

Научная статья

УДК 504.054:544.723.54:681.586.72

СИНТЕЗ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ В ЛЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Данил Александрович Синило¹, Наталия Владимировна Захарова²

^{1, 2} Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург, Россия

¹ sinilodanil.1@mail.ru

² zakharova@lti-gti.ru

Аннотация. В статье представлен синтез газочувствительной системы Al_2O_3 -600TiO₂/50V₂O₅ методом молекулярного наслаивания для мониторинга токсичных газов пиролиза древесины в лесной промышленности. Показан высокий отклик на NO₂ ($R = 7,4$) и H₂S ($R = 5,1$), а также устойчивая восприимчивость к CO, H₂ и C₆H₆.

Ключевые слова: молекулярное наслаивание, сенсорики, безопасность, экологический мониторинг, синтез

Для цитирования: Синило Д. А., Захарова Н. В. Синтез газочувствительных покрытий методом молекулярного наслаивания для мониторинга атмосферы в лесной промышленности // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России = Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia : материалы XXII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. С. 1100–1103.

Original article

SYNTHESIS OF GAS-SENSITIVE COATINGS BY ATOMIC LAYER DEPOSITION FOR ATMOSPHERE MONITORING IN THE FORESTRY INDUSTRY

Danil A. Sinilo¹, Natalia V. Zakharova²

^{1, 2} Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russia

¹ sinilodanil.1@mail.ru

² zakharova@lti-gti.ru

Abstract. The article presents the synthesis of the Al_2O_3 -600TiO₂/50V₂O₅ gas-sensitive system by molecular layering for monitoring toxic gases of wood

pyrolysis in the forestry industry. A high response to NO_2 ($R = 7,4$) and H_2S ($R = 5,1$) was shown, as well as a stable susceptibility to CO , H_2 and C_6H_6 .

Keywords: molecular layer deposition, sensorics, safety, environmental monitoring, synthesis

For citation: Sinilo D. A., Zakharova N. V. (2026) Sintez gazochuvstvitel'ny'x pokry'tij metodom molekulyarnogo naslaivaniya dlya monitoringa atmosfery` v lesnoj promy'shlennosti [Synthesis of gas-sensitive coatings by atomic layer deposition for atmosphere monitoring in the forestry industry]. Nauchnoe tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii [Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia] : materials of the XXII All-Russian (national) Scientific and Technical Conference of undergraduate and postgraduate students. Ekaterinburg : USFEU, 2026. P. 1100–1103. (In Russ).

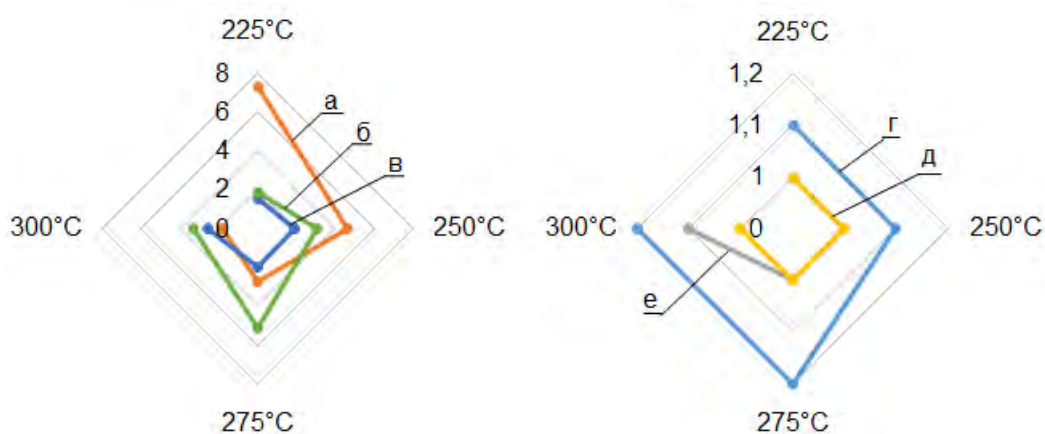
Ключевым вызовом, сопутствующим технологическому развитию и модернизации промышленности, в частности лесной, является обеспечение экологической безопасности. Одним из видов переработки древесины является ее пиролиз в условиях недостатка O_2 с целью получения древесного угля, используемого в качестве топлива. Однако, помимо создания конечного продукта, такой способ сопровождается образованием смеси газов, содержащих преимущественно водород и угарный газ, а также небольшое количество оксидов азота, ароматических углеводородов и H_2S , которые при образовании утечек и превышении предельно-допустимой концентрации могут вызывать опасные и чрезвычайные ситуации на местах расположения печей и ухудшать общее состояние работающих на них людей [1, 2]. В связи с этим приоритетной задачей становится создание систем эффективного мониторинга атмосферного воздуха, направленных на контроль содержания летучих опасных соединений (ЛОС). Среди всех методов решения перспективным является использование металлооксидных хеморезистивных газовых сенсоров, основные преимущества которых это простота сборки, высокая чувствительность, большое количество обнаруживаемых ЛОС, низкая стоимость, а также возможность снижения энергопотребления за счет их миниатюризации, что также важно в контексте технологического развития [3]. Все это делает их перспективными кандидатами для применения в условиях лесоперерабатывающих производств.

