающем прямое попадание солнечных лучей на эксикаторы.

Использовали приложение для смартфонов PhotoMetrix PRO® на платформе Android предназначено для одномерного (зависимость аналитического сигнала от одного параметра) и многомерного (зависимость аналитического сигнала от многих параметров – цветовых каналов) цветометрического анализа различных объектов [20–25]. Съёмка окраски сенсора проводилась на белом матовом фоне. Смартфон (Redmi note 10 pro) фиксировался на расстоянии 10–12 см от образца. Для устранения влияния автоматических настроек камеры использовались ручной режим съёмки. В приложении проводили многомерный анализ с использованием цветометрических каналов R, G, B, реализуя алгоритм частичной регрессии метода наименьших квадратов (PLS) [21–23]. Используя данный алгоритм, можно определить концентрацию действующего вещества по градуировочной зависимости, рассчитанной методом PLS. На рис. 2 представлена установка параметров в приложении PhotoMetrix PRO®.

Спектры поглощения образцов были сняты на спектрофотометре Shimadzu UV-2700 с использованием приставки модели ISR-2600 для твердотельных образцов.

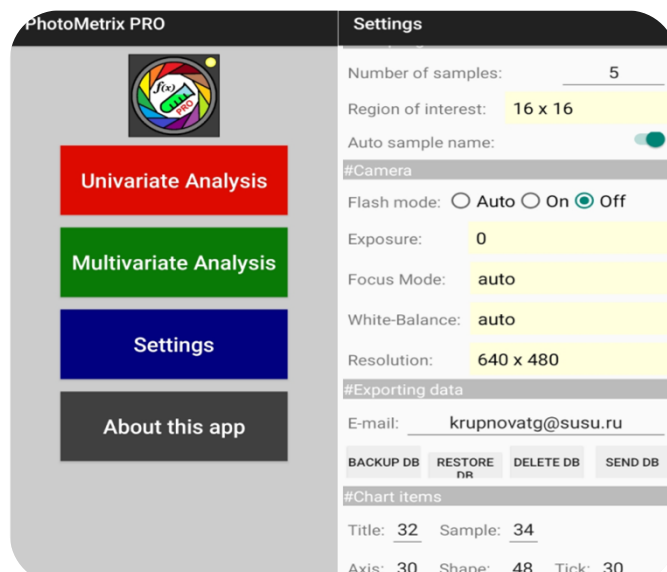


Рис. 2. Установка параметров в приложении PhotoMetrix PRO®

Результаты и их обсуждение

После обработки бумаги раствором фуксинсерной и фосфорной кислот и высушивания появляется ярко-желтая окраска, которая согласно литературным данным вызвана основным фуксином с двумя бензольными кольцами в одной плоскости [18]. После помещения в воздушную среду, содержащую формальдегид, окраска в течение часа исчезает пропорционально концентрации формальдегида. На рис. 3 показана шкала изменения окраски сенсора в течение 1 часа.



Рис. 3. Изменение окраски бумажного колориметрического сенсора в течение 1 ч воздействия формальдегида

На рис. 4 представлена регрессионная зависимость, R^2 равная 0,9847, с использованием мобильного приложения PhotoMetrix.

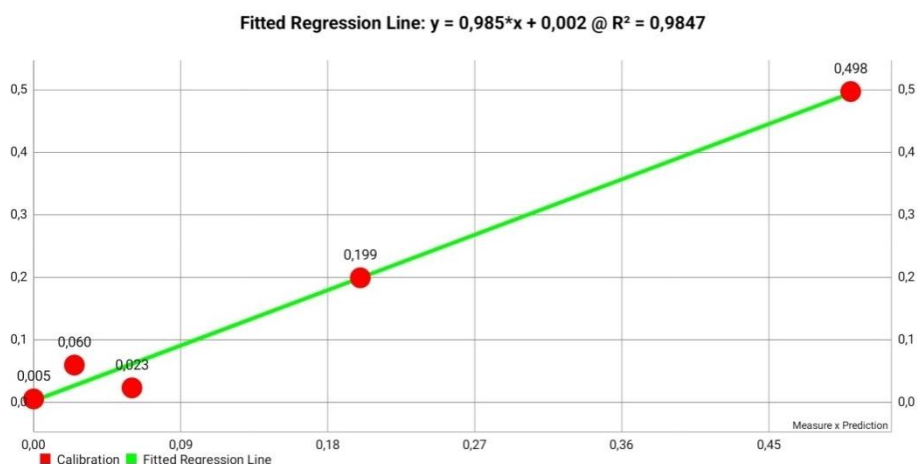


Рис. 4. Регрессионная зависимость, полученная в приложении PhotoMetrix при одночасовом воздействии

Данная колориметрическая шкала может быть использована для детектирования формальдегида при короткосрочном воздействии.

Далее при воздействии формальдегида в течение 24 часов происходит появление ярковыраженной фиолетовой окраски, интенсивность которой пропорциональна концентрации формальдегида. На рис. 5 показана шкала изменения окраски сенсора в течение 24 часов.

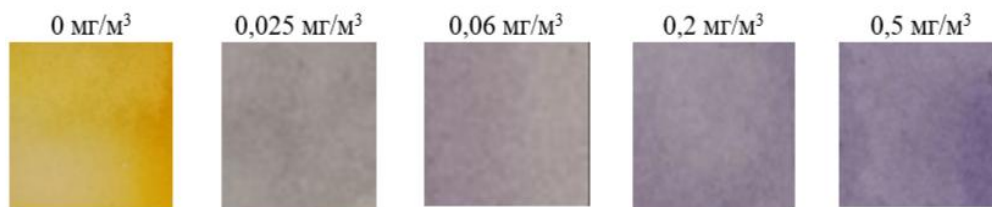


Рис. 5. Изменение окраски бумажного колориметрического сенсора в течение 24 ч воздействия формальдегида

На рис. 6 продемонстрирована регрессионная зависимость, R^2 равная 0,9927, которая может быть использована в качестве калибровочной прямой при 24 часов воздействии формальдегида.

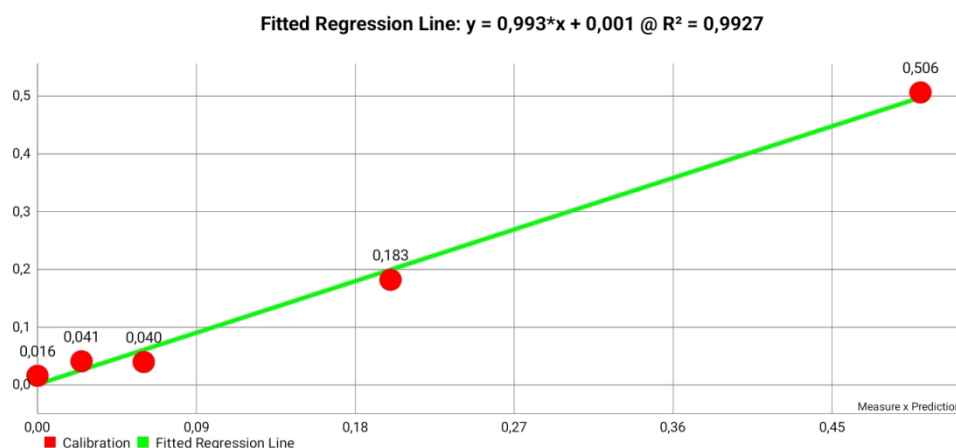


Рис. 6. Регрессионная зависимость, полученная в приложении PhotoMetrix при 24-часовом воздействии

На схеме представлена химическая реакция фуксинсерной кислоты с формальдегидом.