Эффективность таких сенсоров сильно зависит от свойств газочувствительного слоя. Значительный интерес представляют двухкомпонентные покрытия, нанесенные на поверхность подложки, образующие чувствительный элемент датчиков. Таким примером являются системы $\text{TiO}_2/\text{V}_2\text{O}_5$, где каждое из составляющих обладает своими особенными характеристиками, а их совместное применение обеспечивает появление синергетического эффекта и увеличение отклика. Для создания таких функциональных материалов широко используется технология молекулярного наслаивания (МН), также известная за рубежом как атомно-слоевое осаждение (*Atomic Layer*

Deposition), обладающая прецизионной точностью и возможностью нанесения конформных покрытий [4].

В данной работе синтез бинарного покрытия осуществляли методом МН в установке проточно-вакуумного типа путем многократной попеременной обработки парами TiCl_4 , VOCl_3 и H_2O поверхности датчиков на основе керамических пластин $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с нанесенными платиновыми встречно-штыревыми электродами и микронагревателем с обратной стороны. В результате чередования этапов хемосорбции на активных центрах поверхности и удаления избытка реагентов и продуктов реакции после проведения 600 и 50 циклов обработки парами тетрахлорида титана и оксохлорида ванадия соответственно была получена система $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}600\text{TiO}_2/50\text{V}_2\text{O}_5$.

Газочувствительные характеристики (отклики) измеряли на специализированной лабораторной установке посредством регистрации изменения сопротивления пленки при контакте с газами-аналитами. Нагрев до рабочих температур обеспечивали с помощью микронагревателя, управляемого предварительно откалиброванным источником питания. В результате были зафиксированы значения отклика (R) при воздействии основных летучих опасных соединений, образующихся при пиролизе древесины (рисунок).



Чувствительность системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}600\text{TiO}_2/50\text{V}_2\text{O}_5$ на газовые анализы:

a – NO_2 (100 ppm); $б$ – H_2S (100 ppm); $в$ – O_2 (5 %); $г$ – CO (100 ppm);

$д$ – H_2 (100 ppm); e – C_6H_6 (100 ppm)

Анализ полученных данных показывает, что бинарное покрытие $600\text{TiO}_2/50\text{V}_2\text{O}_5$ обладает сенсорной восприимчивостью к основным потенциально опасным газам, выделяющимся при термохимической деструкции лесоматериала (рисунок, a , $б$, $г$ – e), а также проявляет способность к обнаружению изменения концентрации кислорода (рисунок, $в$), что необходимо учитывать для правильного протекания процесса пиролиза. Наибольшая газочувствительность наблюдается к NO_2 ($R = 7,4$) (рисунок, a) и H_2S ($R = 5,1$) (рисунок, $б$) при рабочих температурах 225 и 275 °C соответственно, что особенно важно с учетом их высокой токсичности. Кроме того, наличие ста-

бильного отклика на такие газы, как CO, H₂ и C₆H₆, демонстрирует перспективность применения металлооксидных хеморезистивных газовых сенсоров, синтезированных методом молекулярного наслаивания, для решения задач комплексного мониторинга экологической безопасности атмосферы лесохимической промышленности на этапе переработки древесины.

Список источников

1. Древесина как химическое сырье. История и современность. III. Пиролиз древесины как метод ее переработки / Г. Н. Кононов, А. Н. Зарубина, А. Н. Веревкин [и др.] // Лесной вестник Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 3. С. 126–141.
2. Термические методы переработки древесины и торфа в энергетических целях / В. М. Батенин, А. В. Бессмертных, В. М. Зайченко [и др.] // Теплоэнергетика. 2010. № 11. С. 36–42.
3. Баранов А. М., Осипова Т. В. Современные тенденции в развитии сенсоров дозврывоопасных концентраций горючих газов и паров горючих жидкостей (краткий обзор) // Научное приборостроение. 2021. Т. 31, № 4. С. 3–29.
4. Соснов Е. А., Малков А. А., Малыгин А. А. Нанотехнология молекулярного наслаивания в производстве неорганических и гибридных материалов различного функционального назначения (обзор). I. История создания и развития метода молекулярного наслаивания // Журнал прикладной химии. 2021. Т. 94, № 8. С. 967–985.