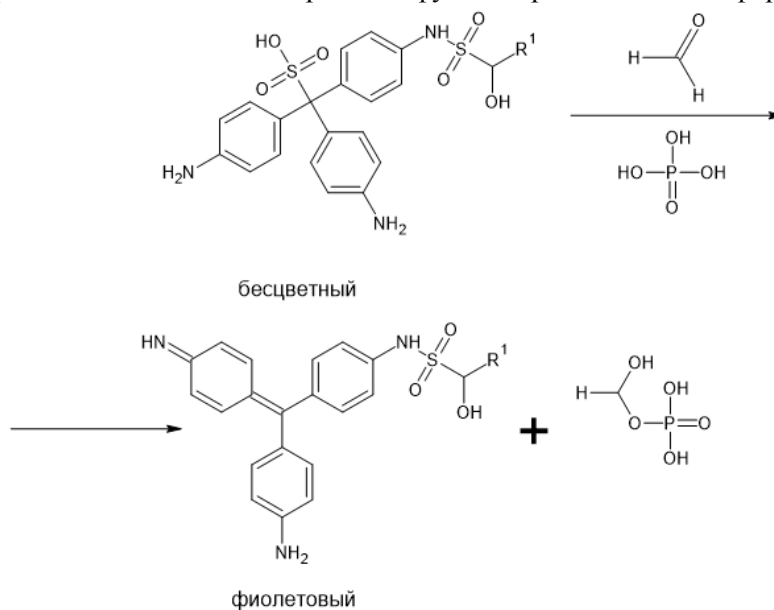


Схема. Уравнение химической реакции фуксинсерной кислоты с формальдегидом

В ходе реакции происходит переход из молекулы с двумя бензольными кольцами в одной плоскости (желтая окраска) в молекулу с тремя бензольными кольцами в одной плоскости (обесцвечивание) и образование хиноидной формы красителя в присутствии фосфорной кислоты (фиолетовая окраска) с максимумом поглощения 570 нм. На рис. 7 представлен спектр поглощения сенсора, спустя 24 часов нахождения в среде формальдегида с концентрацией 0,5 мг/м³.

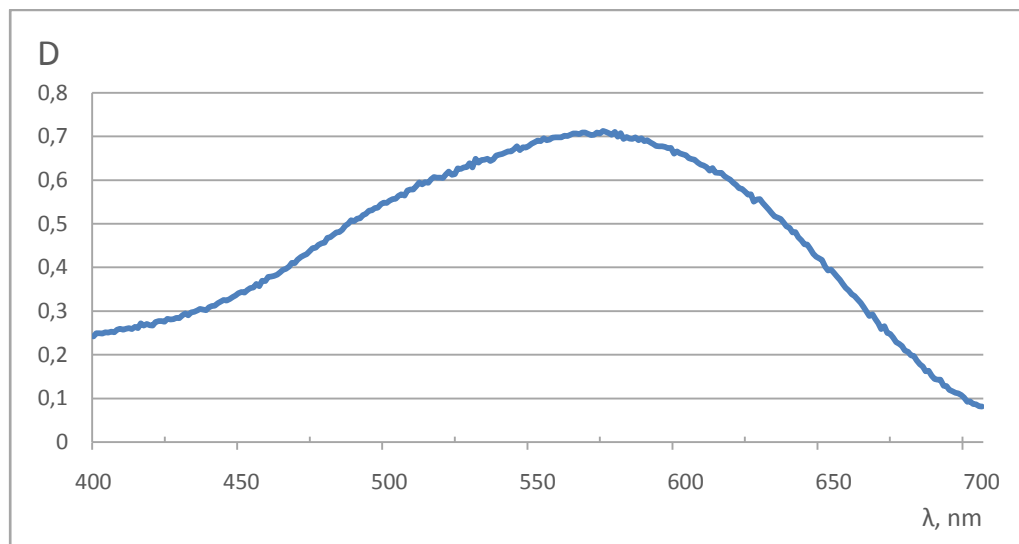


Рис. 7. Спектр поглощения образца через 24 ч воздействия формальдегида с концентрацией 0,5 мг/м³

Накопительный эффект появления фиолетового окрашивания в течение 24 часов с квазилинейным увеличением интенсивности окраски в зависимости от концентрации формальдегида можно использовать для оценки превышения ПДК среднесуточной.

Заключение

Был разработан бумажный колориметрический сенсор для определения формальдегида в воздухе помещений. Сенсор был изготовлен из хлопковой бумаги, пропитанной реактивом Шиффа и фосфорной кислотой. Сенсор после воздействия формальдегида изменял цвет с жёлтого через обесцвечивание на фиолетовый, а пик поглощения появлялся на длине волны 570 нм. Сенсор подходит как для визуального определения наличия формальдегида, так и для цифрового с использованием смартфона. Между интенсивностью окраски сенсора после воздействия формальдегида и величиной концентрации формальдегида, подвергшегося воздействию, существует квазилинейная зависимость. С помощью сенсора определить широкий диапазон концентраций формальдегида, от 0,02 до 0,5 мг/м³ как при краткосрочном воздействии в течение 1 часа, так и при долгосрочном воздействии в течение 24 ч.

Список источников

1. Халиков И.С. // Журн. экологическая химия. 2019. № 28(6). С. 307. DOI: 10.25996/6854.2024.24.75.001.
2. Salthammer T., Mentese S., Marutzky R. // Chem. Rem. 2010. V. 110, No. 4. P. 2536. DOI: 10.1021/cr800399g.
3. Meshalkina M., Sushnikov V., Kryzhova N. // MATEC Web Conf. 2018. V. 245. Art. No. 03003. DOI: 10.1051/mateconf/201824503003.
4. Villadiego-Molinares M.M., Ramirez-Martínez J.A., Rodríguez-Pulido A.I. // Revista de la Facultad de Medicina. 2020. V. 68, No. 3. DOI: 10.15446/revfacmed.v68n3.73188.
5. Golden R. // Crit Rev Toxicol. 2011. V. 41, No. 8. P. 672. DOI: 10.3109/10408444.2011.573467.
6. Collins J.J., Lineker G.A. // Regul. Toxicol. Pharmacol. 2004. V. 40, No. 2. P. 81. DOI: 10.1016/j.yrtph.2004.04.006
7. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

8. Крупнова Т.Г., Ракова О.В., Кочегоров В.М. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. 2022. Т. 14, № 3. С. 139. DOI: 10.14529/chem220315.
9. Su T., He R. // Formaldehyde and Cognition. Dordrecht: Springer Netherlands. 2017. P. 271. DOI: 10.1007/978-94-024-1177-5_14.
10. Gao X., Zhang X., Nie Y., Bao J. // Atmosphere. 2025. V. 16, No. 1. P. 107. DOI: 10.3390/atmos16010107.
11. РД 52.04.824-2015 «Массовая концентрация формальдегида в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом с фенол гидразином». [Электронный ресурс] // <http://libnorm.ru/Files2/1/4293755/4293755244.pdf>
12. Yang F., Ge L. // Sensors. 2023. V. 23, No. 24. P. 9887. DOI: 10.3390/s23249887.
13. Sui Z., Fang M., Lin H. // J. Colloid Interface Sci. 2023. V. 635. P. 14. DOI: 10.1016/j.jcis.2022.12.133.
14. Krupnova T., Rakova O., Bondarenko K. // International Journal of GEOMATE. V 25, No. 108. P. 208. DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.108.3892>
15. Li F., Tao Z., Yang J. Biomass Hydrogel with Core-Shell Structure for High-Sensitivity Indoor Trace Formaldehyde Detection [Электронный ресурс] // SSRN. 2023. URL: <https://ssrn.com/abstract=4654326>
16. Liao C., Zhang M., Gao N. // Chemosensors. 2021. V. 9, No. 12. P. 335. DOI: 10.3390/chemosensors9120335.
17. Guo X.-L., Chen Y., Jiang H.-L. // Sensors. 2018. V. 18, No. 9. P. 3141. DOI: 10.3390/s18093141.
18. Yamada Y., Nakamura J., Uchiyama M. // Sens. Actuators, B. 2008. V. 129, No. 2. P. 544. DOI: 10.1016/j.snb.2007.09.002.
19. Subasi N.T. // Schiff Base Org., Inorg. Phys. Chem. 2022. DOI: 10.5772/intechopen.108178.
20. Muhen L., Prestes O., Flores M. // Molecules/2022/27.4721. DOI: 10.3390/molecules27154721
21. Ferrão M., Teichmann A., Magnus V. // J. Braz. Chem. Soc. 2016. V. 27, No. 11. DOI: 10.5935/0103-5053.20160182.
22. Helfer G.A., Bock F.C., Tischer B. // J. Braz. Chem. Soc. 2021. V. 32, No. 2. P. 256. DOI: 10.21577/0103-5053.20200199.
23. Wei W., Huang J., Gao W., Lu X. // Chemosensors. 2021. V. 9, No. 2. P. 25. DOI: 10.3390/chemosensors9020025.
24. Liu J., Wu H., Liu Y. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2023. V. 15, No. 42. DOI: 10.1021/acsaami.3c09940.
25. Mutlu Y., Kilic V., Ozdemir G. // The Analyst. 2017. V. 142, No. 13. DOI: 10.1039/C7AN00741H.

Лычкин Глеб Владимирович – студент магистратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: lychkingleb@mail.ru

Шарапова Ирина Тагировна – студент бакалавриата, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: itsevervess@gmail.com

Турышев Илья Михайлович – студент магистратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: turishevil@yandex.ru

Ракова Ольга Викторовна – кандидат химических наук, доцент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: rakovaov@susu.ru

Крупнова Татьяна Георгиевна – кандидат химических наук, доцент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: krupnovatg@susu.ru

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2026 г.

The article was submitted 2 February 2026.